

СТАТЬЯ

УДК 622.7:54  
DOI



CC BY 4.0

**ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПОЛЯ  
НА СОРБЦИОННУЮ СПОСОБНОСТЬ  
МОНТМОРИЛЛОНИТОВЫХ И КАОЛИНИТОВЫХ ЧАСТИЦ**

<sup>1</sup>Тютрина С. В. ORCID ID 0000-0001-7559-7057,

<sup>1</sup>Мясникова Н. В. ORCID ID 0000-0002-5235-4658,

<sup>2</sup>Ахметшин Б. С. ORCID ID 0000-0002-8849-402X

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Российская Федерация, e-mail: lana-2001@yandex.ru;

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский университет науки и технологий», Уфа, Российская Федерация

Цель исследования – разработать оптимальный режим комплексного физико-химического воздействия на процесс осаждения дисперсных частиц каолинита и монтмориллонита. Изучено влияние ультразвуковых колебаний в режиме стоячей волны в сочетании с флокулянтами на сорбционную активность дисперсных водных систем монтмориллонита и каолинита. Объектом исследования были сточные и оборотные воды артели «Бальджа». Мелкодисперсный ил и частицы силикатов накапливаются в отстойниках, что усложняет процесс промывки золотосодержащих песков. Использование полиэлектролитов способствует увеличению вязкостных характеристик из-за остаточных концентраций. Предлагается использовать комбинированное воздействие акустических колебаний и полиэлектролитов для снижения реологических параметров технической воды и увеличения скорости флокуляции. Воздействие ультразвуком на дисперсии монтмориллонита и каолинита приводит к увеличению площади поверхности частиц и повышению сорбционной активности. Диапазон частот ультразвука от 20 до 30 кГц оптимален для дисперсных химических систем, претерпевающих химические и физические изменения. Полученные флокулы монтмориллонита и каолинита исследовали в проходящем свете с помощью поляризационного микроскопа ZEISS AXIO Scope A1 в иммерсионных каплях диаметром до 10 мм. Режим фотосъемки осуществлялся в соответствии с программой Axio Vision Rel 4.8. Исследование мутности сточных и оборотных вод исследуемых объектов до воздействия на твердую фазу акустических колебаний и после воздействия в сочетании с флокулянтами проводилось на нефелометре, работающем в режиме мутномера. Степень осветления составила 88 %. Низкочастотный ультразвук облегчает отделение твердых частиц от суспензии, уменьшает наличие воды в межслоевом пространстве и способствует концентрированию во время обработки. Доказано, что частицы монтмориллонита лучше всего подвергаются воздействию ультразвуковых колебаний из-за наличия слабых коагуляционных мостиков.

**Ключевые слова:** монтмориллонит, каолинит, флокуляция, ультразвуковые колебания, дисперсная система

**THE EFFECT OF THE ULTRASONIC FIELD ON THE SORPTION CAPACITY  
OF MONTMORILLONITE AND KAOLINITE PARTICLES**

<sup>1</sup>Tyutrina S. V. ORCID ID 0000-0001-7559-7057,

<sup>1</sup>Myasnikova N. V. ORCID ID 0000-0002-5235-4658,

<sup>2</sup>Akhmetshin B. S. ORCID ID 0000-0002-5235-4658

<sup>1</sup>Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “National Research University Moscow Power Engineering Institute”, Moscow, Russian Federation, e-mail: lana-2001@yandex.ru;

<sup>2</sup>Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Ufa University of Science and Technology”, Ufa, Russian Federation

The purpose of the study: to develop an optimal regime of complex physico-chemical effects on the deposition of dispersed particles of kaolinite and montmorillonite. The effect of ultrasonic vibrations in the standing wave mode in combination with flocculants on the sorption activity of dispersed aqueous systems of montmorillonite and kaolinite has been studied. The object of the study was wastewater and recycled water from the Baldzha artel. Fine silt and silicate particles accumulate in the settling tanks, which complicates the process of washing gold-bearing sands. The use of polyelectrolytes on a constant basis contributes to an increase in viscosity characteristics due to residual concentrations. It is proposed to use the combined effect of acoustic vibrations and polyelectrolytes to reduce the rheological parameters of process water and increase the flocculation rate. The effect of ultrasound on montmorillonite and kaolinite dispersions leads to an increase in the surface area of the particles and an increase in sorption activity. The ultrasound frequency range from 20 to 30 kHz is optimal for dispersed chemical systems undergoing chemical and physical changes. The obtained montmorillonite and kaolinite floccules were examined in transmitted light using a ZEISS AXIO Scope A1 polarization microscope in immersion droplets up to 10 mm in diameter. The photographing mode was carried out in accordance with the Axio Vision Rel 4.8 program. The turbidity of wastewater and recycled water of the studied objects before exposure to the solid phase of acoustic vibrations and after exposure in combination with flocculants was carried out on a nephelometer operating in the turbidity meter mode. The degree of lightening was 88 %. Low-frequency ultrasound facilitates the separation of solid particles from the suspension, reduces the presence of water in the interlayer space and promotes concentration during processing. It has been proven that montmorillonite particles are best exposed to ultrasonic vibrations due to the presence of weak coagulation bridges.

**Keywords:** montmorillonite, kaolinite, flocculation, ultrasonic vibrations, dispersed system

### Введение

Известно, что разработка глинистых золотосодержащих месторождений приводит к значительному накоплению мелких силикатных примесей, ионов тяжелых металлов и органических примесей, особенно если доля мелкодисперсного чистого золота очень высока. Эффективность улавливания дисперсного золота напрямую зависит от изменений реологических параметров технологической воды, используемой на производстве [1, 2]. Для силикатных суспензий процесс структурообразования нежелателен, поскольку он уменьшает массу золотых зерен, способных к осаждению в шлюзах. Увеличение вязкости и предельного напряжения сдвига, вызванное присутствием коллоидных частиц кремниевой кислоты, способствует усилению адгезионных свойств по отношению к силикатам [1]. Обратные воды подвергаются циклическому очищению с использованием флокулянтов, избыток которых постепенно накапливается и приводит к значительному усилению вязкости [2, 3]. Использование ультразвука стимулирует эффект расслаивания, способствуя значительному уменьшению размера частиц глины и предотвращая их структурообразование. Известно, что каолинит и монтмориллонит являются глинами с небольшой площадью поверхности из-за сложности их расслаивания [4, 5]. В связи с этим их сорбционная способность ограничена, что влияет на скорость процесса флокуляции. Для увеличения площади контакта илисто-глинистой фазы и полиэлектролитов и уменьшения размера частиц предлагается использование акустических колебаний в режиме стоячей волны. Ультразвуковые волны приводят к изменению площади исходных макроскопических материалов, в результате чего образуются нанометрические хлопья, способные сохранять структуру материала.

**Цель исследования** – разработать оптимальный режим комплексного физико-химического воздействия на процесс осаждения дисперсных частиц каолинита и монтмориллонита.

### Материалы и методы исследования

Работы проводились на золотоносном месторождении артели «Бальджа», расположенном на юге Забайкальского края. Наличие мелкодисперсных илисто-гли-

нистых частиц в оборотных водах объекта исследования варьирует в пределах от 1400 до 40000 г/м<sup>3</sup> и относится к слоистым и слоисто-ленточным силикатам алюминия, железа и магния. Глинистые частицы месторождения характеризуются значительным содержанием мелких фракций (менее 5 мкм), являются трудноосаждаемыми и мелкодисперсными [6]. Минеральный состав включает каолинит в виде гексагональных пластин, монтмориллонит в форме расплывчатых аморфных микроагрегатов и небольшие количества палыгорскита. Согласно СанПиН 2.1.5.980-00 и СанПиН 2.1.3684-21, фоновая концентрация взвешенных веществ в среднем по месторождению не должна превышать 40,75 г/м<sup>3</sup> [6]. Использован коммерческий флокулянт, состоящий из анионных полиакриламидных высокомолекулярных полимеров (15×106), марка А-155 компании «Химэнерго». Флокулянт готовили в виде 0,3 масс. % раствора путем взвешивания 1,5 г сухих гранул, растворение проводили в 500 мл дистиллированной воды. Раствор постоянно перемешивали в течение 30 мин шестилопастной мешалкой при 400 об/мин, затем уменьшали до 300 об/мин и снова перемешивали в течение 2 ч, после чего полученный раствор оставляли на ночь.

Фотографии образцов были получены с помощью поляризационного микроскопа ZEISS AXIO Scope A1, работающего в режиме проходящего света, были созданы иммерсионные капли диаметром до 10 мм. Изображения были обработаны в соответствии с программой Axio Vision Rel 4.8. С помощью ротационного вискозиметра BGD 152/2S и концентрационного фотоэлектрического фотометра КФК-3-01 (ЗОМЗ), работающего в режиме мутномера в диапазоне волн 315-650 нм изучались вязкостные характеристики объекта и его оптическая плотность. Изучена электрофоретическая подвижность частиц, проведен химический и аналитический анализ, разработан полупромышленная ультразвуковая установка. В основу установки вошел генератор низких частот, вольтметр с усилителем сигналов, магнитострикционный преобразователь с волноводом. Использовался режим ждущей развертки на осциллографе для поддержания стоячей волны, флокулянт подавался в систему через дозатор, полученный продукт отводился в специализированную камеру.

**Результаты исследования  
и их обсуждение**

Обработка ультразвуком в режиме стоячих волн не вызывает аморфизации частиц глины и дополнительно влияет на усиление специфических сдвигов между соседними слоями с последующим увеличением доли случайных перемещений между ними [7]. Время ультразвуковой обработки дисперсных систем монтмориллонита и каолинита для достижения FUC 82,75 % составило

3,5 мин. Без ультразвукового- воздействия на систему показатель свободной флокуляции (FUC) составляет 5,78 %. Ультразвуковая стоячая волна с частотой 25–30 кГц расщепляет полимерные цепочки флокулянта на более короткие фрагменты и способствует дополнительному выделению воды из концентрата. Зависимость скорости осаждения от концентрации флокулянтов без озвучивания системы и при воздействии ультразвука показана на рис. 1.

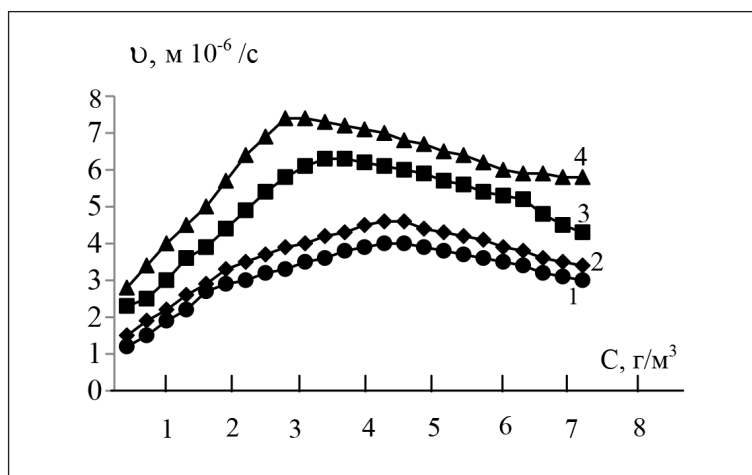


Рис. 1. Зависимость скорости седиментации глинистых частиц от концентрации полиэлектролита; 1 – каолинит без ультразвука, 2 – монтмориллонит без ультразвука, 3 – каолинит с ультразвуком, 4 – монтмориллонит с ультразвуком  
Примечание: составлен авторами по результатам фотоколориметрического исследования на фотометре КФК-3-01 (ЗОМЗ)

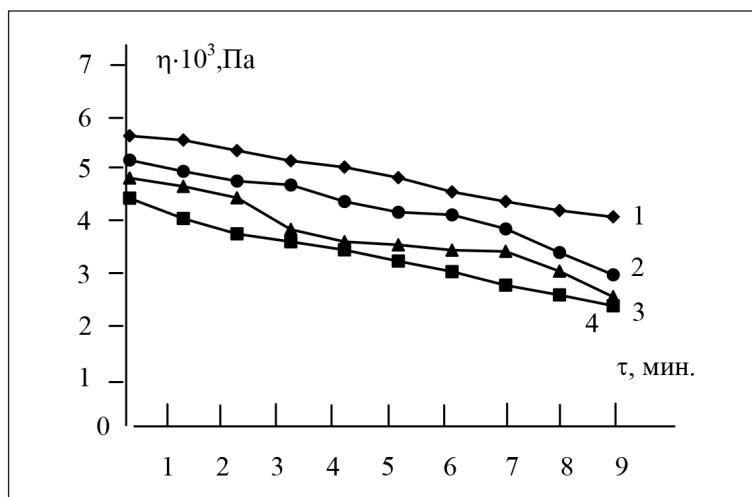


Рис. 2. Зависимость изменения динамической вязкости от времени ультразвуковой обработки дисперсной среды: 1 – каолинит без флокулянта, 2 – монтмориллонит без флокулянта, 3 – каолинит с флокулянтом, 4 – монтмориллонит с флокулянтом  
Примечание: составлен авторами по результатам определения вязкости на ротационном вискозиметре BGD 152/2S

Наблюдается увеличение скорости сорбции дисперсий при уменьшении концентрации полимера. Детальные исследования водных дисперсий монтмориллонита и каолинита под воздействием ультразвука [6, 7] показали, что короткое время обработки ультразвуком ( $< 7,5$  мин при частоте 20 кГц) разрушает естественные агрегаты глинистых минералов, улучшая их дисперсность и повышая стабильность суспензий за счет образования новой коагуляционной структуры с увеличенной сорбционной поверхностью. Ультразвуковые стоячие волны индуцируют колебательный процесс, за счет которого молекулы воды мигрируют в поры глинистых частиц. Наблюдаемое латеральное смещение слоев кристаллической решетки дополнительно увеличивает расширение адсорбционной поверхности для взаимодействия с полимером [8]. Данные процессы способствуют изменению не только вязкости системы, но и влияют на  $\xi$ -потенциал дисперсий (рис. 2).

Определен эффективный режим работы ультразвуковой установки в диапазоне 24–27 кГц. Скорость осаждения суспензий на различных частотах ультразвуковой волны показана на рис. 3. Комплексное воздействие на дисперсии ультразвуком и флокулянтами дало максимальный эффект осветления в течение 3–7 мин. Оптимальная концентрация флокулянтов не должна превышать 4–5 г/м<sup>3</sup>. На рис. 4 показаны данные с нефелометра, позволяющие сделать вывод о значительном осветлении оборотных вод (более 89 %) при минимальном добавлении

флокулянта. Выбранный режим ультразвукового воздействия формирует крупные и тяжелые флокулы, что значительно ускоряет процесс их осаждения. Кроме того, стоячие волны изменяют конформацию флокулянта, способствуя разматыванию молекулы полимера и появлению дополнительных активных центров для адсорбции глинистых частиц [9, 10]. Наблюдаемое уменьшение вязкостных характеристик системы обусловлено небольшой концентрацией флокулянта с сохранением адсорбционных свойств за счет появления новых активных центров. Акустическое поле, распространяемое ультразвуком, образует более крупные и рыхлые хлопья, что объясняет процесс ускорения осаждения при озвучивании системы. Изучаемая система состоит из кварцевых зерен, окруженных глинистыми чешуйками.

Наличие коагуляционных контактов между зернами обусловлено глинистыми мостиками (коагуляционная связь). Волновые колебания разрушают структуру коагуляционных мостиков, тем самым способствуют более полному контакту флокулянта с поверхностью глины, образуя крупные хлопьевидные осадки [10]. На рис. 5 показана зависимость размера и рыхлости полученных флокул до и после акустических колебаний. Минералы монтмориллонитовой глины образуются в более крупные агрегаты, чем каолин. Возникающие в результате ортокинетические столкновения частиц, турбулентные потоки и повышенный капиллярный эффект способствуют дополнительной конвергенции и агрегации.

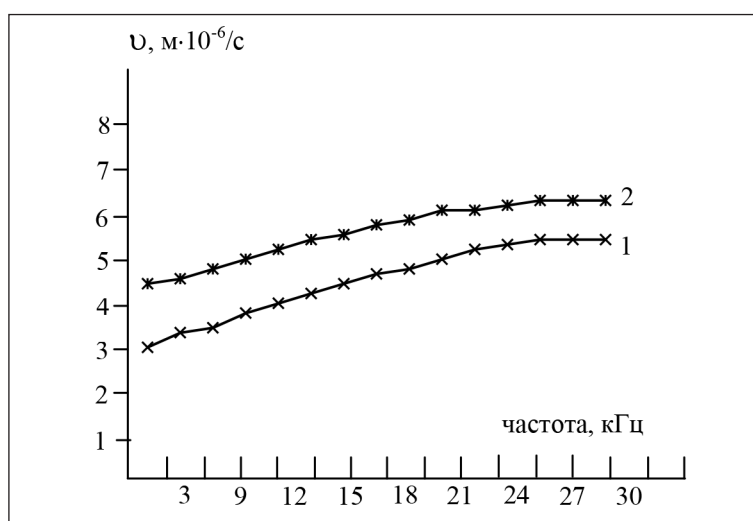


Рис. 3. Зависимость скорости седиментации глинистых частиц от частоты УЗ:

1 – каолинит с флокулянтами, 2 – монтмориллонит с флокулянтами

Примечание: составлен авторами по результатам фотокolorиметрического исследования на фотометре КФК-3-01 (ЗОМЗ)

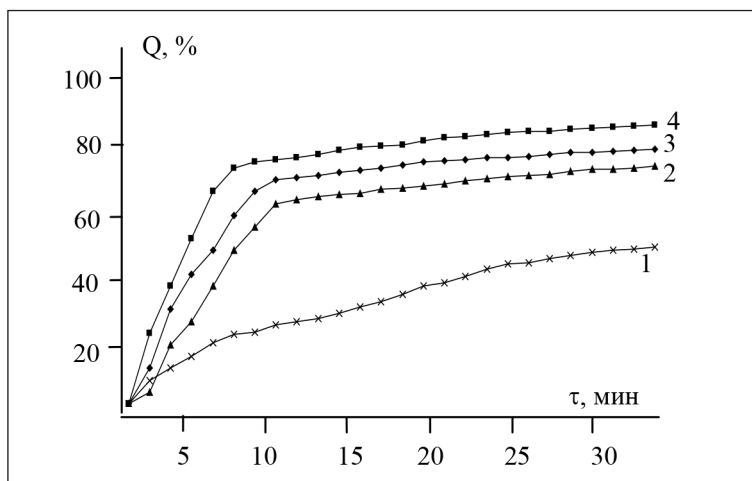


Рис. 4. Зависимость степени осветления от времени УЗ: 1 – каолинит без флокулянта, 2 – монтмориллонит без флокулянта, 3 – каолинит в комплексе с флокулянтом, 4 – монтмориллонит в комплексе с флокулянтом  
Примечание: составлен авторами по результатам фотоколориметрического исследования на фотометре КФК-3-01

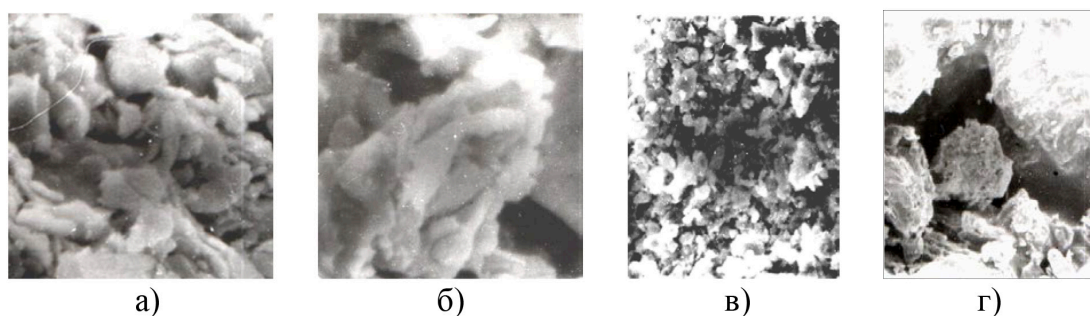


Рис. 5. Электронные фотографии флокулов, образованных: а) монтмориллонит с полиэлектролитом без ультразвука; б) монтмориллонит с полиэлектролитом после воздействия ультразвука; в) каолинит с полиэлектролитом без ультразвука; г) каолинит с полиэлектролитом после воздействия ультразвука  
Примечание: составлен авторами по результатам съемок на поляризационном микроскопе ZEISS AXIO Scope A1

Хлопьевидная структура без обработки ультразвуком однородна и регулярна, отсутствуют выраженные трещины, нет крупных агрегатов, между цепочками флокулянта образовалась структура «ячеистой сети». После обработки УЗ в микроструктурах наблюдаются глубокие отверстия и длинные трещины, появляются крупные зерна. Частицы глины в дисперсном состоянии в поле ультразвука изменяют  $\xi$ -потенциал. Согласно [11, 12], частицы монтмориллонита из-за нарушения агрегатной стабильности снижают значение  $\xi$ -потенциала активнее, чем образцы каолинита, что способствует увеличению скорости осаждения дисперсий. Образование двойного электрического слоя на поверхности

твердое тело – жидкость определяет ход электрокинетических процессов. Глинистые минералы монтмориллонитовой группы, обладающие довольно выраженными ионообменными свойствами, обладают повышенной адсорбционной способностью. Исследование зависимости величины  $\xi$ -потенциала от времени озвучивания дисперсии подтвердило оптимальное значение интервала экспозиции в 3–5 мин. При этом наблюдается уменьшение значений потенциала, увеличение скорости относительного перемещения дисперсной фазы относительно дисперсионной среды, возрастает устойчивость потоков к разрушению дисперсных систем. Стоячие волны способствуют резонансному движению взвешенных дисперс-

ных частиц относительно самой жидкости и дополнительно создают зоны их концентрации [13]. Пространственное разделение компонентов в суспензии, находящейся в ультразвуковом поле, четко определено. Миграция макромолекул полимеров энергетически выгодна в зоны пучности давления, что приводит к отсутствию флокулянтов в зоны пучностей скоростей (неустойчивая зона). За счет рэлеевских течений в области повышенного давления рвутся цепочки полимера. За счет микропотоков дисперсные частицы сталкиваются и укрупняются, что приводит к созданию коагуляционных контактов между ними [7, 14]. Перемещение частиц в ультразвуковом поле вызвано не только разрушением коагуляционных структур. Наблюдаемая деформация флокулянтов за счет механических напряжений изменяет течение микропотоков. Под действием кумулятивных струй диспергированная глинистая частица сближается с полимером, при этом формируются новые молекулярные мостики, способствующие их агрегации. Получение более плотного сфлуктурированного продукта приводит к уменьшению используемого полимера и увеличению скорости оседания хлопьев [15, 16]. УЗ вызывают перестройку структуры коагуляции, что влияет на увеличение поверхности свободной энергии. Происходит изменение силы молекулярного взаимодействия и ускорение процесса слипания частиц в более крупные хлопья.

### Заключение

Разработаны параметры интенсификации процесса флокуляции в условиях работы с мелкодисперсными фракциями илисто-глинистых отложений в прудах-осветлителях при не-возможности сбрасывать технические воды в природные объекты. Рабочие параметры полу-промышленной установки составили: эффективная частота  $\approx 30$  кГц, интенсивность  $1 \times 10^4$  Вт/м<sup>2</sup>, время акустического воздействия 6–7 мин. За счет снижения количества используемых флокулянтов, времени осветления оборотных вод от мелкодисперсных фракций, снижения общей вязкости водных систем, формирования более плотных и крупных хлопьев можно добиться существенного снижения экономических затрат. Наблюдаемое ускорение седиментационного процесса позволит достичь необходимого минимума коллоидных взвесей в сбрасываемых в природные объекты сточных вод из отстойников по нормам СанПиН 2.1.5.980-00 и СанПиН 2.1.3684-21. Рассмотрен механизм действия

ультразвуковых колебаний в режиме стоячих волн на пограничные слои дисперсных глинистых частиц в комплексе с анионными флокулянтами. Используя полученные данные по изменению дзета-потенциалов, размеров полученных после обработки хлопьев, снижению вязкостных характеристик, уменьшению количества связанной воды, можно сделать предварительные выводы о влиянии акустических воздействий на адсорбционные процессы и изменения в диффузионном слое. Наблюдаемое разрушение межмолекулярных связей в водной дисперсной системе приводит к формированию молекулярных мостиков и дополнительной агрегации. Показана возможность математического моделирования процесса седиментации на основании полученных параболических зависимостей скоростей осаждения сфлуктурированного осадка от параметров работы ультразвуковой установки для достижения FUC не менее 80 %. Планируется модернизировать ультразвуковую установку до промышленного образца, сделав основной акцент на ее энергоэффективности. Так же необходимо оптимизировать процесс седиментации не только для отдельных образцов монтмориллонитовых и каолиновых дисперсий, но и для смешанных систем с различным соотношением глинистых и силикатных частиц. Предложенная рабочая схема очистки сточных и оборотных вод золотодобывающих предприятий позволяет получить приемлемые результаты при сравнительно небольших экономических затратах на модернизацию процесса.

### Список литературы

1. Гурман М. А. Флокуляция взвесей технологической воды россыпного месторождения золота // ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 12–1. С. 76–84. URL: <https://www.giab-online.ru/catalog/archives/gornyy-informacionno-analiticheskiy-byulleten-12-1-2021/view> (дата обращения: 12.03.2026). DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_121\_0\_76.
2. Ali W., Chassagne C. Comparison between two analytical models to study the flocculation of mineral clay by polyelectrolytes // *Continental Shelf Research*, 2022. Vol. 250. Art. 104864. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0278434322002175?via%3Dihub> (дата обращения: 18.03.2026). DOI: 10.1016/j.csr.2022.104864.
3. Aref Abbasi Moud Polymer based flocculants: Review of water purification applications // *Journal of Water Process Engineering*. 2022. Vol. 48. Art. 102938. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214714422003828?via%3Dihub>. (дата обращения: 08.03.2026). DOI: 10.1016/j.jwpe.2022.102938.
4. Ульрих Е. В., Баркова А. С. Использование флокулянтов для очистки сточных вод // *Трансформация экосистем*. 2023. Т. 6. № 1. С. 168–187. DOI: 10.23859/estr-220525. URL: <https://en.ecosysttrans.com/publikatsii/ecosystem-transformation-volume-6-no-1-2023/use-of-flocculants-for-wastewater-treatment/> (дата обращения: 18.02.2026).

5. Castillo C., Fawell P., Costine A. Optimising the activity of acrylamide-based polymer so-lutions used to flocculate mineral processing tailings suspensions // *Chemical Engineering Research and Design*. 2023. Vol. 199. P. 214–237. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263876223006135?via%3Dihub> (дата обращения: 15.03.2026). DOI: 10.1016/j.cherd.2023.10.001.
6. Тютрина С. В. Влияние ультразвука на процесс флокуляции тонкодисперсных минеральных систем при очистке сточных и оборотных вод: дис. ... канд. техн. наук. Чита, 2004. 166 с. URL: <https://www.disscat.com/content/vliyanie-ultrazvuka-na-protsess-flokulyatsii-tonkodispersnykh-mineralnykh-sistem-pri-ochistke> (дата обращения: 17.02.2026).
7. Meribout M. On using ultrasonic-assisted Enhanced Oil Recovery (EOR): recent practical achievements and future prospects // *IEEE Access*. 2018. Vol. 6. P. 51110–51118. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8432426> (дата обращения: 16.02.2026). DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2859774.
8. Лавриненко А. А., Гольберг Г. Ю. Современное состояние и направления совершенствования процессов разделения суспензий продуктов обогащения углей с применением флокулянтов // *Вестник МГТУ им. Г. И. Носова*. 2024. Т. 22. № 2. С. 58–70. URL: <https://vestnik.mgtu.ru/en/118-archive/no-2-2024/1576-58.html> (дата обращения: 15.02.2026). DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-2-58-70.
9. Zhu L., Lyu W., Yang P., Wang Z. Effect of ultrasound on the flocculation-sedimentation and thickening of unclassified tailings // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2020. Vol. 66. Art. 104984. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350417719315986?via%3Dihub> (дата обращения: 06.03.2026). DOI: 10.1016/j.ultsonch.2020.104984.
10. Аверкина Е. В., Шакирова Э. В., Бутакова Л. А. Влияние реагентов-флокулянтов на параметры глинистых суспензий // *Разведка и разработка месторождений полезных ископаемых*. 2020. Т. 43. № 2. С. 230–241. URL: <https://www.nznj.ru/jour/article/view/106> (дата обращения: 02.03.2026). DOI: 10.21285/2686-9993-2020-43-2-230-241.
11. Rezaei A., Abdollahi H., Gharabaghi M., Mohammadzadeh A. A. Effects of Flocculant, Surfactant, Coagulant, and Filter Aid on Efficiency of Filtration Processing of Copper Concentrate: Mechanism and Optimization // *Journal of Mining and Environment*. 2020. Vol. 11. Is. 1. P. 119–141. URL: <https://www.scopus.com/pages/publications/85092167120> (дата обращения: 02.03.2026). DOI: 10.22044/jme.2019.8692.1753.
12. Khazaie A., Mazarji M., Samali B., Osborne D., Minkina T., Sushkova S., Mandzhieva S., Soldatov A. A. A Review on Coagulation/Flocculation in Dewatering of Coal Slurry // *Water*. 2022. Vol. 14. Is. 6. P. 918. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4441/14/6/918> (дата обращения: 22.03.2026). DOI: 10.3390/w14060918.
13. Xinlei Zhu, Linglu Jiang, Wentao Huang Evaluation an anionic polyacrylamide flocculant with microblock structure in the hematite wastewater treatment: Characterization and flocculation performance // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2024. Vol. 693. Art. 134072. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0927775724009336?via%3Dihub> (дата обращения: 08.03.2026). DOI: 10.1016/j.colsurfa.2024.134072.
14. Yijiang Li, Yuting Chen, Shixin Zhang, et al. Filtration of kaolinite and coal mixture suspension: Settling behavior and filter cake structure analysis // *Powder Technology*. 2021. Vol. 381. P. 122–128. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0032591020312171?via%3Dihub> (дата обращения: 08.03.2026). DOI: 10.1016/j.powtec.2020.12.050.
15. Nguyen C. V., Nguyen A. V., Doi A., Dinh E., Nguyen T. V., Ejtemaei M., Osborne D. Advanced solid-liquid separation for dewatering fine coal tailings by combining chemical reagents and solid bowl centrifugation // *Separation and Purification Technology*. 2021. Vol. 259. Art. 118172. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1383586620326459?via%3Dihub> (дата обращения: 28.03.2026). DOI: 10.1016/J.SEP-PUR.2020.118172.
16. Лавриненко А. А., Гольберг Г. Ю. Состояние процессов сгущения и обезвоживания отходов флотации углей // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова*. 2023. Т. 21. № 3. С. 27–41. URL: [https://vestnik.mgtu.ru/images/data\\_base/2023\\_3/27-41.pdf](https://vestnik.mgtu.ru/images/data_base/2023_3/27-41.pdf) (дата обращения: 05.03.2026). DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-3-27-41.

**Конфликт интересов:** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Conflict of interest:** The authors declare that there is no conflict of interest.

**Финансирование:** Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

**Financing:** The research was performed without external funding.