

9(150)

Андрей Александрович Попов (1821, Санкт-Петербург — 1898, Санкт-Петербург) — русский флотоводец, кораблестроитель, адмирал (1891 год). Его имя носит корабль Черноморского флота — эскадренный миноносец «Попов» рядом с Владивостоком. Родился 22 сентября (4 октября) 1821 года в Санкт-Петербурге в семье известного кораблестроителя, управляющего Охтинской верфью Александра Андреевича Попова.

С 1830 года учился на морском отделении Александровского корпуса; в 1838 году окончил Морской кадетский корпус с присвоением чина мичмана и зачислением в 32-й флотский экипаж (Черноморский флот).

был командиром парохода «Метеор» (вспомогательного крейсера Черноморского флота). В 1853 году был командирован в Константинополь для сбора сведений о вооружении Босфора и близлежащих к нему укрепленных мест по Чёрному морю и Дунаю до Рущука. Участвовал в Крымской кампании. В 1853—1854 годах командовал пароходами «Эльбрус», «Андия», «Турок», потопил шесть турецких транспортов; в сентябре 1854 года командовал в чине капитан-лейтенанта пароходом «Тамань», прорвался из блокированного Севастополя в Одессу и вернулся обратно с грузом для оборонявшихся.

Руководил установкой морских орудий на укреплениях Севастополя и артиллерийским снабжением. Руководил снаряжением двух брандеров. Руководил созданием бона для преграждения севастопольского рейда. За боевые заслуги в этот период — награждён двумя орденами.

Произведен в капитаны 1-го ранга; с 1855 — флигель-адъютант. В 1855 году был командирован с театра военных действий в Кронштадт, Выборг, Свеаборг и другие укрепленные порты побережья Балтийского моря. В период 1856—1858 годов был начальником штаба Кронштадтского порта.

В 1858—1861 гг. — командующий отрядом из двух корветов («Рында» и «Гридень») и клипера «Офрингем» (2-й Амурский отряд), привел его из Кронштадта в Японское море, затем ходил у берегов Японии, исследовал побережья русского Приморья (одна из заливов — у 45-й параллели — был назван в честь корвета Попова «Рында»). В 1859 году кораблями отряда командованием нанесли визит в порт Сан-Франциско.

В 1861 году был произведен в контр-адмиралы с назначением в Свиту[2]. Избран членом Комитета Кораблестроительного и Морского Училищ, участвовал в работе по введению переделки парусных судов. Совершил плавание к берегам Японии. В 1861 году был назначен командиром отряда судов Балтийского флота (Первая эскадра). В 1862 году был произведен в вице-адмиралы. В 1863 году был назначен командиром отряда судов Балтийского флота (Вторая эскадра). В 1864 году был назначен командиром отряда судов Балтийского флота (Третья эскадра). В 1865 году был назначен командиром отряда судов Балтийского флота (Четвертая эскадра). В 1866 году был назначен командиром отряда судов Балтийского флота (Пятая эскадра). В 1867 году был назначен командиром отряда судов Балтийского флота (Шестая эскадра). В 1868 году был назначен командиром отряда судов Балтийского флота (Седьмая эскадра). В 1869 году был назначен командиром отряда судов Балтийского флота (Восьмая эскадра). В 1870 году был назначен командиром отряда судов Балтийского флота (Девятая эскадра). В 1871 году был назначен командиром отряда судов Балтийского флота (Десятая эскадра). В 1872 году был назначен командиром отряда судов Балтийского флота (Одиннадцатая эскадра). В 1873 году был назначен командиром отряда судов Балтийского флота (Двадцатая эскадра). В 1874 году был назначен командиром отряда судов Балтийского флота (Тридцатая эскадра). В 1875 году был назначен командиром отряда судов Балтийского флота (Сорок эскадра). В 1876 году был назначен командиром отряда судов Балтийского флота (Пятьдесят эскадра). В 1877 году был назначен командиром отряда судов Балтийского флота (Шестьдесят эскадра). В 1878 году был назначен командиром отряда судов Балтийского флота (Семьдесят эскадра). В 1879 году был назначен командиром отряда судов Балтийского флота (Восемьдесят эскадра). В 1880 году был назначен командиром отряда судов Балтийского флота (Девяносто эскадра). В 1881 году был назначен командиром отряда судов Балтийского флота (Сто эскадра). В 1882 году был назначен командиром отряда судов Балтийского флота (Сто десять эскадра). В 1883 году был назначен командиром отряда судов Балтийского флота (Сто двадцать эскадра). В 1884 году был назначен командиром отряда судов Балтийского флота (Сто сорок эскадра). В 1885 году был назначен командиром отряда судов Балтийского флота (Сто шестьдесят эскадра). В 1886 году был назначен командиром отряда судов Балтийского флота (Сто восемьдесят эскадра). В 1887 году был назначен командиром отряда судов Балтийского флота (Сто девяносто эскадра). В 1888 году был назначен командиром отряда судов Балтийского флота (Двадцать эскадра). В 1889 году был назначен командиром отряда судов Балтийского флота (Тридцать эскадра). В 1890 году был назначен командиром отряда судов Балтийского флота (Сорок эскадра). В 1891 году был назначен командиром отряда судов Балтийского флота (Пятьдесят эскадра). В 1892 году был назначен командиром отряда судов Балтийского флота (Шестьдесят эскадра). В 1893 году был назначен командиром отряда судов Балтийского флота (Семьдесят эскадра). В 1894 году был назначен командиром отряда судов Балтийского флота (Восемьдесят эскадра). В 1895 году был назначен командиром отряда судов Балтийского флота (Девяносто эскадра). В 1896 году был назначен командиром отряда судов Балтийского флота (Сто эскадра). В 1897 году был назначен командиром отряда судов Балтийского флота (Сто десять эскадра). В 1898 году был назначен командиром отряда судов Балтийского флота (Сто двадцать эскадра).

205 ЛЕТ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ
21 сентября 2026 г.

ПОПОВ
АНДРЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ
1821-1898 гг.



UNIVERSUM: ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Научный журнал

Издается ежемесячно с ноября 2013 года

Выпуск: 9(150)

Сентябрь 2026 г.

Часть 2

Новосибирск
2026

ББК 3
U55

Главный редактор журнала:

Звездина Марина Юрьевна – д-р физ.-мат. наук, доц.

Редакционная коллегия:

Абдуллин Тимур Зуфарович – канд. техн. наук;

Гасумов Рамиз Алиевич – д-р техн. наук, проф.;

Деев Владислав Борисович – д-р техн. наук, проф.;

Кокишаров Сергей Александрович – д-р техн. наук, проф.;

Колесников Александр Сергеевич – канд. техн. наук;

Мажидов Кахрамон Халимович – д-р хим. наук, проф.;

Манасян Сергей Керопович – д-р техн. наук, проф.;

Мартышкин Алексей Иванович – канд. техн. наук, доц.;

Мерганов Аваз Мирсултанович – канд. техн. наук (PhD);

Немирова Любовь Федоровна – канд. техн. наук, доц.;

Полтавец Валерий Васильевич – д-р техн. наук, доц.;

Радкевич Мария Викторовна – д-р техн. наук, проф.;

Старченко Ирина Борисовна – д-р техн. наук, проф.;

Тимухина Елена Николаевна – д-р техн. наук, проф.;

Усманов Хайрулла Сайдуллаевич – д-р техн. наук, проф.;

Фозилов Садриддин Файзуллаевич – д-р техн. наук, проф.;

Шайтура Сергей Владимирович – канд. техн. наук, доц.;

Яронова Наталья Валерьевна – канд. техн. наук, доц.

U55 Universum: технические науки : электронный научный журнал. — № 9(150). — Часть 2. — Новосибирск : Изд-во «Юниверсум», 2026. — 84 с. — Текст : электронный. — URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/category/9150> (дата публикации: 28.09.2026).

ISSN 2311-5122

DOI: 10.32743/UniTech.2026.150.9

Учредитель и издатель: ООО «Юниверсум»

© ООО «Юниверсум», 2026 г.

Содержание

Статьи на русском языке

Промышленность и производство

Химические технологии и химическая промышленность

- Разработка технологии антибактериальных покрытий для керамических изделий на основе наночастиц серебра** 4
Арипова Мастура Хикматовна
Яхьяев Умар Абдихакимович
- Разработка кондиционных составов и исследование физико-химических свойств композиционных химических флотореагентов -вспенивателей на основе органо-неорганических ингредиентов с использованием местного сырья и отходов производств** 21
Негматов Жахонгир Носир угли
Хурсанов Абдулла Халмурадович
Негматова Комила Сайибжановна
Абед Нодира Сайибжановна
Икрамова Мукаддас Эралиевна
Бозоров Дамир
Курбонов Урал Меликулович
Негматов Сойибжон Садиикович
- Синтез многофункционального композитного сорбента-коагулянта на основе шафирканского бентонита и биоугля стеблей хлопчатника и механизм очистки сточных вод** 36
Раззақов Ҳасан Қаландарович
Аскарова Гулчирой Ахрор кизи
- Синтез метилольных производных сульфаниламида и изучение влияющих факторов** 48
Рамазонов Бахром Гафурович
Каландарова Замира Давроновна
Гафуров Собир Бахром угли
- Доочистка нефтесодержащих сточных вод древесными активированными углями, содержащими соединения железа и цинка** 57
Умматов Обиджон Олимжон угли
Очилов Голиб Мамаюнусович
Матмусаев Абдумуталиб Каххоржон угли
Эшметов Иззат Дусимбатович
- Регулирование с помощью добавок сроков схватывания и реологических свойств огнеупорных алюмохромофосфатных клеевых композиций** 65
Шамадинова Наргис Эркиновна
Шарафутдинова Нозима Пулатовна
Ганиева Сайера Хуришовна
- Влияние числа пластин и диаметра портов на распределение теплоносителя в пластинчатом теплообменнике** 73
Юсупова Надира Кайпбаевна
Сарсенбаев Нурлан Тенелбаевич

СТАТЬИ НА РУССКОМ ЯЗЫКЕ

ПРОМЫШЛЕННОСТЬ И ПРОИЗВОДСТВО

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ХИМИЧЕСКАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

Статья поступила в редакцию: 14.08.2026

Статья принята к публикации: 28.08.2026

Статья опубликована: 28.09.2026

УДК 666.3+620.22+54.61

Разработка технологии антибактериальных покрытий для керамических изделий на основе наночастиц серебра

Арипова Мастура Хикматовна

д-р техн. наук, проф.

зав. кафедрой Технология силикатных материалов и редких, благородных металлов,

Ташкентский химико-технологический институт

Республика Узбекистан, г. Ташкент

E-mail: aripova1957@yandex.com

Яхьяев Умар Абдихакимович

ст. преп. кафедры

Технология силикатных материалов и редких и благородных металлов, Ташкентский химико-

технологический институт

Республика Узбекистан, г. Ташкент

E-mail: yaxyoyevumar0@gmail.com

Development of antibacterial coating technology for ceramic products based on silver nanoparticles

Aripova Mastura Khikmatovna

doctor of Technical Sciences, Professor

Head of the Department of Technology of Silicate Materials and Rare and Noble Metals, Tashkent

Institute of Chemical Technology

Republic of Uzbekistan, Tashkent

Yakhyaev Umar Abdikhamovich

senior Lecturer

at the Department of Technology of Silicate Materials and Rare and Noble Metals, Tashkent

Institute of Chemical Technology

Republic of Uzbekistan, Tashkent

Аннотация

В настоящем исследовании разработана технология получения антибактериальных покрытий на поверхности керамических изделий на основе наночастиц серебра, синтезированных электрохимическим методом из отходов электротехнической промышленности. В качестве антибактериального компонента использовали наночастицы серебра, полученные методом электролиза. В ходе исследования изучены закономерности устойчивого диспергирования наночастиц серебра в составе глазури, сохранения их структурной стабильности в процессе обжига, а также особенности нанесения наносuspensions методом распыления на поверхность керамических изделий и формирования прочного антибактериального покрытия после термической обработки. Подготовленные образцы обжигали при температуре 700–900 °С. Фазовый состав и морфологию полученных покрытий исследовали методами рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) и трансмиссионной электронной микроскопии (ТЭМ). Результаты исследования показали, что содержание наночастиц серебра и режимы термической обработки оказывают непосредственное влияние на эффективность антибактериального покрытия. В частности, покрытия, полученные при оптимальном составе и температуре обжига, продемонстрировали высокую антибактериальную активность и эффективно подавляли рост бактерий. Также установлено, что полученные покрытия характеризуются высокой адгезией к поверхности керамических изделий, достаточной механической прочностью, а также высокой химической и термической стойкостью.

Abstract

In the present study, a technology was developed for producing antibacterial coatings on the surface of ceramic products using silver nanoparticles synthesized electrochemically from waste generated by the electrical engineering industry. Silver nanoparticles obtained by electrolysis were used as the antibacterial component. The study investigated the conditions required for the stable

Библиографическое описание: Арипова М.Х., Яхьяев У.А. Разработка технологии антибактериальных покрытий для керамических изделий на основе наночастиц серебра // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 9(150). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23373>

dispersion of silver nanoparticles within the glaze, the preservation of their structural stability during firing, as well as the characteristics of applying the nanosuspension to the surface of ceramic products by spraying and the formation of a durable antibacterial coating after thermal treatment. The prepared samples were fired at temperatures ranging from 700 to 900 °C. The phase composition and morphology of the resulting coatings were investigated using X-ray fluorescence analysis (XRF) and transmission electron microscopy (TEM). The results showed that the silver nanoparticle content and thermal treatment conditions have a direct effect on the performance of the antibacterial coating. In particular, coatings obtained at the optimum composition and firing temperature exhibited high antibacterial activity and effectively inhibited bacterial growth. It was also established that the resulting coatings exhibited high adhesion to the surface of the ceramic products, sufficient mechanical strength, as well as high chemical and thermal resistance.

Ключевые слова: наночастицы серебра, антибактериальное покрытие, керамика, глазурь, наносуспензия, электролиз, термическая обработка.

Keywords: silver nanoparticles, antibacterial coating, ceramics, glaze, nanosuspension, electrolysis, thermal treatment.

Благодарности и финансирование: Выражаем искреннюю благодарность коллективу лаборатории факультета химической технологии неорганических веществ Ташкентского химико-технологического института за оказанную помощь и содействие в проведении исследований и получении результатов, представленных в данной статье.

Acknowledgements and Funding: We express our sincere gratitude to the laboratory team of the Faculty of Chemical Technology of Inorganic Substances at the Tashkent Institute of Chemical Technology for their valuable assistance and support in conducting the research and obtaining the results presented in this article.

Введение

Современное технологическое развитие сопровождается увеличением объёмов производства различных видов продукции, что приводит к усилению антропогенного воздействия на окружающую среду. В частности, наблюдаются выбросы пыли и газов в атмосферу, накопление отработанных электротехнических отходов, нарушение экологического равновесия, изменение климата, рост сезонной заболеваемости и появление новых штаммов вирусов [5].

Резистентность к антибиотикам является одной из наиболее актуальных проблем современного мирового здравоохранения. Результаты исследований показали, что около 79 % бактерий устойчивы к одному или нескольким антибиотикам, что приводит к значительному увеличению смертности, развитию осложнений и росту затрат на здравоохранение. Загрязнение больниц, предприятий пищевой промышленности и промышленных объектов патогенными микроорганизмами вызывает серьёзную обеспокоенность. В связи с этим особое значение приобретает внедрение эффективных профилактических и защитных мер.

Высокая распространённость патогенных микроорганизмов, особенно среди детей, способствует развитию инфекционных заболеваний, ухудшению состояния здоровья и снижению качества жизни населения [1].

В связи с ростом численности населения увеличивается количество посетителей в залах ожидания медицинских учреждений, что способствует распространению инфекций, передающихся воздушно-капельным путём [2]. Для снижения указанных негативных последствий одним из перспективных направлений является расширение применения керамических материалов, обладающих гигиеническими и антибактериальными свойствами, не только в строительстве, но и в медицине, пищевой промышленности и санитарно-гигиенической сфере [11].

Однако даже гладкая поверхность керамических изделий остаётся восприимчивой к микробному загрязнению. В связи с этим нанесение антибактериальных покрытий на поверхность керамических изделий является одной из актуальных научно-технических задач [10].

Последние достижения в области нанотехнологий существенно изменили подходы к диагностике, лечению и профилактике различных заболеваний [3]. Антибактериальные покрытия играют важную роль в медицинских учреждениях в качестве эффективного средства предотвращения распространения патогенных микроорганизмов и разрыва цепи передачи инфекций [9].

Наночастицы серебра (Ag) обладают уникальными биомедицинскими свойствами и находят широкое применение в различных областях медицины. Кроме того, они характеризуются высокой антибактериальной активностью по сравнению с наночастицами многих других металлов [4]. Наночастицы серебра способны подавлять метаболическую активность микроорганизмов и вызывать гибель бактериальных клеток. Благодаря этим свойствам они широко применяются в качестве эффективного антибактериального компонента [7].

Наночастицы Ag обладают широким спектром антибактериальной активности, а их нанесение на керамическую поверхность позволяет эффективно подавлять рост микроорганизмов [8]. Наночастицы Ag размером 20–25 нм характеризуются большой удельной площадью поверхности, что усиливает их взаимодействие с микроорганизмами и способствует значительному повышению антибактериальной эффективности. Кроме того, температурные характеристики плавления наночастиц Ag были изучены рядом исследователей [6]; соответствующие данные представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Зависимость температуры плавления наночастиц Ag от их размера

№	Авторы	Размер (нм)	Температура плавления °C
1	Цзяньлей Цюй, Луцзинь Янь, Янь Ван	3	542
2	Мин Фэй Гу, Тинтин Лю, Синьци Хао.	5,10,20	663,841,886.
3	Майкл А. Асоро, Даниэль Ковар, Джозеф Джозеф Дамиано, Пауло Дж., Феррейра.	5,10,15,20,25,30,50.	480,520,560,600, 627,652,960
4	Хасан А. Аларифи, Мустафа Атис.	4,6,8,9,12.	602,487,794,827,847.

Материалы и методы

Размер, форма и удельная площадь поверхности наночастиц являются основными факторами, определяющими их антибактериальные свойства. Температура плавления наночастиц Ag изменяется в зависимости от их размера.

На первом этапе в качестве растворителя для переработки электротехнических отходов использовали азотную кислоту (HNO_3). Содержащийся в полученном растворе нитрат серебра (AgNO_3) осаждали в виде хлорида серебра (AgCl) с использованием соляной кислоты (HCl). Полученный AgCl очищали, после чего методом цементации железом восстанавливали серебро с получением порошка, из которого изготавливали чистый серебряный анод.

При электрохимическом синтезе в качестве анода использовали серебро (Ag), в качестве катода платину (Pt), а в качестве электролита деионизированную воду. Для регулирования окислительно-восстановительных процессов и поддержания необходимого значения pH в электролит добавляли азотную кислоту (HNO_3).

Для предотвращения агрегации наночастиц Ag использовали поливинилпирролидон (ПВП) и (ПВС). В процессе электролиза рабочие поверхности катода и анода имели коническую форму. С целью предотвращения агрегации наночастиц и интенсификации массопереноса ионов электроды вращали со скоростью 300–400 об/мин. Для обеспечения непрерывной циркуляции электролита дополнительно использовали перистальтический насос.

При pH = 3, температуре 50–60 °C, плотности тока 1–5 мА/см², расстоянии между электродами 1–2 см и продолжительности синтеза 40 мин были получены наночастицы серебра размером 20–25 нм.

Для проведения электрохимического синтеза установка СЕ 105 для исследования коррозионных процессов была конструктивно усовершенствована и оснащена дополнительными функциональными элементами.

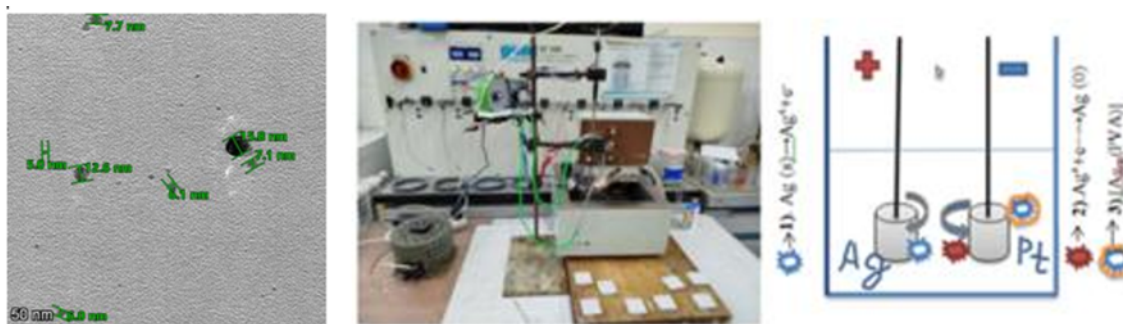


Рисунок 1. Процесс синтеза наночастиц Ag электрохимическим методом и результаты ТЭМ-анализ полученного образца. По результатам ТЭМ анализа установлено, что размер наночастиц составляет 5 – 15 нм

На следующем этапе была изучена система $\text{SiO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3\text{--CaO--MgO--K}_2\text{O--Na}_2\text{O}$ с целью определения области стеклообразования на основе местного сырья при получении фриттованной глазури. В исследуемой системе были установлены следующие предельные содержания компонентов, мас. %: 46 SiO_2 ; 15 Al_2O_3 ; 16 CaO ; 8 MgO ; 6 K_2O ; 6 Na_2O .

Шихтовые составы опытных образцов стекла, синтезированных в системе $\text{SiO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3\text{--CaO--MgO--K}_2\text{O--Na}_2\text{O}$, приведены в таблице 2.

Варку стекла осуществляли в лабораторных условиях в печи с карбидкремниевыми (SiC) нагревателями при температуре 1400 ± 10 °С с выдержкой при максимальной температуре в течение 1 ч.

Таблица 2.

Состав шихты экспериментального стекла

Название сырья	серийный номер содержимого					
	1	2	3	4	5	6
Песок	37,19	29,3	31,01	31,85	31,72	37,01
Гельглин	4,38	10,57	6,23	3,57	5,15	4,36
Микрокальцит	6,54	16,14	1,89	13,1	2,9	6,51
Кальцинированная сода	4,13	5,17	6,25	6,82	2,8	4,11
Доломит		-	28,34		8,96	
Нитрат калия	8,05	4,35	4,12	8,07	4,7	8,01

Химический состав стёкол, определённый рентгенофлуоресцентным методом, приведён в таблице 3.

Таблица 3.

Химический состав опытных стекол

Номер состава	Массовый состав, %						
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O
1	45	6,0	0,048	5,0	0,065	5,0	3,0
2	38,0	14,0	0,051	13,0	0,172	0,374	4,0
3	42,0	10,0	0,070	15,0	7,0	3,0	5,0
4	39,0	5,0	0,047	10,0	0,132	5,0	5,0
5	38,0	7,0	0,047	6,0	2,0	3,0	2,0
6	45,0	6,0	0,048	5,0	0,065	5,0	3,0

Исследована зависимость физико-химических свойств стекол, синтезированных в системе $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaO} - \text{MgO} - \text{K}_2\text{O} - \text{Na}_2\text{O}$, от их состава а также приведена их визуальная характеристика.

Таблица 4.

Технологические свойства экспериментальных составов стекла

Номер состава	Оптимальная температура обжига стекла, °С	Визуальное описание стекла	Температура кристаллизации стекланной гранулы, °С
1	1300	прозрачный и блестящий	600
2	1350	прозрачный	700
3	1350	прозрачный	800
4	1400	прозрачный	900

Номер состава	Оптимальная температура обжига стекла, °С	Визуальное описание стекла	Температура кристаллизации стеклянной гранулы, °С
5	1350	тусклый	850
6	1400	тусклый	1000

Из данных таблицы 3 видно, что стёкла составов 1, 2, 3 и 4 по сравнению с другими составами характеризуются высокой прозрачностью, при этом состав 1 отличается наиболее выраженным блеском. Наиболее низкая температура плавления глазурного покрытия также наблюдается для состава 1.

В исследовании были изучены два метода формирования антибактериальной поверхности: 1) введение приготовленной наносuspension в состав сырой глазури (фритты) с последующим нанесением глазури на поверхность изделия; 2) распыление наносuspension на поверхность готовой (обожженной) керамической плитки с последующей термической обработкой. В ходе исследования были изучены степени разбавления наносuspension водой для обеспечения её равномерного распределения по керамической поверхности. По результатам эксперимента установлено, что для формирования однородного биоцидного слоя на поверхности площадью 10 м² требуется 1 г наночастиц Ag.

Химический состав и структурные изменения покрытия были подробно изучены методами электронной микроскопии и химического анализа на примере керамических образцов, обожженных при температуре 700 – 1000 °С.

Повышение твёрдости наночастиц серебра обусловлено уменьшением размера частиц, проявлением квантового-размерного эффекта на поверхности, ограничением подвижности атомов и увеличением влияния поверхностной энергии, что способствует повышению их механической прочности.

Изучение процесса плавления стекол и их свойств позволило подобрать состав стекла для глазурования керамической плитки и получить прозрачную фритту в системах SiO₂-Al₂O₃-CaO-MgO-K₂O-Na₂O. Свойства глазури, полученной на основе разработанной фритты, представлены в таблице 5.

Таблица 5.

Структура, фазовый состав и физико-химические свойства глазури без добавления наночастиц Ag

Содержание	Фазовый состав	Структура	ГТКК x10 ⁷ , К ⁻¹	Химическая стойкость, класс	Визуальные свойства (прозрачность, блеск, цвет)
Фритта	Стекло	аморфная	67	А	прозрачный, блестящий

Таблица 6.

Свойства биоцидной глазури, содержащей оптимальное количество наночастиц Ag

Оглавление	Фазовый состав	Структура	ТКК x10 ⁷ , К ⁻¹	Химическая стойкость, класс	Визуальные свойства (прозрачность, блеск, цвет)
3	Стекло	аморфная	60	А	хриплый, желтый

В таблице 6 представлены свойства глазурного покрытия с оптимальным содержанием наночастиц Ag. Из представленных данных видно, что введение Ag в состав глазури приводит к образованию кристаллов Ag, незначительно увеличивает значение ИИТК и придаёт глазури желтоватый оттенок. По мере увеличения содержания наночастиц Ag появляются различные оттенки желтого цвета. Введение наночастиц Ag в состав глазури не оказывает влияния на её химическую стойкость.

Проведённые исследования показали, что экспериментальные составы, синтезированные в процессе термической обработки, характеризуются отсутствием видимых дефектов, достаточной вязкостью расплава и удовлетворительными технологическими свойствами. Температура плавления исследованных образцов находилась в диапазоне 900–1000 °С. В качестве оптимального был выбран состав 1, обеспечивающий сравнительно низкую температуру плавления и хорошие визуальные характеристики.

Фритту, полученную из стекла состава 1, использовали для глазурования керамической плитки. На её основе была приготовлена фриттованная глазурь, содержащая 90 % фритты и 10 % каолина. Полученную глазурную суспензию наносили методом распыления на поверхность сформованной необожжённой керамической плитки, после чего образцы подвергали обжигу при температуре 1050 °С.

Для придания глазурованной керамической поверхности антибактериальных свойств на неё наносили методом распыления наносуспензии Ag различного состава с последующей термической обработкой при температурах 700, 750, 800 и 900 °С. Проведение данных экспериментов позволило определить оптимальную температуру термической обработки, а также оптимальный расход наночастиц Ag на 10 м² керамической поверхности.

Было изучено влияние количества наночастиц Ag на антибактериальные свойства образцов, полученных при температурах 700–750 °С. Образец с расходом 0,5 г наночастиц Ag на 10 м² поверхности не проявил выраженной антибактериальной активности. При расходе 0,7 г наблюдалась слабая антибактериальная активность. При увеличении количества наночастиц Ag до 1,0; 1,25 и 1,5 г была отмечена выраженная антибактериальная активность покрытия.

Также было исследовано влияние количества наночастиц Ag на антибактериальные свойства образцов, подвергнутых термической обработке при температуре 800 °С. Образцы с расходом 0,5 и 0,7 г наночастиц Ag на 10 м² поверхности не проявили выраженной антибактериальной активности. При расходе 1,0 г наблюдалась слабая антибактериальная активность. Образец с расходом 1,25 г также не продемонстрировал выраженного антибактериального эффекта, тогда как при расходе 1,5 г была отмечена высокая антибактериальная активность.

При температуре 900 °С образцы с расходом 0,5 и 0,7 г наночастиц Ag на 10 м² поверхности также не проявили выраженной антибактериальной активности. При расходе 1,0 г наблюдалась слабая антибактериальная активность. Образцы с расходом 1,25 и 1,5 г наночастиц Ag не продемонстрировали выраженного антибактериального эффекта.

Результаты и обсуждение

На основании полученных экспериментальных данных установлено, что наиболее эффективное антибактериальное действие на керамической поверхности площадью 10 м² достигалось при нанесении суспензии, содержащей 1,0 г наночастиц серебра, с последующей термической обработкой при температуре 700 °С.

Установлено, что данный состав обладает высокой антибактериальной активностью в отношении таких патогенных микроорганизмов, как *Staphylococcus aureus*, *Staphylococcus haemolyticus* и *Escherichia coli*, обеспечивая значительное подавление их жизнеспособности за короткий промежуток времени.

Повышение температуры термической обработки выше 700 °С, вероятно, способствует диффузии наночастиц Ag в стеклообразную фазу и/или их укрупнению, что приводит к снижению площади активной поверхности и, как следствие, к уменьшению биоцидной активности покрытия. В связи с этим температура 700 °С была определена как оптимальная для формирования антибактериального покрытия.

Таблица 7.

Результаты способности экспериментальных составов нейтрализовать микробиологические штаммы

№	<i>Staphylococcus aureus</i> (S.A.), КОЕ 10 ⁶	<i>Staphylococcus haemolyticus</i> (S.G.), КОЕ 10 ⁵	<i>Escherichia coli</i> (Л.Н.Э.К.), КОЕ 10 ⁴
1	погибшие	погибшие	погибшие
2	погибшие	погибшие	погибшие
3	погибшие	погибшие	погибшие

Согласно результатам анализа было установлено, что формирования антибактериального покрытия на керамической плитке площадью 100 м² требуется 10 г наночастиц Ag, что соответствует расходу 0,01 мг/см².

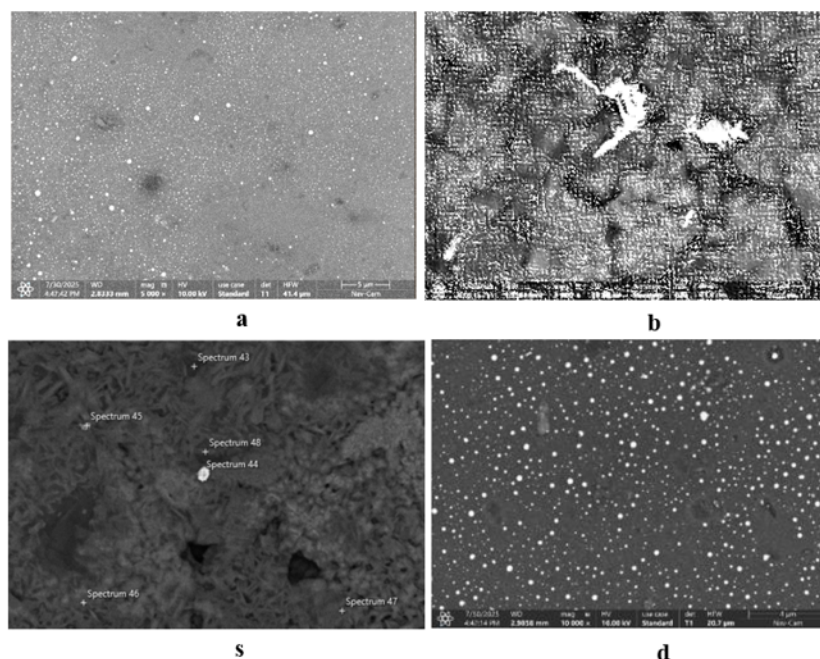


Рисунок 2. Результаты электронно-микроскопического анализа по определению размера и формы синтезированных наночастиц Ag

На рисунке 2(а) представлена морфология поверхности, сформировавшейся после распыления наносuspензии на предварительно обожжённую керамическую поверхность и последующей термической обработки при температуре 800 °С.

Установлено, что часть наночастиц Ag в наносuspензии с исходным размером до 50 нм под воздействием температуры претерпевает разделение и/или перегруппировку с образованием кластеров размером 5–10 нм.

По мере уменьшения размера частиц Ag увеличивается доля поверхностных атомов, а характер их перемещения в кристаллической решётке изменяется вследствие проявления размерных эффектов. Кроме того, высокое энергетическое состояние поверхностных атомов, обусловленное наличием неполностью координированных связей и увеличением поверхностной энергии, может способствовать повышению сопротивления структуры механической деформации.

На рисунке 2(б) представлена микроструктура образца, полученного после распыления наносuspензии на невысушенный глазурный слой с последующим обжигом при температуре 1000 °С, по данным трансмиссионной электронной микроскопии (ТЭМ). Под воздействием высокой температуры была выявлена частичная агрегация наночастиц.

Хотя твёрдость металлического серебра составляет 2,5–3 единицы по шкале Мооса, введение наночастиц Ag размером 20–50 нм может способствовать повышению твёрдости поверхности вследствие измельчения структуры и формирования более дисперсной микроструктуры. Это свидетельствует о том, что керамическое покрытие обладает не только биоцидными свойствами, но и достаточно высокой эксплуатационной стойкостью.

На рисунке 2(в) представлены результаты ТЭМ-анализа образца, полученного после термической обработки при температуре 1000 °С, при этом наносuspензия была непосредственно введена в состав глазурного шликера. Изображение показывает, что значительная часть наночастиц диффундировала в более глубокие слои стекловидной фазы глазури. Тем не менее биоцидная активность на поверхности покрытия сохраняется, что

может быть связано с контролируемой диффузией и постепенным высвобождением ионов серебра через стеклянную матрицу, обеспечивающим пролонгированное антибактериальное действие.

На рисунке 2(г) представлено ТЭМ-изображение антибактериального слоя, полученного методом распыления наносuspензии на поверхность предварительно обожжённой керамической плитки. Анализ показал, что основная часть частиц имеет размер 30–60 нм, при этом в отдельных локальных областях наблюдаются частицы размером около 20 нм.

Высокая антибактериальная эффективность полученного покрытия может быть обусловлена большой удельной площадью поверхности наночастиц Ag, прочной адгезионной связью с керамической фазой, высокой механической стабильностью сформированной структуры, а также контролируемым высвобождением ионов серебра.

Кроме того, формулировки о законе Холла–Петча и механической прочности я сделал более осторожными, потому что без прямых измерений твёрдости утверждать значительное повышение твёрдости слишком категорично.

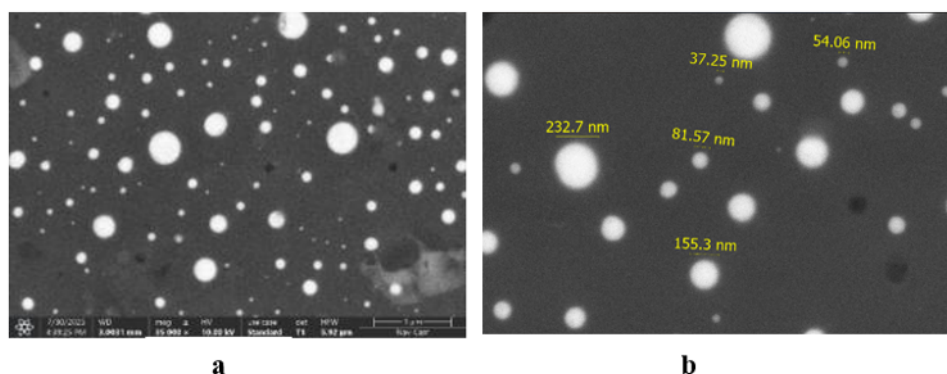


Рисунок 3. Морфологическая характеристика синтезированных наночастиц серебра, адгезионная стабильность и анализ термических свойств покрытия

На рисунке 3(а) представлены ТЭМ-изображения слоя наночастиц Ag, полученного методом распыления наносuspензии на поверхность предварительно обожжённой керамической плитки. Изображения показывают, что наночастицы преимущественно имеют сферическую форму и характеризуются высокой степенью кристалличности. Равномерное и достаточно плотное распределение частиц по поверхности свидетельствует о хорошей совместимости наносuspензии с керамической основой и способствует формированию однородного покрытия. Отсутствие выраженной агломерации частиц указывает на их высокую дисперсность и устойчивое распределение по поверхности.

На рисунке 3(б) показана роль стабилизаторов, используемых в процессе синтеза, таких как поливинилпирролидон (ПВП) и поливиниловый спирт (ПВС), в обеспечении дисперсности наночастиц. Наночастицы, стабилизированные полимерной оболочкой, характеризуются равномерным распределением и хорошим взаимодействием с поверхностью глазури, что способствует формированию структурно однородного и прочного композиционного слоя после термической обработки.

По одним ТЭМ-изображениям такие свойства напрямую доказать нельзя; для этого обычно нужны отдельные испытания на адгезию или дополнительные методы анализа.

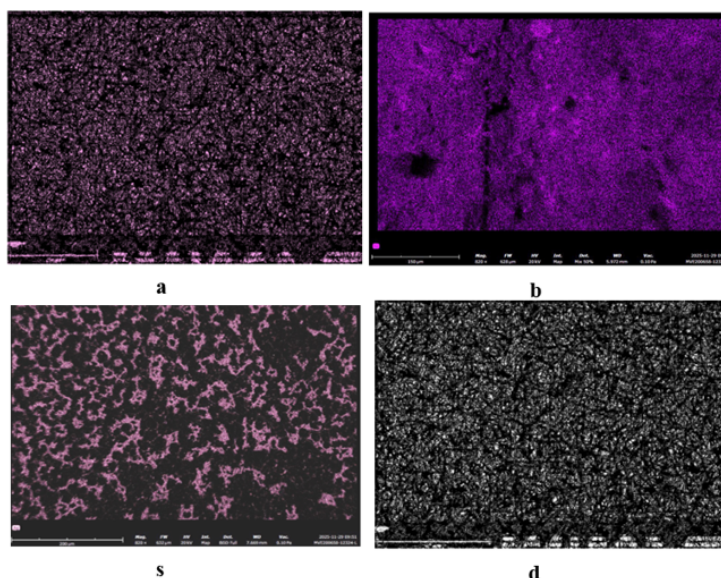
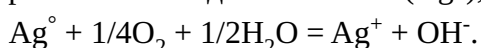


Рисунок 4. Влияние температурного режима на морфологию, агрегацию наночастиц серебра (Ag) и биоцидную активность покрытия (результаты СЭМ-анализа)

Результаты термогравиметрического анализа (ТГА) поверхности, покрытой наночастицами серебра, показали, что покрытие сохраняет свою стабильность до температуры 300 °С. Учитывая, что максимальная тепловая нагрузка на керамическую плитку в бытовых условиях не превышает 100 °С, был сделан вывод о высокой термической стабильности разработанного антибактериального покрытия. На рисунке 4(а) представлено СЭМ- изображение поверхности керамики, модифицированной при температуре 700 °С. Установлено, что наночастицы Ag равномерно распределены по поверхности, имеют сферическую форму и размеры в диапазоне 20–50 нм. Гладкая микроморфология препятствует механическому прикреплению бактерий, а высокая степень кристалличности наночастиц обеспечивает контролируемое и длительное высвобождение ионов серебра. На рисунке 4(б) представлено СЭМ- изображение поверхности покрытия, сформированного при температуре 750 °С. Размер наночастиц составляет 20–60 нм, при этом сохраняется их сферическая морфология. Биоцидная активность покрытия обусловлена окислением атомов серебра и высвобождением ионов (Ag^+), что описывается следующим уравнением реакции:



Покрытие, сформированное при данной температуре, обладает высокой коррозионной стойкостью и характеризуется прочной химической адгезией к керамической основе. На рисунке 4 (с) показано состояние агрегации наночастиц в образце, обработанном при температуре 800 °С. В результате высокой концентрации наносuspензии и достижения температурой критического уровня для наночастиц наблюдается их слияние (коалесценция). Исследование показало, что вследствие уменьшения удельной площади поверхности наночастиц Ag антибактериальная эффективность данного образца значительно снизилась. На рисунке 4(д) представлен анализ поверхности образца после термической обработки при температуре 900 °С в течение 60 минут. Поскольку наносuspензия была разбавлена в соотношении 1 г на 10 м², поверхности, агрегация наночастиц на поверхности практически не наблюдалось, несмотря на высокую температуру. Наночастицы были дискретно и равномерно распределены по поверхности керамики, что способствует сохранению стабильных антибактериальных свойств покрытия.

Разработка технологической системы получения антибактериальных покрытий с наночастицами серебра (Ag).

На основе полученных результатов были разработаны комплексные технологические схемы электрохимического синтеза наночастиц серебра и формирования стабильных антибактериальных покрытий на поверхности керамических изделий (рисунок 5). На первом этапе сырьевые компоненты, такие как кварцевый песок, глина, микрокальцит, сода, доломит и нитрат калия, подаются из специальных бункеров (1–6) и после механической обработки в сепараторах и мельницах (7–22) с помощью высокоточных дозаторов (23–24) в заданных соотношениях поступают на конвейерную ленту (25). Дозированная смесь гомогенизируется в смесителе-гомогенизаторе (26), после чего направляется во вращающуюся печь (28), где при температуре 1300 °С осуществляется синтез фритты. Полученный стеклорасплав гранулируется в водной среде, после чего гранулированная фритта совместно с каолином (31) и водой подается в шаровую мельницу (33), где готовится базовый глазурный шликер с заданной степенью дисперсности. Полученный шликер поступает в смеситель (35), где на данном этапе в систему вводятся наночастицы серебра, синтезированные электрохимическим методом. В результате интенсивного перемешивания формируется нанокпозиционная биоцидная суспензия. Подготовленный модифицированный глазурный шликер через дозаторы (36)

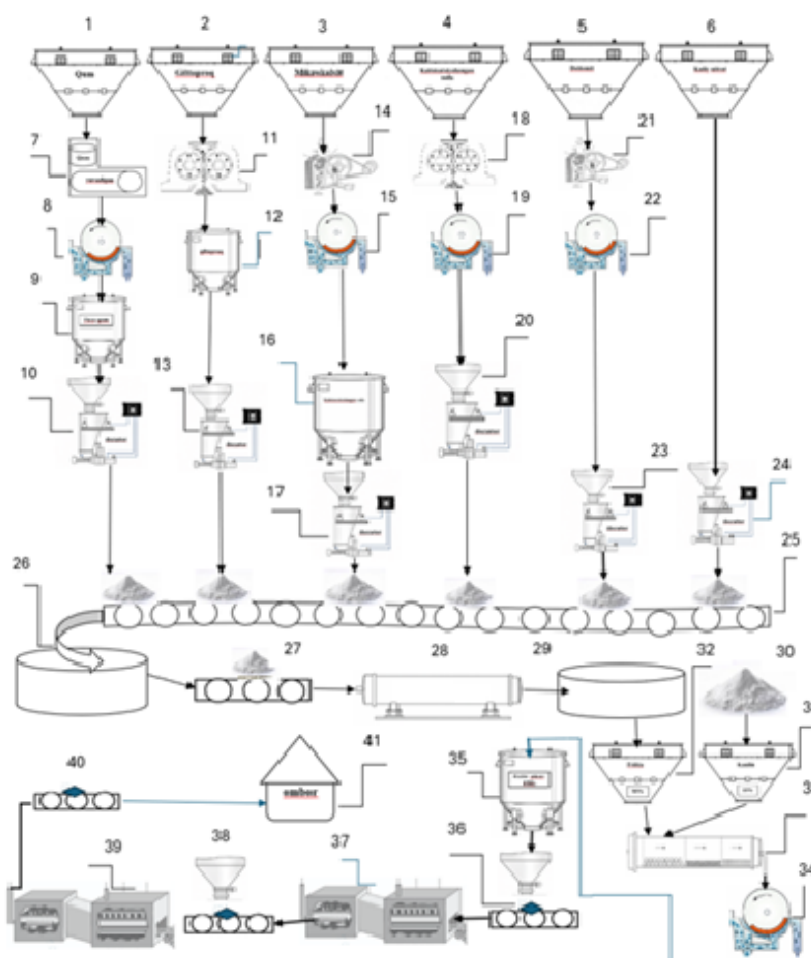


Рисунок 5. Комплексная технологическая схема формирования стабильных антибактериальных покрытий на поверхности керамических изделий

1 – бункер для кварцевого песка; 2 – бункер для глины; 3 – бункер для микрокальцита; 4 – бункер для кальцинированной соды; 5 – бункер для доломита; 6 – бункер для нитрата калия; 7 – установка для промывки песка; 8 – магнитный сепаратор; 9 – бункер; 10 – дозатор; 11 – валковая дробилка; 12 – бункер для глины; 13 – дозатор для глины; 14 – щековая дробилка; 15 – магнитный сепаратор; 16 – бункер для микрокальцита; 17 – дозатор; 18 – валковая дробилка; 19 – магнитный сепаратор; 20 – дозатор; 21 – щековая дробилка; 22 – магнитный сепаратор; 23 – дозатор; 24 – дозатор; 25 – конвейерная лента; 26 – смеситель; 27 – конвейерная лента; 28 – вращающаяся печь; 29 – водяной бассейн; 30, 31 – бункер для каолина; 32 – бункер для фритты; 33 – шаровая мельница; 34 – магнитная мельница; 35 – бункер; 36 – установка для нанесения глазури на керамическую поверхность; 37 – печь; 38 – установка для распыления наносuspензии на поверхность; 39 – печь; 40 – конвейерная лента; 41 – склад готовой продукции.

По результате гравиметрического анализа, основанного на определении разности между начальной и конечной массами анода в процессе электролиза, было установлено, что в 100 мл наносuspензии содержится 0,25 мг наночастиц Ag. Средний размер полученных наночастиц составляет 50 нм, а их теоретическое количество равно приблизительно $3,82 \times 10^2$ частиц. Согласно расчетам, 100 мл наносuspензии данной концентрации достаточно для модификации керамической поверхности площадью 25 000 см². Композиционное покрытие готовили путём введения наносuspензии, содержащей 0,25 мг наночастиц Ag к 0,5 кг базового глазурного шликера с последующей термической обработкой при температуре 1000 °C в течение 50 минут. Результаты исследования показали, что вследствие формирования стекловидной (глазурной) фазы в процессе высокотемпературного обжига и ограниченной термостойкости наночастиц часть наночастиц Ag диффундирует в глубокие слои глазури. В результате около 50 % наночастиц, Ag, нанесённых с целью придания поверхности антибактериальных свойств, не сохраняются в поверхностном слое а оставшаяся часть подвергается окислительным процессам, что приводит к заметному снижению антибактериальной эффективности покрытия.

В настоящем исследовании была синтезирована базовая наносuspензия для формирования антибактериальной поверхности. В качестве основы была выбрана наносuspензия Ag, полученная с использованием поливинилового спирта (ПВС) и поливинилпирролидона (ПВП). Выбор данных стабилизаторов обусловлен результатами экспериментальных исследований, согласно которым температура плавления наночастиц серебра размером 5–100 нм зависит от их размера. Было установлено, что температура плавления наночастиц размером 5–10 нм составляет около 663 °C, а для наночастиц размером 20 нм — около 886 °C, в связи с чем температурные режимы обработки были выбраны с учетом размеров наночастиц. Установлено также, что органическое вещество, использованное для предотвращения агрегации Ag-наночастиц в составе суспензии, полностью разлагается при температуре около 300 °C.

С целью получения антибактериального покрытия с использованием наночастиц Ag были исследованы два технологических способа формирования покрытия.

Как правило, размер наночастиц Ag составляет от 1 до 100 нм. Благодаря чрезвычайно большой удельной поверхности значительно увеличивается площадь контакта между серебром и бактериями либо вирусами, что существенно повышает бактерицидную

эффективность материала. Таким образом, применение серебра в форме наночастиц позволяет уменьшить концентрацию Ag в сотни раз при полном сохранении его бактерицидных свойств. Антибактериальная активность серебра объясняется взаимодействием ионов Ag с тиольными группами цистеина, входящими в состав ферментов микроорганизмов, что приводит к нарушению их биологической активности.

Бактерицидная добавка, созданная на основе наночастиц Ag, является одним из современных достижений отечественной нанобиотехнологии. При длительном применении синтетических антибиотиков их терапевтическая эффективность снижается вследствие появления устойчивых к ним микроорганизмов. Развитие антибиотикорезистентности обусловлено как мутациями самих микроорганизмов, так и приобретением ими фрагментов ДНК от других организмов. В отличие от антибиотиков, на протяжении многих тысячелетий бактерии и вирусы не способны выработать устойчивость («иммунитет») к серебру. Серебро является безопасным для млекопитающих (в том числе человека), пресмыкающихся, растений и других многоклеточных живых организмов.

Специально модифицированные наночастицы серебра способны длительное время сохранять свои биоцидные свойства. Благодаря этому более рациональным является не применение наносеребра в качестве самостоятельного дезинфицирующего средства, а его введение в состав красок, лаков и других материалов, что позволяет снизить материальные, временные и трудовые затраты при обеспечении долговременной антибактериальной защиты.

Заключение

По результатам гравиметрического анализа, основанного на определении разности начальной и конечной массы анода в процессе электролиза, установлено, что в 100 мл наносuspензии содержится 0,25 мг наночастиц Ag. Средний размер частиц составляет около 50 нм, а расчётное их количество — приблизительно $3,82 \times 10^2$. Такой объём суспензии достаточен для модификации керамической поверхности площадью до 25 000 см².

Композиционное покрытие получали путём введения 100 мл наносuspензии, содержащей 0,25 мг Ag, в 0,5 кг базового глазурного шликера с последующим обжигом при 1000 °C в течение 50 мин. Установлено, что при высокотемпературном обжиге часть наночастиц диффундирует в глубокие слои стекловидной фазы, а часть подвергается окислительным превращениям, вследствие чего их содержание в поверхностном слое снижается и, соответственно, уменьшается антибактериальная эффективность покрытия.

Для формирования антибактериальной поверхности использовали наносuspензию Ag, стабилизированную поливиниловым спиртом (ПВС) и поливинилпирролидоном (ПВП). Выбор температурных режимов проводили с учётом зависимости температуры плавления наночастиц серебра от их размера: для частиц 5–10 нм она составляет около 663 °C, а для частиц размером около 20 нм — порядка 886 °C. Органические стабилизаторы, применяемые для предотвращения агрегации наночастиц, разлагаются при температуре около 300 °C.

С целью получения антибактериального покрытия были исследованы два технологических способа нанесения наночастиц Ag. Благодаря высокой удельной поверхности наночастицы серебра обладают повышенной контактной активностью по отношению к микроорганизмам, что способствует выраженному бактерицидному эффекту

даже при низкой концентрации Ag. Антибактериальное действие серебра связано, в частности, с взаимодействием ионов Ag с тиольными группами белков и ферментов микроорганизмов, что приводит к нарушению их жизненно важных функций.

Использование наночастиц серебра в составе лакокрасочных и керамических покрытий представляет практический интерес благодаря возможности длительного сохранения биоцидных свойств и формирования долговременной антибактериальной защиты поверхности.

Список литературы

1. Беломеря В.Н., Бочарова К.А., Юрченко А.С., Павленко Е.В., Бурцев А.Р. Приоритетные возбудители грибковых и бактериальных инфекций: тенденции развития и влияние на эпидемиологическую обстановку в РФ // *Microbiology Independent Research Journal*. – 2025. – Т. 12, № 1. – С. 1–18. – DOI: 10.18527/2025121118.RU.
2. Ибрагимов П.С. Распространение и профилактика воздушно-капельных инфекций среди детей // *Вестник Ассоциации Пульмонологов Центральной Азии*. – 2025. – Т. 8, № 3. – С. 267–270.
3. Файзуллина З.Р., Жиленко А.А., Исламгулов А.Х., Черная Е.А., Точиева А.И., Санова А.А. ..., Матвиец А.К. Роль нанотехнологий в диагностике и лечении злокачественных новообразований женской репродуктивной системы // *Акушерство, гинекология и репродукция*. – 2025. – Т. 19, № 4. – С. 590–607.
4. Хамраева З.Т., Шонахунов Т.Э., Ахмедова З.Р., Мирхолисов М.М. У., Юнусов Х.Э., Сарымсаков А.А. Изучение антимикробной активности наночастиц серебра и оксида цинка на целлюлозном носителе // *Universum: химия и биология*. – 2023. – № 9–1 (111). – С. 32–37.
5. Харина Г.В., Анахов С.В. Экологическая безопасность человека в техносфере: учебное пособие. – Екатеринбург: РГППУ, 2023. – 186 с.
6. Яхяев У.А., Арипова М.Х., Мкртчян Р.В., Мухторова Д.А. Получение наноразмерных частиц серебра методом электролиза из серебрясодержащего электротехнического лома // *Химия и химическая технология*. – 2025. – № 2. – DOI: 10.70189/1992–9498.1672.
7. Bruna T., Maldonado-Bravo F., Jara P., Caro N. Silver nanoparticles and their antibacterial applications // *International Journal of Molecular Sciences*. – 2021. – Т. 22, № 13. – Art. 7202. – DOI: 10.3390/ijms22137202.
8. Dissanayake K.K., Rifky M., Samadiy M., Attanayake D., Gunasena S., Senaarachchi R., Kurniawan T.A. Innovations and challenges in meat color measurement technologies: a critical review // *Journal of Food Measurement and Characterization*. – 2026. – Т. 20, № 4. – P. 3703–3723. – DOI: 10.1007/s11694-025-03796-4.
9. Rakhimkulov S., Absattorov D., Bori-khonov B., Yakubov E., Abdullayev B., Samadiy M. Synthesis and application of zinc oxide nanoparticles // *Research Journal of Chemistry and Environment*. – 2024. – Т. 28, № 01. – P. 953–963.

10. Reinosa J.J., Enríquez E., Fuertes V., Liu S., Menéndez J., Fernández J.F. The challenge of antimicrobial glazed ceramic surfaces // *Ceramics International*. – 2022. – Т. 48, № 6. – P. 7393–7404. – DOI: 10.1016/j.ceramint.2021.12.121.
11. Yılmaz G.E., Göktürk I., Ovezova M., Yılmaz F., Kılıç S., Denizli A. Antimicrobial nanomaterials: a review // *Hygiene*. – 2023. – Т. 3, № 3. – P. 269–290. – DOI: 10.3390/hygiene3030020.

References

1. Belomerya, V., Bocharova, K., Yurchenko, A., Pavlenko, E. & Burtsev, A. [Priority causative agents of fungal and bacterial infections: development trends and impact on the epidemiological situation in the Russian Federation. *Microbiology Independent Research Journal*]. Т. 12. – 2025 (In Russ.)
2. Ibragimov P.S. [Transmission and prevention of airborne infections among children] // *Vestnik Assotsiatsii Pul'monologov Tsentral'noj Azii*. – 2025. – Vol. 8, No. 3. (In Russ.)
3. Fajzullina Z.R., Zhilenko A.A., Islamgulov A.Kh., Chernaya E.A., Tochieva A.I., Sanova A.A., & Matviets A.K. (2025). [The role of nanotechnology in the diagnosis and treatment of malignant neoplasms of the female reproductive system. *Obstetrics, Gynecology and Reproduction*, 19(4), 590–607] (In Russ.)
4. Khamraeva Z.T., Shonakhunov T.E., Akhmedova Z.R., Mirkholisov M.M.U., Yunusov Kh.E., & Sarymsakov A.A. (2023). [Study of antimicrobial activity of silver nanoparticles and zinc oxide on a cellulose carrier. *Universum: Chemistry and Biology*, (9–1 (111)), 32–37] (In Russ.)
5. Kharina G.V. & Anakhov S.V. [Environmental safety of humans in the technosphere: educational manual]. – 2023. (In Russ.)
6. Yakhyaev U.A., Aripova M.Kh., Mkrtchyan R.V., Mukhtorova D.A. [Obtaining nanosized silver particles by electrolysis from silver-containing electrical scrap] // *Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*. – 2025. – No. 2. – DOI: 10.70189/1992–9498.1672. (In Russ.)
7. Bruna, T., Maldonado-Bravo, F., Jara, P. & Caro, N. Silver nanoparticles and their antibacterial applications. *International journal of molecular sciences*, 22(13), 7202. – 2021.
8. Dissanayake K.K., Rifky, M., Samadiy, M., Attanayake, D., Gunasena, S., Senaarachchi, R. & Kurniawan T.A. (2026). Innovations and challenges in meat color measurement technologies: a critical review // *Journal of Food Measurement and Characterization*. – 2026. – Vol. 20, No. 4.
9. Rakhimkulov, S., Absattorov, D., Bori-khonov, B., Yakubov, E., Abdullayev, B., & Samadiy, M. (2024). Synthesis and application of zinc oxide nanoparticles. *Synthesis*, 25(01).
10. Reinosa J.J., Enríquez, E., Fuertes, V., Liu, S., Menéndez, J., & Fernández, J.F. (2022). The challenge of antimicrobial glazed ceramic surfaces. *Ceramics International*, 48(6), 7393–7404.
11. Yılmaz G.E., Gektyurk I., Ovezova M., Yılmaz F., Kılıç S., Denizli A. [Yılmaz, G.E., Göktürk, I., Ovezova, M., Yılmaz, F., Kılıç, S., & Denizli, A. Antimicrobial nanomaterials: a review. *Hygiene*]. Т. 3. – 2023 (In Russ.)

Статья поступила в редакцию: 12.08.2026

Статья принята к публикации: 16.09.2026

Статья опубликована: 26.09.2026

УДК 622.765+547.26

Разработка кондиционных составов и исследование физико-химических свойств композиционных химических флотореагентов -вспенивателей на основе органо-неорганических ингредиентов с использованием местного сырья и отходов производств

Негматов Жахонгир Носир угли
соискатель

ГУ Фан ва тараққиёт, Ташкентский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: bozorboyev1983@mail.ru

Хурсанов Абдулла Халмурадович
председатель правления АО Алмалыкский ГМК
Республика Узбекистан, г. Алмалык

Негматова Комила Сайибжановна
зав. лаб. ГУ Фан ва тараққиёт, Ташкентский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Ташкент

Абед Нодира Сайибжановна
директор

ГУ Фан ва тараққиёт, Ташкентский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Ташкент

Икрамова Мукаддас Эралиевна
зав. лаб. ГУ Фан ва тараққиёт, Ташкентский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Ташкент

Бозоров Дамир
соискатель

ГУ Фан ва тараққиёт, Ташкентский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Ташкент

Курбонов Урал Меликулович
докторант

ГУ Фан ва тараққиёт, Ташкентский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Ташкент

Негматов Сойибжон Садикович
научный руководитель ГУ Фан ва тараққиёт, Ташкентский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Ташкент

Библиографическое описание: Разработка кондиционных составов и исследование физико-химических свойств композиционных химических флотореагентов -вспенивателей на основе органо-неорганических ингредиентов с использованием местного сырья и отходов производств // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Негматов Ж.Н.У. [и др.]. 2026. 9(150). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23443>

Development of conditional components and research of physicochemical properties of composite chemical flotation agents – foaming agents based on inorganic ingredients using local raw materials and production waste

Negmatov Jahongir Nosir ugli

*Applicant of the Fan va taraqqiyot, SE Tashkent State Technical University
Republic of Uzbekistan, Tashkent*

Khursanov Abdulla Khalmuradovich

*Chairman of the Board of JSC Almalyk MMC
Republic of Uzbekistan, Almalyk*

Negmatova Komila Sayibjanovna

*Laboratory Manager Fan va taraqqiyot SE
Tashkent State Technical University
Republic of Uzbekistan, Tashkent*

Abed Nodira Sayibjanovna

*Director of the Fan va taraqqiyot, SE
Tashkent State Technical University
Republic of Uzbekistan, Tashkent*

Ikramova Mukaddas Eralievna

*Laboratory Manager Fan va taraqqiyot SE
Tashkent State Technical University
Republic of Uzbekistan, Tashkent*

Bozorov Damir

*Applicant of the Fan va taraqqiyot, SE
Tashkent State Technical University
Republic of Uzbekistan, Tashkent*

Kurbonov Ural Melikulovich

*Doctoral student of the Fan va taraqqiyot, SE
Tashkent State Technical University
Republic of Uzbekistan, Tashkent*

Аннотация

В работе представлены результаты исследований, направленных на разработку и обоснование кондиционных составов композиционных химических флотореагентов-вспенивателей класса КХФ-ВС-МЗС-КСвс на основе органо-неорганических компонентов с использованием местного сырья и отходов производств для флотационного обогащения медно-молибденовых руд. Разработаны композиционные флотореагенты-вспениватели на водно-спиртовой основе и проведена комплексная оценка их физико-химических свойств в сравнении со стандартным промышленным флотореагентом-вспенивателем Т-92. На основании экспериментальных исследований определен наиболее перспективный кондиционный состав КХФ-ВС-МЗС-КС-Звс, характеризующийся оптимальным сочетанием основных физико-химических показателей и пенообразующих свойств. Для установления состава и особенностей химического строения разработанного флотореагента проведены ИК-спектроскопические исследования. Полученные спектральные данные свидетельствуют о наличии гидроксильных и эфирных функциональных групп, принимающих участие в формировании и стабилизации пенной структуры, что обуславливает улучшение физико-химических и эксплуатационных характеристик флотореагента-вспенивателя. Установлено, что разработанный состав КХФ-ВС-МЗС-КС-Звс по основным физико-химическим показателям сопоставим со стандартным флотореагентом Т-92. На основании полученных

результатов композиционный химический флотореагент-вспениватель КХФ-ВС-МЗС-КС-Звс рекомендован и передан для проведения лабораторно-производственных испытаний на опытно-обогащительной фабрике Технологического центра разработки и внедрения инновационных технологий (ООФ ТЦРиВИТ) АО «Алмалыкский ГМК» с целью оценки его технологической эффективности при флотационном обогащении медно-молибденовых руд месторождения «Кальмакыр».

Abstract

The paper presents the results of studies aimed at the development and substantiation of conditioned compositions of composite chemical flotation reagents-foaming agents of the КХФ-ВС-МЗС-КСвс class based on organic and inorganic components using local raw materials and industrial waste for the flotation beneficiation of copper-molybdenum ores. Composite flotation reagents-foaming agents based on a water-alcohol system were developed, and a comprehensive assessment of their physicochemical properties was carried out in comparison with the standard industrial flotation reagent-foaming agent T-92. Based on the experimental studies, the most promising conditioned composition, КХФ-ВС-МЗС-КС-Звс, was determined, characterized by an optimal combination of the main physicochemical parameters and foaming properties. To determine the composition and specific features of the chemical structure of the developed flotation reagent, infrared (IR) spectroscopic studies were performed. The obtained spectral data indicate the presence of hydroxyl and ether functional groups involved in the formation and stabilization of the foam structure, which contributes to the improvement of the physicochemical and operational characteristics of the flotation reagent-foaming agent. It was established that the developed КХФ-ВС-МЗС-КС-Звс composition is comparable with the standard flotation reagent T-92 in terms of its main physicochemical parameters. Based on the obtained results, the composite chemical flotation reagent-foaming agent КХФ-ВС-МЗС-КС-Звс was recommended and submitted for laboratory and pilot-industrial testing at the Experimental Ore Beneficiation Plant of the Technological Center for Development and Implementation of Innovative Technologies (EEP TCDIIT), JSC “Almalyk Mining and Metallurgical Company”, in order to evaluate its technological efficiency in the flotation beneficiation of copper-molybdenum ores from the Kalmakyr deposit.

Ключевые слова: флотация, флотореагент-вспениватель, пенообразование, медно-молибденовая руда, композиция, извлечение металлов.

Keywords: flotation, flotation reagent-foamer, foaming, copper-molybdenum ore, composite, metal recovery.

Введение

В настоящее время одним из приоритетных направлений в области обогащения минерального сырья является разработка и совершенствование эффективных химических флотореагентов-вспенивателей, обеспечивающих повышение технологических показателей флотационного процесса при переработке медно-молибденовых руд. Особое значение при этом приобретает повышение степени извлечения меди и молибдена, а также сопутствующих ценных компонентов, включая золото, серебро и другие редкие и редкоземельные металлы, содержащиеся в составе рудного сырья. Эффективность их извлечения в значительной

степени определяется физико-химическими свойствами применяемых флотореагентов, устойчивостью и дисперсностью образуемой пены, а также характером взаимодействия реагентов с минеральной поверхностью [1, 2, 7].

В настоящее время в мире при флотационном обогащении руд в качестве реагентов-вспенивателей, использует обычно спирты и их продукты, в том числе флотореагенты Т-66, Т-80, Т-92 Российского и Китайского производства, а также фосфорорганические и сульфгидрильные реагенты [3, 6, 10, 16, 21].

Исходя из анализа литературных данных и результатов ранее проведенных исследований, следует отметить, что, несмотря на значительное количество работ, посвященных совершенствованию физико-химических свойств композиционных флотореагентов-вспенивателей, применяемых при флотационном обогащении медно-молибденовых руд, ряд вопросов остается недостаточно изученным. В частности, недостаточное внимание уделено обоснованию рационального состава композиционных флотореагентов-вспенивателей, закономерностям процесса пенообразования, а также формированию и устойчивости пенной структуры в условиях флотации руд цветных, редких и благородных металлов. Особого внимания требует установление взаимосвязи между составом и физико-химическими характеристиками флотореагентов-вспенивателей, параметрами пенообразования и технологическими показателями процесса, включая выход и степень извлечения ценных компонентов в медно-молибденовый концентрат.

В Республике Узбекистан проводятся научно-исследовательские работы, направленные на разработку и применение композиционных флотореагентов-вспенивателей на основе органо-неорганических компонентов с использованием местного сырья и вторичных материальных ресурсов. Результаты проведенных исследований свидетельствуют о перспективности использования местных видов сырья и производственных отходов в качестве компонентов флотореагентов и возможности создания эффективных композиционных реагентных систем [13, 15, 18, 22].

В связи с этим разработка рациональных составов и комплексное исследование физико-химических свойств импортозамещающих композиционных химических флотореагентов-вспенивателей на основе органо-неорганических компонентов с использованием местного сырья и отходов производств представляет собой актуальную научно-практическую задачу. Решение данной задачи направлено на повышение эффективности реагентного режима флотации, расширение сырьевой базы для производства флотореагентов и снижение зависимости от импортных реагентных материалов.

Материалы и методы

В данной работе объектами исследования являются КППС (композиционная порошкообразная госсиполовая смола), глицерин, инъекционно-адгезионная фракция (ИАФ) – производства спирта, композиционный полимерный клей – (Na-KMЦ), триэтаноламин, каустическая сода, алкил бензол, лаурил сульфат натрия, медно-молибденовая руда АО «Алмалыкский ГМК».

Для анализа полученных результатов использовались современные методы физико-химического анализа, включая ИК-спектроскопию, рентгенофазовый (РФА) и дифференциально-термический (ДТА) анализы, масс-спектроскопию, а также флотационную машину ФМЛ-12 (247 ФЛ) и другие стандартные методы анализа, разрешённые в странах СНГ.

Результаты и обсуждение

Для оценки флотационной способности разработанного кондиционного состава флотореагента была использована проба текущей медно-молибденовой руды месторождения «Кальмакыр». Был исследован химический состав и фазовый анализ текущей медно-молибденовой руды месторождения «Кальмакыр», которые представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1.

Химический состав медно-молибденовой руды

Наименование пробы	Cu	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	SiO ₂	S _{общ}	Fe	Mo	Au	Ag
Руда 2019 г.	0,44	12,33	2,58	3,5	56,73	1,92	5,65	0,0068	0,84	3,16

Таблица 2.

Фазовый состав медно-молибденовой руды

Содержание фазовых составляющих				Содержание Cu в сумме фрак- ций, %	Сульфид- ность, %
Окисленные минералы		Сульфидные минералы			
Свободные	Связанные	Первичные	Вторичные		
0,01	0,01	0,01	0,39	0,42	95,2

Как следует из представленных в таблице данных, исследуемая руда характеризуется наличием цветных, редких и благородных металлов, содержание которых является относительно невысоким. Это обуславливает необходимость применения эффективных методов обогащения, обеспечивающих повышение степени извлечения ценных компонентов и получение концентратов требуемого качества.

Для разработки и исследования рациональных составов композиционных химических флотореагентов-вспенивателей, с учетом результатов проведенного анализа и ранее установленных закономерностей, в качестве основных компонентов модельного состава были выбраны органо-неорганические соединения и продукты переработки местного сырья и производственных отходов. В соответствии с результатами предварительных исследований и литературными данными [11, 12, 14, 20] в модельный состав композиционного флотореагента были включены следующие компоненты: 1 % композиционной модифицированной госсиполовой смолы в виде 10 %-ного водного раствора, 1 % триэтаноламина, 1 % каустической соды, 80 % инъекционно-адгезионной фракции (ИАФ), 7 % лаурилсульфата натрия и композиционный полимерный клей на основе Na-KMЦ.

Выбор указанных компонентов обусловлен их функциональной ролью в формировании физико-химических и пенообразующих свойств композиционного флотореагента. Комбинирование органических и неорганических компонентов позволяет регулировать

поверхностно-активные свойства реагентной системы, интенсивность и устойчивость пенообразования, а также обеспечить необходимые условия для эффективного взаимодействия реагента с минеральной поверхностью в процессе флотации.

На основании анализа современных литературных данных, результатов ранее выполненных исследований и собственных экспериментальных исследований в области разработки флотореагентов [4, 5, 9, 19] были разработаны рациональные составы композиционных химических флотореагентов-вспенивателей класса КХФ-ВС-МЗС-КС. Разработка указанных составов была направлена на получение эффективных импортозамещающих реагентов с заданными физико-химическими и пенообразующими характеристиками на основе доступного местного сырья и производственных отходов.

В таблице 3 приведены рецепты разработанных кондиционных составов композиционных химических флотореагентов-вспенивателей класса КХФ-ВС-МЗС-КС на водно-спиртовой основе.

Таблица 3.

Разработанные составы композиционного химического флотореагента-вспенивателя на водно-спиртовой основе

№	Органо-неорганические ингредиенты	КХФ-ВС-МЗС-КС1вс	КХФ-ВС-МЗС-КС 2вс	КХФ-ВС-МЗС-КС 3вс	КХФ-ВС-МЗС-КС -4вс	КХФ-ВС-МЗС-КС 5вс
		Массовая часть, кг				
1	Композиционная порошкообразная модифицированная госсиполовая смола (10% водный раствор)	280	240	205	213	111
2	Композиционный полимерный клей (10% водный раствор)	260	230	200	150	100
3	Глицерин (50% вод.р)	220	350	440	470	590
4	Инжекционно-адгезионная фракция (ИАФ)	200	132,5	100	72	40
5	Лауриль сульфат натрия	15	20	25	50	94
6	Алкил бензол	10	15	20	37,5	60
7	Каустическая сода	15	12,5	10	7,5	5,0

Примечание: содержание компонентов предусмотрен для получения одной тонны композиционного флотореагента-вспенивателя.

Для исследования физико-химических и технологических свойств разработанных кондиционных композиционных химических флотореагентов-вспенивателей на водно-спиртовой основе класса КХФ-ВС-МЗС-КСвс была изучена зависимость состава разработанных флотореагентов-вспенивателей от плотности, вязкости и pH, по сравнению с флотореагентом Т-92, которые представлены на рисунках 1, 2 и 3.

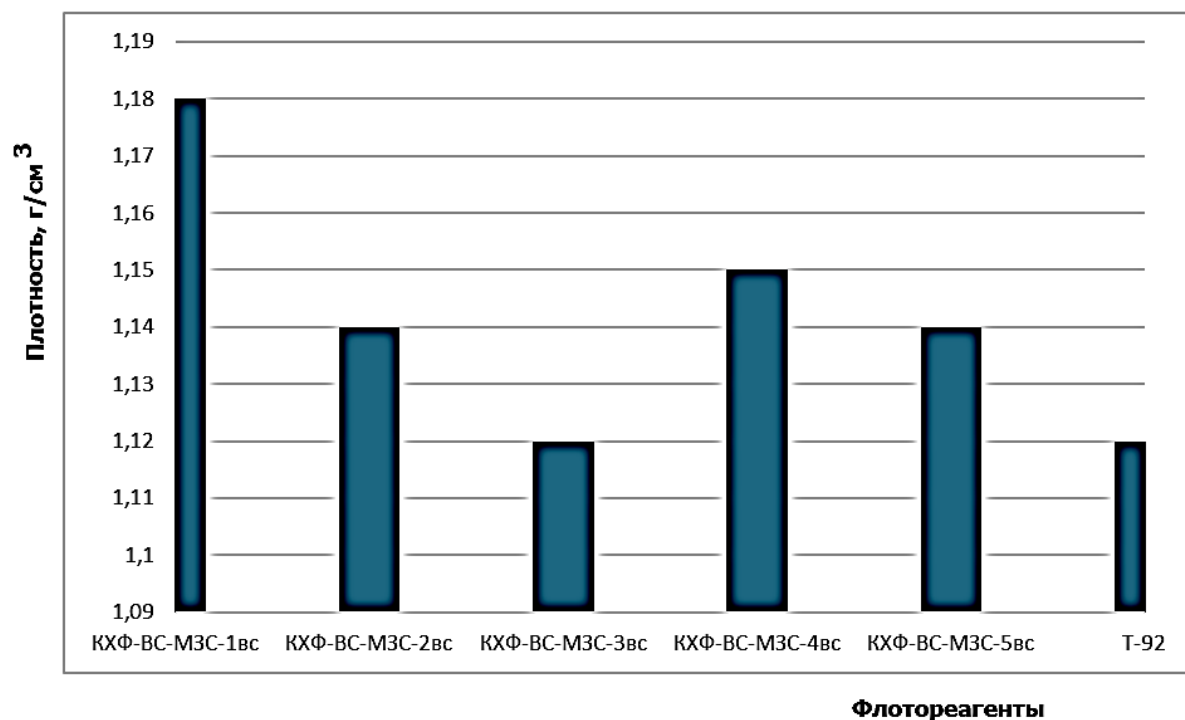


Рисунок 1. Зависимость плотности разработанных флотореагентов-вспенивателей от их состава сравнительно с флотореагентом Т-92

Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что разработанный композиционный химический флотореагент-вспениватель КХФ-ВС-МЗС-КС-3вс характеризуется значением плотности, сопоставимым с плотностью промышленного флотореагента-вспенивателя Т-92. Близость значений данного показателя свидетельствует о сходстве исследуемых реагентов по плотностным характеристикам и подтверждает возможность их сравнительной оценки при проведении дальнейших исследований пенообразующих и технологических свойств.

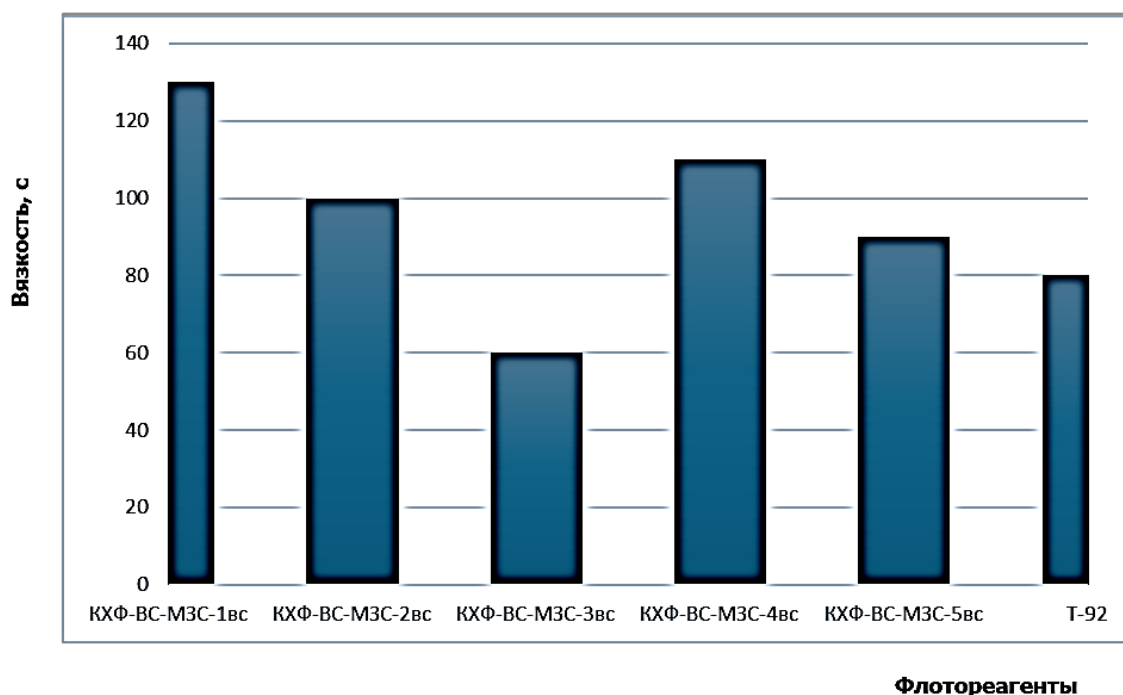


Рисунок 2. Зависимость вязкости разработанных флотореагентов-вспенивателей от их состава сравнительно с флотореагентом Т-92

Полученные экспериментальные данные по разработанным композиционным химическим флотореагентам-вспенивателям свидетельствуют о том, что образцы КХФ-ВС-МЗС-КС-2вс и КХФ-ВС-МЗС-КС-5вс характеризуются значениями вязкости, близкими к соответствующему показателю промышленного флотореагента-вспенивателя Т-92. В то же время образцы КХФ-ВС-МЗС-КС-1вс, КХФ-ВС-МЗС-КС-3вс и КХФ-ВС-МЗС-КС-4вс отличаются от Т-92 по величине вязкости. Выявленные различия обусловлены, вероятно, особенностями компонентного состава разработанных композиционных флотореагентов-вспенивателей и соотношением входящих в них органических и неорганических компонентов.

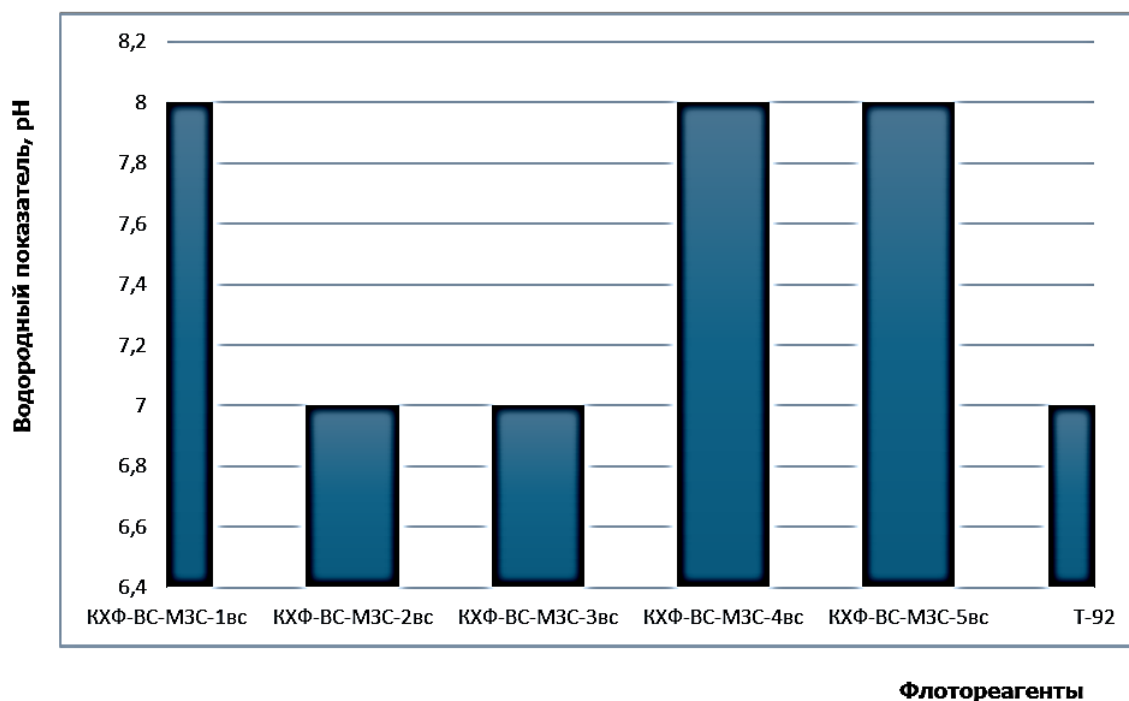


Рисунок 3. Зависимость показателя водорода (pH) разработанных флотореагентов-вспенивателей от их состава сравнительно с флотореагентом Т-92

Как следует из данных, представленных на рисунке 3, образцы КХФ-ВС-МЗС-КС-2вс и КХФ-ВС-МЗС-КС-3вс характеризуются нейтральной реакцией среды с водородным показателем $\text{pH} = 7$, что соответствует значению pH промышленного флотореагента-вспенивателя Т-92. Остальные разработанные композиционные химические флотореагенты-вспениватели имеют слабощелочную реакцию среды, соответствующую $\text{pH} = 8$. Таким образом, по показателю pH составы КХФ-ВС-МЗС-КС-2вс и КХФ-ВС-МЗС-КС-3вс наиболее близки к промышленному аналогу Т-92.

В таблице 4 приведены результаты исследований физико-химических свойств всех разработанных композиционных химических флотореагентов-вспенивателей класса КХФ-ВС-МЗС-КСвс на водно-спиртовой основе.

Таблица 4.

Физико-химические характеристики рассматриваемых составов композиционных флотореагентов-вспенивателей на водно-спиртовой основе

№	Образцы	γ , г/см ³	T_{500} с	pH	Внешний вид	Растворимость
1	КХФ-ВС-МЗС-КС-1вс	1,18	140	8	Темно-коричневый	Растворяются в воде и спиртах
2	КХФ-ВС- МЗС-КС-2вс	1,15	104	7	Темно-коричневый	Растворяются в воде и спиртах
3	КХФ-ВС- МЗС-КС-3вс	1,11	68	6	Светло-коричневый	Растворяются в воде и спиртах
4	КХФ-ВС- МЗС-КС-4вс	1,16	112	8	Темно-коричневый	Растворяются в воде и спиртах
5	КХФ-ВС- МЗС-КС-5вс	1,15	100	8	Темно-коричневый	Растворяются в воде и спиртах
6	Флотореагент Т-92	1,11	84	7	Светло-коричневый	Растворяются в воде и спиртах

Как известно, эффективное флотационное извлечение медно-молибденовых минералов и получение кондиционных концентратов в значительной степени зависят от величины водородного показателя (рН) флотационной пульпы. В соответствии с установленными технологическими условиями флотации медно-молибденовых руд оптимальный диапазон рН флотационной пульпы составляет 10,2–11,0. В связи с этим для корректировки щелочности флотационной пульпы в исследуемую систему вводили оксид кальция (СаО), с последующим доведением значения рН до требуемого диапазона 10,2–11,0.

На основании результатов проведенных исследований среди разработанных кондиционных составов был определен наиболее перспективный композиционный химический флотореагент-вспениватель КХФ-ВС-МЗС-КС-Звс, полученный на основе местного сырья и производственных отходов. Для выбранного состава проведено комплексное исследование физико-химических и пенообразующих свойств. Установлено, что по основным физико-химическим показателям КХФ-ВС-МЗС-КС-Звс характеризуется значениями, сопоставимыми с показателями промышленного флотореагента-вспенивателя Т-92, что свидетельствует о перспективности его дальнейшего технологического применения.

Установлено, что формирование требуемых физико-химических и пенообразующих характеристик композиционного флотореагента-вспенивателя класса КХФ-ВС-МЗС-КС определяется природой используемых компонентов, их физико-химическими свойствами, количественным содержанием и соотношением в композиции, а также особенностями флотируемого минерального сырья. Рациональное сочетание органо-неорганических компонентов в составе разработанного реагента обеспечивает формирование устойчивой пенной структуры и требуемых пенообразующих свойств, что создает предпосылки для его применения в процессе флотационного обогащения медно-молибденовых руд.

По результатам проведенных исследований композиционный химический флотореагент-вспениватель КХФ-ВС-МЗС-КС-Звс рекомендован для дальнейших лабораторно-производственных испытаний при флотационном обогащении руд цветных и благородных металлов. Разработанный реагент передан для проведения соответствующих испытаний в условиях опытно-обогатительной фабрики Технологического центра разработки и внедрения инновационных технологий (ОФ ТЦРиВИТ) АО «Алмалыкский ГМК».

Для дополнительного обоснования эффективности и установления особенностей химического строения разработанного композиционного флотореагента-вспенивателя КХФ-ВС-МЗС-КС-Звс были проведены исследования методом инфракрасной (ИК) спектроскопии. С целью сравнительной оценки полученных результатов аналогичные спектроскопические исследования были выполнены для промышленного флотореагента-вспенивателя Т-92. Результаты ИК-спектроскопических исследований разработанного реагента и промышленного аналога представлены на рисунках 4 и 5 соответственно.

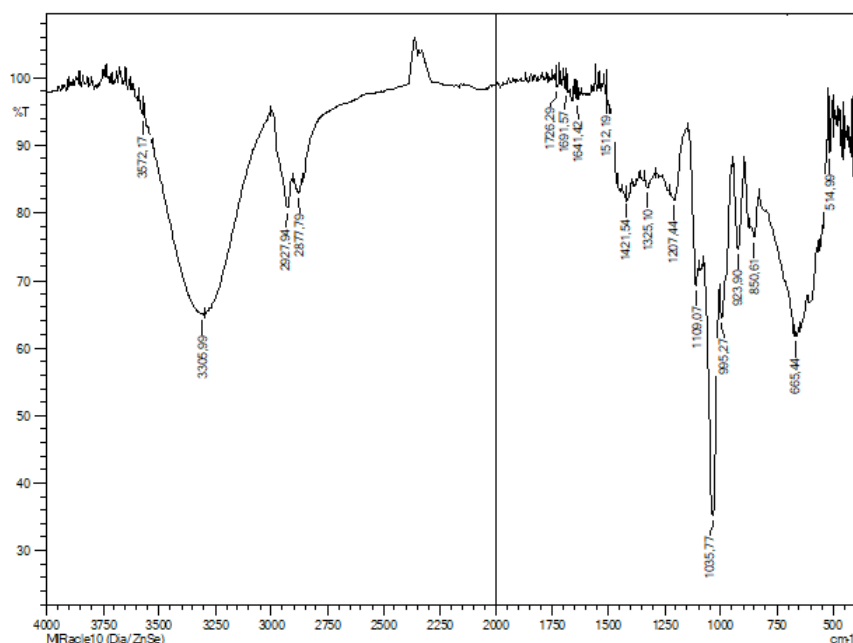


Рисунок 4. ИК-спектр флотореагента-вспенивателя КХФ-ВС-МЗС-Звс

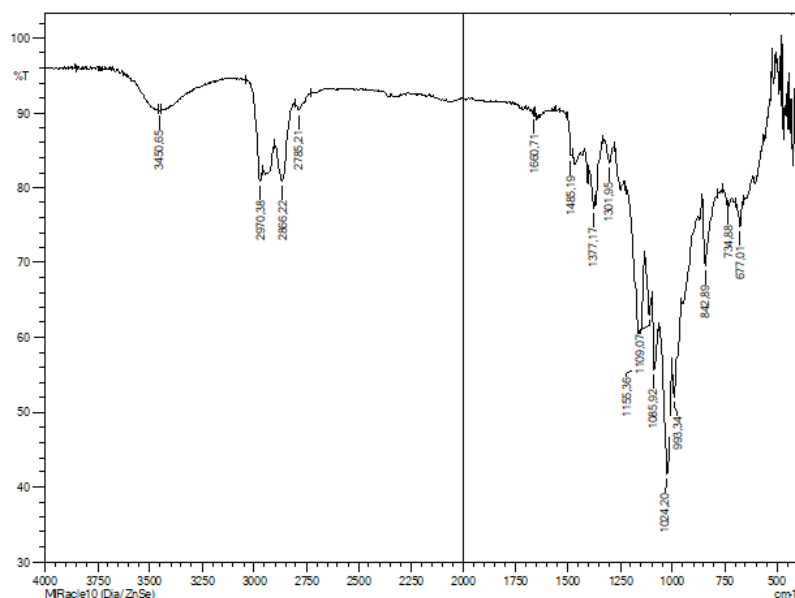


Рисунок 5. ИК-спектр стандартного флотореагента-вспенивателя Т-92

ИК-спектроскопическое исследование разработанного композиционного химического флотореагента-вспенивателя КХФ-ВС-МЗС-КС-Звс проведено с целью идентификации основных функциональных групп, формирующих его химическую структуру и определяющих физико-химические и эксплуатационные характеристики. Полученные ИК-спектры исследуемого композиционного флотореагента и промышленного аналога Т-92 представлены на рисунках 4 и 5.

В спектре КХФ-ВС-МЗС-КС-Звс наблюдается широкая интенсивная полоса поглощения в области $3306\text{--}3450\text{ см}^{-1}$, которая может быть отнесена к валентным колебаниям гидроксильных групп О–Н, характерных для спиртовых и других кислородсодержащих компонентов композиции. Наличие полос поглощения в области 1161, 1087, 1026 и 995 см^{-1} связано с колебаниями связей С–О и может свидетельствовать о присутствии эфирных фрагментов в составе исследуемого композиционного флотореагента. Наличие указанных

функциональных групп обуславливает комплекс поверхностно-активных и межфазных взаимодействий компонентов реагента, которые могут оказывать существенное влияние на формирование, дисперсность и устойчивость пенной структуры в процессе флотации [8, 17].

Таким образом, результаты ИК-спектроскопического анализа подтверждают наличие в составе КХФ-ВС-МЗС-КС-Звс кислородсодержащих функциональных групп, характерных для компонентов разработанной композиционной системы. Установленные структурные особенности в совокупности с полученными физико-химическими характеристиками свидетельствуют о перспективности применения разработанного реагента в качестве флотореагента-вспенивателя при флотационном обогащении медно-молибденовых руд.

Проведенные исследования показали, что формирование физико-химических и пенообразующих свойств композиционного химического флотореагента-вспенивателя КХФ-ВС-МЗС-КС-Звс определяется природой, составом, количественным соотношением и физико-химическими характеристиками входящих в композицию органо-неорганических компонентов, а также условиями проведения флотационного процесса и характеристиками перерабатываемого минерального сырья.

Заключение

В результате проведенных исследований разработаны кондиционные составы композиционных химических флотореагентов-вспенивателей класса КХФ-ВС-МЗС-КСвс на водно-спиртовой основе с использованием местного сырья и отходов производств. Проведена комплексная оценка их физико-химических характеристик и осуществлено сравнительное исследование с промышленным флотореагентом-вспенивателем Т-92. На основании совокупности полученных экспериментальных данных определен наиболее перспективный состав КХФ-ВС-МЗС-КС-Звс, характеризующийся оптимальным сочетанием плотности, вязкости, водородного показателя и пенообразующих свойств.

Установлено, что по основным физико-химическим показателям разработанный флотореагент КХФ-ВС-МЗС-КС-Звс характеризуется значениями, сопоставимыми с показателями промышленного аналога Т-92. При этом рациональное сочетание органо-неорганических компонентов обеспечивает формирование требуемых пенообразующих характеристик композиционного реагента, что подтверждает перспективность его использования при флотационном обогащении медно-молибденовых руд.

Результаты ИК-спектроскопического анализа свидетельствуют о наличии в составе КХФ-ВС-МЗС-КС-Звс гидроксильных и эфирных функциональных групп, которые могут участвовать в межфазных взаимодействиях и оказывать влияние на формирование и стабилизацию пенной структуры. Полученные результаты позволяют связать особенности химического состава разработанного реагента с его физико-химическими и эксплуатационными характеристиками.

Разработанный композиционный химический флотореагент-вспениватель КХФ-ВС-МЗС-КС-Звс рекомендован для дальнейшей экспериментально-технологической оценки и передан для проведения лабораторно-производственных испытаний на опытно-обогатительной фабрике Технологического центра разработки и внедрения инновационных технологий (ОФ ТЦРиВИТ) АО «Алмалыкский ГМК». Проведение испытаний направлено

на установление технологической эффективности разработанного реагента и оценку его влияния на показатели флотационного обогащения медно-молибденовых руд месторождения «Кальмакыр».

Список литературы

1. Абрамов А.А. Абрамов А.А. Требования к выбору и конструированию селективных реагентов-собирателей. Ч. 2. Требования к физико-химическим свойствам селективного собирателя // Цв. металлы. – 2012. – № 5.
2. Абрамов А.А. Абрамов А.А. Флотационные методы обогащения. Москва: МГГУ. – 710 С. с. – Москва: МГГУ, 2008. – 710 с.
3. Абрамов А.А. Флотационные методы обогащения: Учебник. 4-е изд. – Москва: Издательство «Горная книга», 2016. – 595 с.
4. Абрамов А.А. Флотация. Реагенты-собиратели: Учебное пособие. Собрание сочинений: Т. 7: – М.: Издательство «Горная книга», 2012. – С. 462.
5. Авдохин В.М. Основы обогащения полезных ископаемых: Учебник для вузов: В 2 т. – М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2006. – Т. 1. Обогачительные процессы. – С. 314.
6. Байченко А.А., Батушкин А.Н. Влияние аполярного реагента на прочность закрепления частиц на пузырьке воздуха при флотации // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2005. – № 4.
7. Бочаров В.А., Рыскин М.Я. Технология кондиционирования и селективной флотации руд цветных металлов. – М.: Недра, 1993. – 288 с.
8. Бухоров Ш.Б., Хайдаров А.А., Хамраев С.С. Композиционные пенообразующие реагенты на основе отхода местного производства при флотации медно-молибденовых руд // Журн. Композиционные материалы. Ташкент. – 2009. – № 1.
9. Горячев Б.Е. Особенности действия флотационных сил на частицы с химически неоднородной поверхностью // Цветные металлы. – 2002. – № 1.
10. Григорьев А.А. Производство флотореагентов // Катализ и нефтехимия. – 2001. – № 9.
11. Григорьев А.А. Производство флотореагентов / А.А. Григорьев // Катализ и нефтехимия. – 2001. – № 9–10.
12. Кенжалиев Б.К., Тусупбаев Н.К., Медяник Н.Л., Семушкина Л.В. Изучение физико-химических и флотационных характеристик композиционных флотореагентов // Разработка полезных ископаемых. – 2019. – Т. 17, № 3. – DOI: 10.18503/1995-2732-2019-17-3-4-11.
13. Осеров Т.Б. О кинетике флотационного процесса / Т.Б. Осеров, Г.Д. Гусейнова // Вестник Национальной инженерной академии Республики Казахстан. – 2018. – № 2. – С. 47–52.
14. Родина Т.А. Флотационные реагенты: учебное пособие для самостоятельной работы по органической химии / Т.А. Родина. – Благовещенск: Изд-во АмГУ, 2015. – 36 с.
15. Рябой В.И. Проблема использования и разработки новых флотореагентов в России // Цветные металлы. – 2011. – № 3.

16. Рябой В.И. Проблема использования и разработки новых флотореагентов в России // Цветные металлы. – 2011. – № 3.
17. Сорокин М.М. Флотационные методы обогащения. Химические основы флотации: Учебное пособие. Издательство «МИСИС». – 2011. – 411 с.
18. Тропман Э.П., Сулаквелидзе Н.В., Ермаков Л.М. Промышленные испытания нового спиртового вспенивателя ОФС (Ин-т «ВНИИцветмет», Ленинагорская обогатительная фабрика) // «Цветные металлы». – 2001. – № 11.
19. Челноков А.А., Ющенко Л.Ф., Жмыхов И.Н., Юращик К.К. Обращение с отходами // Учебное пособие. Издательство «Вышэйшая школа» Минск. – 2018.
20. Юшина Т.И. Материаловедение. Флотационные реагенты. Учебное пособие. Часть 1. С. 123. – М.: МГГУ, 2002.
21. Negmatova K.S.A. Kh. Khursanov, S.S. Negmatov, M.E. Ikramova, J.N. Negmatov. Development of Import Substitutional Composite Chemical Flotoreagents Based on Local Raw Materials and Production Waste for Flotation of Non-Ferrous and Premium Metal Ore // JOURNAL OF OPTOELECTRONICS LASER ISSN:1005–0086. – 2022. – Т. 41, № 6. URL: <http://www.gdzjg.org/index.php/JOL/article/view/619>.

References

1. Abramov A.A. [Abramov A.A. Requirements for the Selection and Design of Selective Collector Reagents]. Ch. 2. Trebovaniya k fiziko-khimicheskim svojstvam selektivnogo sobiratelya // Tsv. metally. – 2012. – No. 5. (In Russ.)
2. Abramov A.A. [Abramov A.A. Flotation Methods of Ore Dressing. Moscow: MGGU]. – 710 S. – Moskva: MGGU, 2008. – 710 s. s (In Russ.)
3. Abramov A.A. [Flotation Methods of Ore Dressing: Textbook. 4th Edition]. – Moskva: Izdatel'stvo «Gornaya kniga», 2016. – 595 s (In Russ.)
4. Abramov A.A. [Flotation. Collector Reagents: Textbook. Collected Works: Vol. 7: – M.: Publishing House 'Mining Book', 2012]. – S. 462 (In Russ.)
5. Avdokhin V.M. [Fundamentals of Mineral Enrichment: Textbook for Universities: In 2 volumes]. – M.: Izdatel'stvo Moskovskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta, 2006. – Т. 1. Obogatitel'nye protsessy. – S. 314 (In Russ.)
6. Bajchenko A.A., Batushkin A.N. [Effect of Nonpolar Reagent on the Strength of Particle Attachment to Air Bubbles in Flotation] // Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2005. – No. 4. (In Russ.)
7. Bocharov V.A., Ryskin M.Ya. [Technology of Conditioning and Selective Flotation of Non-Ferrous Metal Ores]. – M.: Nedra, 1993. – 288 s (In Russ.)
8. Bukhorov Sh.B., Khajdarov A.A., Khamraev S.S. [Composite Foaming Reagents Based on Local Production Waste in Copper-Molybdenum Ore Flotation] // Zhurn. Kompozitsionnye materialy. Tashkent. – 2009. – No. 1. (In Russ.)
9. Goryachev B.E. [Characteristics of the Action of Flotation Forces on Particles with Chemically Heterogeneous Surfaces] // Tsvetnye metally. – 2002. – No. 1. (In Russ.)

10. Grigor'ev A.A. [Production of Flotation Reagents] // Kataliz i neftekhimiya. – 2001. – No. 9. (In Russ.)
11. Grigor'ev A.A. [Production of Flotation Reagents] // Kataliz i neftekhimiya. – 2001. – No. 9. (In Russ.)
12. Kenzhaliev B.K., Tusupbaev N.K., Medyanik N.L., Semushkina L.V. [Study of Physicochemical and Flotation Characteristics of Composite Flotation Reagents] // Razrabotka poleznykh iskopaemykh. – 2019. – Vol. 17, No. 3. – DOI: 10.18503/1995-2732-2019-17-3-4-11. (In Russ.)
13. Oserov T.B., Gusejnova G.D. [On the Kinetics of the Flotation Process] // Zhurnal: «Vestnik Natsional'noj inzhenernoj akademii Respubliki Kazakhstan. – 2018. – No. 2. (In Russ.)
14. Rodina T.A. [Flotation Reagents: Study Guide for Independent Work in Organic Chemistry]. – Blagoveshchensk: Izd-vo AmGU, 2015. – 36 s (In Russ.)
15. Ryaboj V.I. [The Problem of Use and Development of New Flotation Reagents in Russia] // Tsvetnye metally. – 2011. – No. 3. (In Russ.)
16. Ryaboj V.I. [The Problem of Use and Development of New Flotation Reagents in Russia] // Tsvetnye metally. – 2011. – No. 3. (In Russ.)
17. Sorokin M.M. [Flotation Methods of Ore Dressing. Chemical Bases of Flotation: Study Guide. MISIS Publishing House]. – 411 s. – 2011. (In Russ.)
18. Tropman E.P., Sulakvelidze N.V., Ermakov L.M. [Industrial Trials of a New Alcohol Foamer OFS (Institute 'VNIItsvetmet', Leningorsk Concentration Plant)] // «Tsvetnye metally». – 2001. – No. 11. (In Russ.)
19. Chelnokov A.A., Yushchenko L.F., Zhmykhov I.N., Yurashchik K.K. [Waste Management] // Uchebnoe posobie. Izdatel'stvo «Vyshejschaya shkola» Minsk. – 2018. (In Russ.)
20. Yushina T.I. [Materials Science. Flotation Reagents. Educational Manual. Part 1. P. 123]. – M.: MGGU, 2002 (In Russ.)
21. Negmatova K.S.A.Kh. Khursanov, S.S. Negmatov, M.E.Ikramova, J.N. Negmatov. Development of Import Substitutional Composite Chemical Flotoreagents Based on Local Raw Materials and Production Waste for Flotation of Non-Ferrous and Premium Metal Ore // JOURNAL OF OPTOELECTRONICS LASER ISSN:1005–0086. – 2022. – Vol. 41, No. 6 – URL: <http://www.gdzjg.org/index.php/JOL/article/view/619> (дата обращения: 14.09.2026).

Статья поступила в редакцию: 23.07.2026

Статья принята к публикации: 28.07.2026

Статья опубликована: 28.09.2026

УДК 628.3+661.9

Синтез многофункционального композитного сорбента-коагулянта на основе шафирканского бентонита и биоугля стеблей хлопчатника и механизм очистки сточных вод

Раззақов Ҳасан Қаландарович

канд. техн. наук, проф., проф.

кафедры химии и нефтегазовой технологии Бухарский государственный университет

Республика Узбекистан, г. Бухара

E-mail: s.i.nazarov@buxdu.uz

Аскарлова Гулчиroy Ахрор кизи

магистрант

Бухарский государственный университет

Республика Узбекистан, г. Бухара

Synthesis of a multifunctional composite sorbent-coagulant based on Shafirkan bentonite and cotton-stalk biochar and the mechanism of wastewater treatment

Razzaqov Hasan Qalandarovich

professor, Candidate of Technical Sciences, Professor

of the Department of Chemistry and Oil and Gas Technology, Bukhara State University

Uzbekistan, Bukhara

Askarova Gulchiroy Ahror qizi

master's student of Bukhara State University

Uzbekistan, Bukhara

Аннотация

Цель работы состояла в получении многофункционального композитного материала, одновременно проявляющего сорбционные и коагулирующие свойства, и в установлении механизма его действия при очистке сточных вод текстильных и нефтегазовых предприятий. Композит синтезировали пропиткой активированного биоугля стеблей хлопчатника и термически обработанного шафирканского бентонита кислым раствором солей железа(III) и алюминия с последующим прокаливанием при 350 °С. Текстульные и структурные характеристики определяли методами низкотемпературной адсорбции азота (БЭТ), рентгенофазового анализа, ИК-Фурье-спектроскопии и растровой электронной микроскопии. Установлено, что при соотношении *бентонит: биоуголь* 2:1 и концентрации активаторов 10 % достигается удаление метиленового синего на 97,8 %, нефтепродуктов — на 93,4 %.

Библиографическое описание: Раззақов Ҳ.Қ., Аскарлова Г.А. кизи Синтез многофункционального композитного сорбента-коагулянта на основе шафирканского бентонита и биоугля стеблей хлопчатника и механизм очистки сточных вод // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 9(150). URL: <https://universum.com/ru/tech/archive/item/23240>

Предельная сорбционная ёмкость по модели Ленгмюра составила 128,2 мг/г; кинетика описывается уравнением псевдвторого порядка. Показана устойчивость материала в пяти циклах регенерации.

Abstract

The aim of the study was to obtain a multifunctional composite material combining sorption and coagulation properties and to establish the mechanism of its action in the treatment of wastewater from textile and oil-and-gas enterprises. The composite was synthesised by impregnating activated cotton-stalk biochar and thermally treated Shafirkan bentonite with an acidic solution of iron(III) and aluminium salts, followed by calcination at 350 °C. Textural and structural characteristics were determined by low-temperature nitrogen adsorption (BET), X-ray diffraction, FTIR spectroscopy and scanning electron microscopy. At a bentonite-to-biochar ratio of 2:1 and an activator concentration of 10 %, methylene blue removal reached 97.8 % and oil product removal 93.4 %. The Langmuir maximum sorption capacity was 128.2 mg/g, and the kinetics followed the pseudo-second-order equation. The material remained stable over five regeneration cycles.

Ключевые слова: бентонит, биоуголь, стебли хлопчатника, композитный сорбент-коагулянт, пилларинг, адсорбция, коагуляция, сточные воды, изотерма Ленгмюра, регенерация.

Keywords: bentonite, biochar, cotton stalks, composite sorbent-coagulant, pillaring, adsorption, coagulation, wastewater, Langmuir isotherm, regeneration.

Введение

Самым сложным направлением очистки промышленных сточных вод является удаление загрязнителей различной природы, поскольку текстильные и нефтегазовые предприятия формируют стоки с разными физико-химическими характеристиками. Текстильные сточные воды содержат устойчивые органические красители и характеризуются высокой цветностью и значительным содержанием органических веществ, тогда как нефтегазовые воды содержат эмульгированные нефтепродукты, механические примеси и взвешенные частицы [13; 15]. Для удаления таких компонентов обычно применяются сорбционные и коагуляционно-флокуляционные методы, эффективность которых определяется свойствами используемых материалов и механизмами взаимодействия загрязнителей с поверхностью сорбентов [5; 7–9; 14].

Перспективными материалами для очистки сточных вод являются природные глинистые минералы и углеродные сорбенты. Bentonитовые глины на основе монтмориллонита обладают высокой доступностью, катионообменной способностью и химической устойчивостью, однако их сорбционные характеристики ограничены вследствие недостаточной развитости пористой структуры [3; 4]. В то же время биоуголь, получаемый пиролизом растительных отходов, отличается развитой поверхностью и эффективностью удаления органических соединений, но практически не обладает коагулирующими свойствами [10; 13; 15].

Одним из эффективных способов улучшения свойств бентонита является его модификация полигидрохсокомплексами железа и алюминия, позволяющая увеличить межслоевое пространство минерала и сформировать активные центры коагуляции [6; 11]. Объединение модифицированного бентонита с биоуглём в составе единого композита создаёт возможность получения материала двойного действия, способного одновременно удалять растворённые органические вещества, нефтепродукты и дисперсные примеси. Однако влияние состава композита, концентрации активирующих компонентов и условий получения на его эксплуатационные свойства изучено недостаточно [3; 12].

Республика Узбекистан обладает значительными запасами бентонитовых глин, включая Шафирканское месторождение Бухарской области, а также большими объёмами отходов хлопководства, пригодных для получения биоугля. Использование местного сырья позволяет снизить стоимость очистных материалов и повысить экологическую эффективность их применения. В связи с этим целью настоящей работы является получение композитного сорбента-коагулянта на основе шафирканского бентонита и биоугля стеблей хлопчатника, изучение влияния условий модификации и термообработки на его свойства, а также оценка эффективности применения при очистке сточных вод промышленных предприятий [1].

Материалы и методы исследования

Бентонит Шафирканского месторождения измельчали (<0,25 мм) и термообрабатывали при 200 °С. Стебли хлопчатника сушили, измельчали и подвергали пиролизу при 450 °С в бескислородной среде с выходом биоугля 28,6 %. Композит синтезировали смешением бентонита и биоугля с растворами FeCl_3 и $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ при $\text{Fe} = 1:1$ и pH 2,0–3,0. Смесь перемешивали в течение 18 часов, фильтровали, сушили при 105 °С и подвергали термообработке. Параметры синтеза представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Условия синтеза серии композитных образцов

Образец	Бентонит : био- уголь, масс.	Концентрация ак- тиваторов, %	Температура прокаливания, °С	Продолжительность прокаливания, ч
КСК-1	1:1	10	350	1,5
КСК-2	2:1	10	350	1,5
КСК-3	3:1	10	350	1,5
КСК-4	4:1	10	350	1,5
КСК-5	5:1	10	350	1,5
КСК-2а	2:1	5	350	1,5
КСК-2б	2:1	15	350	1,5
КСК-2в	2:1	10	300	1,0
КСК-2г	2:1	10	400	2,0

Методы исследования материала. Структурные характеристики композита определяли методом низкотемпературной адсорбции азота (77 К) по модели БЭТ и методом ВЖН. Фазовый состав исследовали рентгенофазовым анализом, функциональные группы поверхности — ИК-Фурье спектроскопией, морфологию и элементный состав —

электронной микроскопией с энергодисперсионным анализом. Сорбционные свойства изучали в статических условиях с использованием раствора метиленового синего. Концентрацию красителя определяли фотоколориметрически, нефтепродукты — ИК-методом, мутность и ХПК — стандартными аналитическими методами. Все эксперименты выполняли в трёх повторностях.

Степень очистки (η , %) и сорбционную ёмкость (q , мг/г) рассчитывали по уравнениям (1) и (2):

$$\eta = (C_0 - C) / C_0 \cdot 100 \% \quad (1)$$

$$q = (C_0 - C) \cdot V / m \quad (2)$$

где C_0 и C — исходная и равновесная концентрации загрязнителя, мг/л; V — объём раствора, л; m — масса сорбента, г.

Кинетику описывали моделями псевдопервого (ППП) и псевдвторого (ПВП) порядка, равновесие — уравнениями Ленгмюра и Фрейндлиха [5; 8; 9]. Адекватность моделей оценивали по коэффициенту детерминации R^2 и по расхождению расчётной и экспериментальной ёмкостей.

Реальные сточные воды. Испытания проводили на пробах сточных вод текстильного предприятия и площадке подготовки нефти Бухарской области. Дозу композита варьировали в пределах 0,5–3,0 г/л, продолжительность контакта — 60 минут, отстаивание — 30 минут.

Результаты и обсуждение

Текстурные характеристики композитов

Исходный шафирканский бентонит характеризуется удельной поверхностью 62 м²/г, что типично для природных монтмориллонитовых глин. Пиролиз стеблей хлопчатника с последующей активацией обеспечивает получение биоугля с поверхностью 415 м²/г. Введение бентонита в углеродную матрицу закономерно снижает суммарную удельную поверхность композита (рис. 1), однако одновременно формирует ионообменные центры и резервуар катионов-коагулянтов.

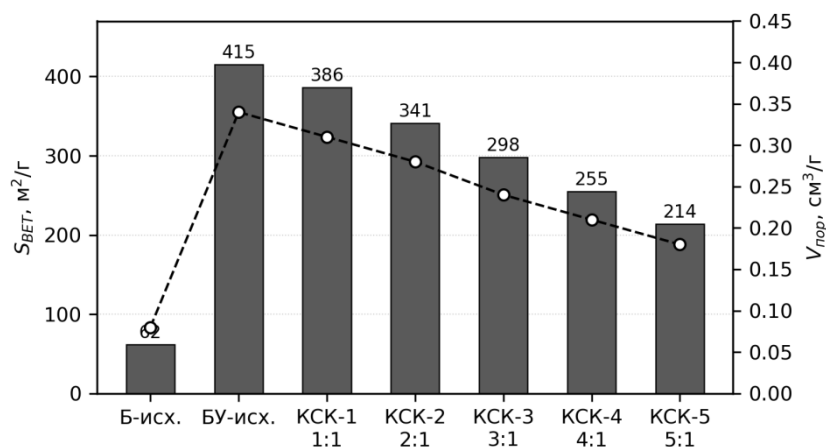


Рисунок 1. Удельная поверхность (столбцы) и суммарный объем пор (линия) исходных компонентов и композитов различного состава

Данные рентгенофазового анализа и результаты низкотемпературной адсорбции азота обобщены в таблице 2. Смещение базального рефлекса $d(001)$ монтмориллонита от 1,24 до 1,68 нм подтверждает внедрение полигидрохсокомплексов железа и алюминия в межслоевое пространство и образование столбчатой структуры. На дифрактограммах прокалённых образцов дополнительно фиксируются слабые рефлексы, отвечающие рентгеноаморфным оксигидроксидам железа; отсутствие интенсивных линий кристаллического гематита свидетельствует о высокой дисперсности закреплённой фазы.

Таблица 2.

Структурно-текстурные характеристики исходных компонентов и композитов

Образец	$S(ВЕТ)$, м²/г	V пор, см³/г	D пор, нм	$d(001)$, нм	Содержание Fe + Al, масс. %
Бентонит исходный	62	0,08	6,4	1,24	—
Биоуголь исходный	415	0,34	3,3	—	—
КСК-1 (1:1)	386	0,31	3,2	1,62	6,8
КСК-2 (2:1)	341	0,28	3,4	1,68	9,1
КСК-3 (3:1)	298	0,24	3,5	1,66	10,4
КСК-4 (4:1)	255	0,21	3,6	1,61	11,2
КСК-5 (5:1)	214	0,18	3,8	1,58	11,9

ИК-спектры композитов содержат полосы при 1035 см⁻¹ (Si–O–Si силикатного каркаса), 915 и 795 см⁻¹ (Al–OH–Al и Si–O–Al), 3620 см⁻¹ (структурные OH-группы). Полосы 560–470 см⁻¹ относят к колебаниям Fe–O и Al–O вновь образованной оксидной фазы. Сохранение полос 1580 и 1710 см⁻¹ (ароматические C=C и карбоксильные C=O группы) указывает на то, что при выбранном режиме прокаливания углеродная матрица не выгорает. Микрофотографии РЭМ показывают закрепление глобулярных частиц размером 40–90 нм на стенках транспортных пор биоугля и на торцах силикатных пакетов.

Влияние состава композита на эффективность очистки

Зависимость эффективности удаления загрязнителей от соотношения *бентонит: биоуголь* имеет отчётливо выраженный экстремальный характер (рис. 2). Удаление красителя достигает максимума при соотношении 2:1, поскольку в этой области сохраняется достаточно развитая пористая структура углеродной фазы при уже сформированных ионообменных центрах. Показатели удаления нефтепродуктов и мутности продолжают расти до соотношения 3:1, что объясняется увеличением содержания катионов-гидролизаторов и, соответственно, коагулирующей способности материала.

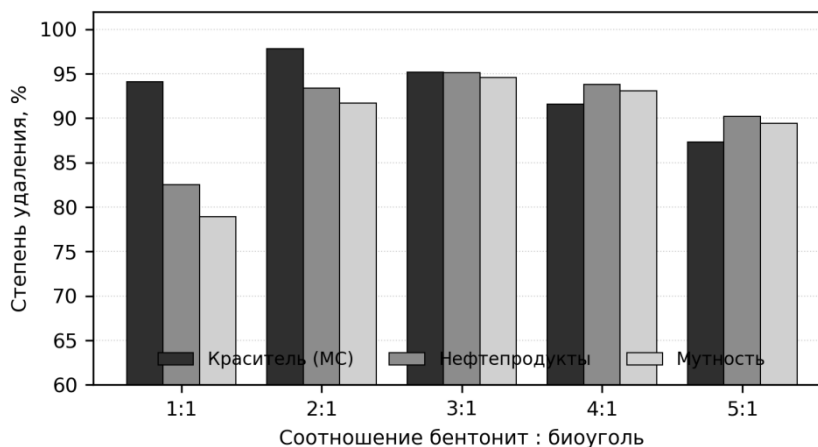


Рисунок 2. Влияние соотношения бентонит: биоуголь на степень удаления загрязнителей (доза 1 г/л, pH 7, время контакта 60 мин.)

Компромиссным по совокупности показателей признан образец КСК-2 (соотношение 2:1), обеспечивающий удаление красителя на 97,8 % при удалении нефтепродуктов 93,4 % и мутности 91,7 %. Дальнейшее увеличение доли бентонита нецелесообразно: при соотношении 5:1 сокращение удельной поверхности до 214 м²/г приводит к падению сорбции красителя более чем на 10 процентных пунктов.

Концентрация активаторов и режим прокаливания также существенно влияют на функциональные свойства (табл. 3). При содержании солей 5 % количество закреплённых катионов недостаточно для формирования устойчивой коагулирующей фазы. Повышение концентрации до 15 % вызывает частичную блокировку пор избыточным оксигидроксидом: удельная поверхность снижается на 15 %, а прирост эффективности отсутствует. Прокаливание при 300 °С не обеспечивает полного перехода гидроксидов в закреплённую оксидную форму, вследствие чего вымывание железа в раствор достигает 0,21 мг/л. При 400 °С наблюдается частичное выгорание углеродной составляющей и уменьшение сорбционной ёмкости.

Таблица 3.

Влияние концентрации активаторов и режима прокаливания на свойства композита (основа — соотношение 2:1)

Образец	Конц. активаторов, %	Режим, °С / ч	Удаление МС, %	Удаление нефте-продуктов, %	Вымывание Fe в фильтрат, мг/л
КСК-2а	5	350 / 1,5	92,4	88,1	0,04

Образец	Конц. активаторов, %	Режим, °С / ч	Удаление МС, %	Удаление нефте-продуктов, %	Вымывание Fe в фильтрат, мг/л
КСК-2	10	350 / 1,5	97,8	93,4	0,09
КСК-2б	15	350 / 1,5	95,6	92,0	0,18
КСК-2в	10	300 / 1,0	94,1	89,7	0,21
КСК-2г	10	400 / 2,0	93,0	91,5	0,05

Таким образом, оптимальными условиями синтеза следует считать соотношение *бентонит: биоуголь* 2:1, суммарную концентрацию активаторов 10 % и прокаливание при 350 °С в течение 1,5 ч. Величина вымывания железа при этих условиях (0,09 мг/л) остаётся ниже предельно допустимой концентрации для сбрасываемых вод, что важно с точки зрения вторичного загрязнения.

Влияние pH среды

Кислотность среды определяет как заряд поверхности композита, так и форму существования гидролизованых катионов (рис. 3). В сильнокислой области (pH 2–3) поверхность материала заряжена положительно, а гидролиз Fe^{3+} и Al^{3+} подавлен, поэтому оба механизма реализуются слабо. Точка нулевого заряда композита КСК-2, определённая методом дрейфа pH, составила 6,4. При pH выше этого значения поверхность приобретает отрицательный заряд, что усиливает электростатическое притяжение катионного красителя и объясняет максимум сорбции при pH 6–8.

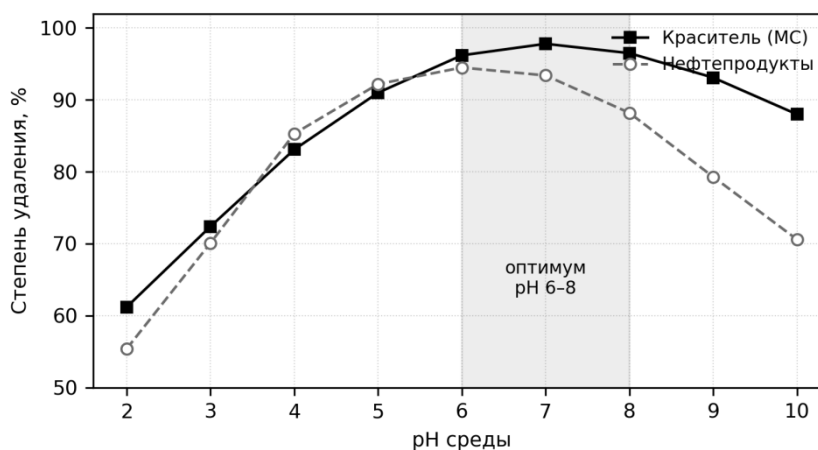


Рисунок 3. Влияние pH на степень удаления метиленового синего и нефтепродуктов (доза 1 г/л, время контакта 60 мин.)

Коагуляционная составляющая наиболее эффективна при pH 5–7, когда преобладают полиядерные гидроксокомплексы с высоким положительным зарядом, нейтрализующие заряд эмульгированных нефтяных капель. В щелочной области (pH ≥ 9) образуются анионные формы $[\text{Al}(\text{OH})_4]^-$, коагулирующее действие ослабевает, и удаление нефтепродуктов снижается до 70–79 %. Совмещение обоих механизмов достигается в интервале pH 6–8, который практически совпадает с реакцией большинства производственных стоков и не требует предварительного подкисления.

Кинетика и равновесие сорбции

Кинетические кривые (рис. 4, а) показывают, что около 80 % равновесной ёмкости достигается за первые 20 минут контакта, а равновесие устанавливается через 90 минут. Быстрая начальная стадия отвечает показателю сорбции на легкодоступных внешних центрах, последующее замедление связано с диффузией молекул красителя в мезопористой структуре.

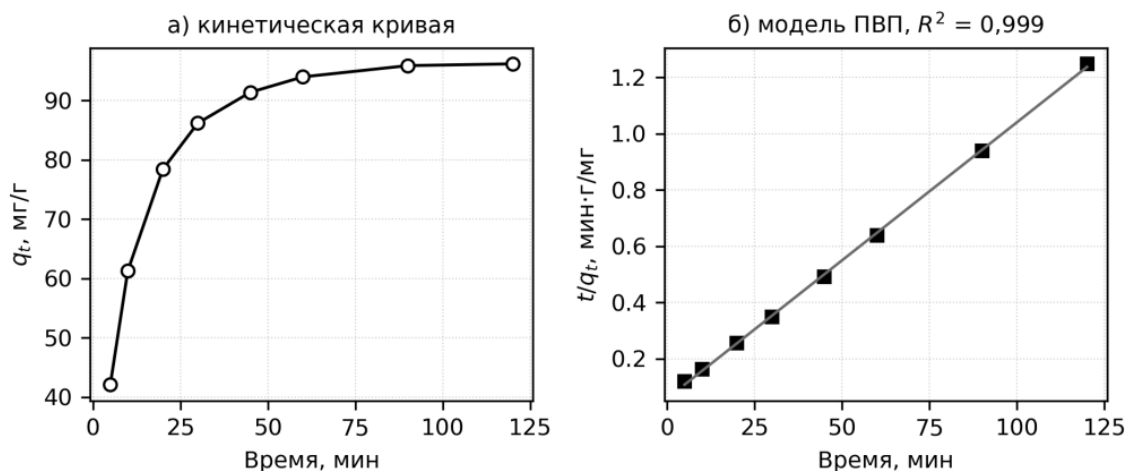


Рисунок 4. Кинетика сорбции метиленового синего композитом КСК-2: а) экспериментальная кривая; б) линейаризация в координатах модели псевдвторого порядка

Результаты обработки экспериментальных данных кинетическими и равновесными моделями приведены в таблице 4. Модель псевдвторого порядка описывает процесс существенно точнее ($R^2 = 0,999$), а расчётная ёмкость 98,0 мг/г практически совпадает с экспериментальной 96,2 мг/г, что указывает на определяющую роль хемосорбционного взаимодействия. Равновесные данные лучше согласуются с уравнением Ленгмюра, то есть сорбция протекает преимущественно на энергетически однородных центрах с образованием монослоя.

Таблица 4.

Параметры кинетических и равновесных моделей сорбции для образца КСК-2

Модель	Параметр	Метиленовый синий	Нефтепродукты
Псевдопервого порядка	$k_1, \text{мин}^{-1} / R^2$	0,041 / 0,962	0,038 / 0,948
Псевдвторого порядка	$k_2, \text{г}/(\text{мг} \cdot \text{мин}) / R^2$	0,0021 / 0,999	0,0026 / 0,997
Псевдвторого порядка	$q(\text{расч.}), \text{мг}/\text{г}$	98,0	74,1
Эксперимент	$q(\text{эксп.}), \text{мг}/\text{г}$	96,2	72,8
Ленгмюра	$q(\text{max}), \text{мг}/\text{г}$	128,2	96,5
Ленгмюра	$K(L), \text{л}/\text{мг} / R^2$	0,086 / 0,996	0,074 / 0,991
Фрейндлиха	$K(F) / n / R^2$	28,4 / 2,94 / 0,958	19,7 / 2,61 / 0,944
Внутридиффузионная	$k(id), \text{мг}/(\text{г} \cdot \text{мин}^{0,5}) / R^2$	6,42 / 0,913	5,18 / 0,905

Испытания на реальных сточных водах

Результаты обработки производственных стоков композитом КСК-2 при дозе 2 г/л приведены в таблице 5. Для сравнения указаны показатели, полученные при отдельном применении исходного бентонита и биоугля в эквивалентной суммарной дозе.

Таблица 5.

Показатели очистки реальных сточных вод (доза 2 г/л, контакт 60 мин., отстаивание 30 мин.)

Показатель	До очистки	После КСК-2	Эффект, %	Бентонит, %	Биоуголь, %
Текстильные сточные воды					
Цветность, град.	1250	75	94,0	48,2	76,5
ХПК, мг О ₂ /л	980	176	82,0	31,4	60,8
Взвешенные вещества, мг/л	215	16	92,6	70,3	44,1
рН	8,9	7,4	—	—	—
Нефтегазовые сточные воды					
Нефтепродукты, мг/л	48,6	2,3	95,3	52,7	68,4
Взвешенные вещества, мг/л	320	18	94,4	74,8	40,2
ХПК, мг О ₂ /л	620	131	78,9	29,6	55,3
Мутность, ЕМФ	186	9	95,2	71,5	38,7

Композит превосходит каждый из исходных компонентов по всем контролируемым показателям, причём превышение не сводится к простому суммированию их вкладов. Так, эффект удаления нефтепродуктов композитом (95,3 %) существенно выше, чем у бентонита (52,7 %) и биоугля (68,4 %), взятых по отдельности. Это указывает на синергетический характер действия материала: коагулированные флоккулы нефтяной эмульсии осаждаются на развитой углеродной поверхности, а сорбированные на ней растворённые компоненты выводятся из системы вместе с осадком.

Заключение

Получен многофункциональный сорбент-коагулянт на основе шафирканского бентонита и биоугля стеблей хлопчатника, модифицированных соединениями Fe(III) и Al. Определены оптимальные условия синтеза: соотношение *бентонит: биоуголь* 2:1, концентрация активаторов 10 %, термообработка при 350 °С в течение 1,5 ч.

Формирование модифицированной структуры подтверждено увеличением межслоевого расстояния монтмориллонита и ростом удельной поверхности до 341 м²/г. Материалом проявлена высокая сорбционная активность в диапазоне рН 6–8. Максимальная сорбционная ёмкость составила 128,2 мг/г по метиленовому синему и 96,5 мг/г по нефтепродуктам.

Испытания на реальных сточных водах показали эффективное удаление цветности (94,0 %), ХПК (82,0 %), нефтепродуктов (95,3 %) и взвешенных веществ (94,4 %). Композит сочетает адсорбционные, ионообменные и коагуляционные свойства, сохраняет более 85 % активности после пяти циклов регенерации и, следовательно, наблюдается его перспектива относительно применения в локальных системах очистки промышленных сточных вод.

Список литературы

1. Раззақов Х. Қ., Амонов М.Р., Назаров С.И. Получение сорбентов на основе механической активации сапропелевого сырья // *Universum: технические науки: электрон. научн. журн.* – 2026. – № 6 (147).
2. Ahmaruzzaman M. Industrial wastes as low-cost potential adsorbents for the treatment of wastewater laden with heavy metals // *Advances in Colloid and Interface Science.* – 2011. – T. 166, № 1–2. – P. 36–59. – DOI: 10.1016/j.cis.2011.04.005.
3. Bergaya F., Lagaly G. *Handbook of Clay Science.* – 2nd ed. – Amsterdam: Elsevier, 2013. – 1752 P.
4. Bhattacharyya K.G., Gupta S.S. Adsorption of a few heavy metals on natural and modified kaolinite and montmorillonite: a review // *Advances in Colloid and Interface Science.* – 2008. – T. 140, № 2. – P. 114–131. – DOI: 10.1016/j.cis.2007.12.008.
5. Brunauer S., Emmett P.H., Teller E. Adsorption of gases in multimolecular layers // *Journal of the American Chemical Society.* – 1938. – T. 60, № 2. – P. 309–319. – DOI: 10.1021/ja01269a023.
6. Duan J., Gregory J. Coagulation by hydrolysing metal salts // *Advances in Colloid and Interface Science.* – 2003. – T. 100. – P. 475–502. – DOI: 10.1016/S0001-8686(02).
7. Freundlich H. Über die Adsorption in Lösungen // *Zeitschrift für Physikalische Chemie.* – 1907.
8. Ho Y.S. McKay G. Pseudo-second order model for sorption processes // *Process Biochemistry.* – 1999. – T. 34, № 5. – P. 451–465. – DOI: 10.1016/S0032-9592(98).
9. Langmuir I. The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum // *Journal of the American Chemical Society.* – 1918. – T. 40, № 9. – P. 1361–1403. – DOI: 10.1021/ja02242a004.
10. Lehmann J., Joseph S. *Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation.* – 2nd ed. – London: Routledge, 2015. – 976 P.
11. Matilainen A., Vepsäläinen M., Sillanpää M. Natural organic matter removal by coagulation during drinking water treatment: a review // *Advances in Colloid and Interface Science.* – 2010. – T. 159, № 2. – P. 189–197. – DOI: 10.1016/j.cis.2010.06.007.
12. Qasem N.A. A., Mohammed R.H., Lawal D.U. Removal of heavy metal ions from wastewater: a comprehensive and critical review // *Clean Water.* – 2021. – T. 4, № 36. – DOI: 10.1038/s41545-021-00127-0.
13. Tan X., Liu Y., Zeng G., Wang X., Hu X., Gu Y., Yang Z. Application of biochar for the removal of pollutants from aqueous solutions // *Chemosphere.* – 2015. – T. 125. – P. 70–85. – DOI: 10.1016/j.chemosphere.2014.12.058.

14. Weber W.J., Morris J.C. Kinetics of adsorption on carbon from solution // Journal of the Sanitary Engineering Division ASCE. – 1963. – Т. 89, № 2. – P. 31–60.
15. Yagub M.T., Sen T.K., Afroze S., Ang H.M. Dye and its removal from aqueous solution by adsorption: a review // Advances in Colloid and Interface Science. – 2014. – Т. 209. – P. 172–184. – DOI: 10.1016/j.cis.2014.04.002.

References

1. Langmuir I. The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum // Journal of the American Chemical Society. – 1918. – Vol. 40, No. 9. – DOI: 10.1021/ja02242a004.
2. Brunauer S., Emmett P.H., Teller E. Adsorption of gases in multimolecular layers // Journal of the American Chemical Society. – 1938. – Vol. 60, No. 2. – DOI: 10.1021/ja01269a023.
3. Ho Y.S. McKay G. Pseudo-second order model for sorption processes // Process Biochemistry. – 1999. – Vol. 34, No. 5. – DOI: 10.1016/S0032-9592(98)00112-5.
4. Weber W.J., Morris J.C. Kinetics of adsorption on carbon from solution // Journal of the Sanitary Engineering Division ASCE. – 1963. – Vol. 89, No. 2.
5. Freundlich H. On adsorption in solutions // Zeitschrift für Physikalische Chemie. – 1907. – Vol. 57.
6. Bergaya F., Lagaly G. Handbook of Clay Science. 2nd ed. – Amsterdam: Elsevier, 2013. – 1752 P.
7. Lehmann J., Joseph S. Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation. 2nd ed. – London: Routledge, 2015. – 976 P.
8. Tan X., Liu Y., Zeng G., Wang X., Hu X., Gu Y., Yang Z. Application of biochar for the removal of pollutants from aqueous solutions // Chemosphere. – 2015. – Vol. 125. – DOI: 10.1016/j.chemosphere.2014.12.058.
9. Yagub M.T., Sen T.K., Afroze S., Ang H.M. Dye and its removal from aqueous solution by adsorption: a review // Advances in Colloid and Interface Science. – 2014. – Vol. 209. – DOI: 10.1016/j.cis.2014.04.002.
10. Ahmaruzzaman M. Industrial wastes as low-cost potential adsorbents for the treatment of wastewater laden with heavy metals // Advances in Colloid and Interface Science. – 2011. – Vol. 166, No. 1. – DOI: 10.1016/j.cis.2011.04.005.
11. Duan J., Gregory J. Coagulation by hydrolysing metal salts // Advances in Colloid and Interface Science. – 2003. – Vol. 100. – DOI: 10.1016/S0001-8686(02)00067-2.
12. Matilainen A., Vepsäläinen M., Sillanpää M. Natural organic matter removal by coagulation during drinking water treatment: a review // Advances in Colloid and Interface Science. – 2010. – Vol. 159, No. 2. – DOI: 10.1016/j.cis.2010.06.007.
13. Bhattacharyya K.G., Gupta S.S. Adsorption of a few heavy metals on natural and modified kaolinite and montmorillonite: a review // Advances in Colloid and Interface Science. – 2008. – Vol. 140, No. 2. – DOI: 10.1016/j.cis.2007.12.008.

-
14. Qasem N.A.A., Mohammed R.H., Lawal D.U. Removal of heavy metal ions from wastewater: a comprehensive and critical review // npj Clean Water. – 2021. – Vol. 4, No. 36. – DOI: 10.1038/s41545-021-00127-0.
 15. Razzaqov H.Q., Amonov M.R., Nazarov S.I. Preparation of sorbents based on the mechanical activation of sapropel raw materials // Universum: Technical Sciences (Electronic Scientific Journal). – 2026. – No. 6 (147) – URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/22965> (дата обращения: 19.09.2026).

Статья поступила в редакцию: 21.08.2026

Статья принята к публикации: 27.08.2026

Статья опубликована: 28.09.2026

УДК 547.26+661.7

Синтез метилольных производных сульфаниламида и изучение влияющих факторов

Рамазонов Бахром Гафурович

доц. кафедры

Химическая технология Бухарский государственный технический университет

Республика Узбекистан, г. Бухара

E-mail: ramazonov_baxrom@bstu.uz

Каландарова Замира Давроновна

соискатель кафедры

Химическая технология Бухарский государственный технический университет

Республика Узбекистан, г. Бухара

Гафуров Собир Бахром угли

студент

Бухарский государственный университет

Республика Узбекистан, г. Бухара

Synthesis of methylol derivatives of sulfanilamide and study of influencing factors

Ramazonov Bakhrom Gafurovich

Associate Professor

Department of Chemical Technology, Bukhara State Technical University

Republic of Uzbekistan, Bukhara

Kalandarova Zamira Davronovna

postgraduate Student

Department of Chemical Technology

Republic of Uzbekistan, Bukhara

Gafurov Sobir Bakhrom ugli

student, Chemical Direction, Bukhara State University

Republic of Uzbekistan, Bukhara

Аннотация

Актуальной на сегодняшний день во всем мире становится синтезирование биологически активных соединений, потребность к которым растет с каждым днем, веществам обладающим физиологической и антибактериальной активностью. В связи с чем в современной науке появляется возможность проводить масштабные исследования синтеза

Библиографическое описание: Рамазонов Б.Г., Каландарова З.Д., Гафуров С.Б.У. Синтез метилольных производных сульфаниламида и изучение влияющих факторов // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 9(150). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23365>

веществ с вышеуказанными свойствами, изучать их важные физико-химические свойства и антибактериальную активность. В статье рассматривается актуальность синтеза новых, биологически активных соединений, а точнее производных сульфаниламида, синтез его метилольных соединений, получающихся с помощью его реакции с формальдегидом, условия проведения данного синтеза, влияние различных факторов на течении и выход реакции, влиянии мольных соотношений реагентов и температуры процесса. В статье также приводятся на основе проведенных опытов полученные данные об оптимальной температуре реакций метилолирования, выход продукта реакции. Целью данного исследования является исследование метилольных производных сульфаниламида, изучение процесса синтеза моно-, ди-, три- и тетраметилольных производных сульфаниламида, а также изучение влияния мольных соотношений реагентов, pH - среды и температуры реакции на состав получаемых продуктов.

На основе полученных данных составлены корреляционная взаимосвязь выхода продукта с температурой проведения реакции, а также регрессивные уравнения процессов.

Abstract

The synthesis of biologically active compounds, substances possessing physiological and antibacterial activity, is becoming increasingly important worldwide. The demand for these compounds is growing daily. Therefore, modern science now has the opportunity to conduct large-scale studies into the synthesis of substances with the above-mentioned properties, studying their important physicochemical properties and antibacterial activity. This article discusses the relevance of synthesizing new, biologically active compounds, or more precisely, sulfanilamide derivatives, the synthesis of its methylol compounds obtained through its reaction with formaldehyde, the conditions for this synthesis, the influence of various factors on the course and yield of the reaction, and the influence of the molar ratios of the reactants and the process temperature. The aim of this study is to investigate methylol derivatives of sulfanilamide, study the synthesis process of mono-, di-, tri-, and tetramethylol derivatives of sulfanilamide, and examine the influence of reactant molar ratios, pH, and reaction temperature on the composition of the resulting products.

Based on the data obtained, a correlation between product yield and reaction temperature was developed, as well as regression equations for the processes.

Ключевые слова: сульфаниламид, формальдегид, метилольные производные сульфаниламида, антибактериальная активность.

Keywords: sulfanilamide, formaldehyde, methylol derivatives of sulfanilamide, antibacterial activity.

Введение

На сегодняшний день во всем мире с каждым днем растет интерес к веществам, обладающим физиологической и антибактериальной активностью. В связи с чем в современной науке появляется возможность проводить масштабные исследования синтеза веществ с вышеуказанными свойствами, изучать их важные физико-химические свойства и антибактериальную активность [2, 6, 8, 11]. В этом отношении сульфаниламид и его

производные, которые мы изучаем, также являются достаточно активными веществами с точки зрения вышеупомянутых свойств. К настоящему времени синтезировано множество соединений и производных сульфаниламида, представляющих собой производные бензольного ядра или функциональных групп, связанных с бензольным ядром, и большинство из них нашли применение в различных областях [3, 9, 10]. Важное практическое значение производных сульфаниламида заключается в синтезе новых производных, изучении их свойств и в конечном итоге, в их применении на практике [1, 4, 5, 7]. Целью данного научного исследования является синтез метилольных производных сульфаниламида, изучение влияющих факторов на состав получаемых продуктов а также изучение зависимости биологической активности веществ от их строения.

Методы исследования

Синтез производных метилола сульфаниламида проводили в трехгорловой колбе. Для проведения синтеза колба была снабжена термометром, капельной воронкой и магнитной мешалкой. В колбу, снабженную описанным выше способом, помещали расчетное количество 37,5 % -ного водного раствора формальдегида (формалина). Для поддержания pH – среды слабо щелочной с помощью капельной воронки, перемешивая раствор в колбе, добавляли 2 – 3 капли предварительно приготовленного 1М раствора гидроксида натрия NaOH. Образовавшуюся в колбе смесь перемешивали магнитной мешалкой до достижения температуры 25 – 60°C. С помощью индикатора определяли и поддерживали около pH = 7,5 – 7,8. После перемешивания раствора в течение 5 – 10 минут, постепенно, при перемешивании, добавляли предварительно рассчитанное количество сульфаниламида относительно количества молей формальдегида в растворе. При этом было замечено, что прозрачный раствор сначала помутнел, а затем снова стал прозрачным (вследствие полного растворения сульфаниламида). Перемешивание продолжали в течение 35 – 40 минут при интервале температуре 55 – 60°C, и добавляли 1 – 2 капли концентрированного раствора серной кислоты H₂SO₄ для доведения pH среды до 6,5 – 6,8. При этом происходит с легка помутнение раствора. В параллельном опыте при небольшом увеличении количества серной кислоты в смеси образовалась нерастворимая в воде полимерная масса. Это можно объяснить тем, что производное метилола, образующееся в результате реакции сульфаниламида с формальдегидом, полимеризуется в кислой среде, образуя метиленовые связи вдоль поперечной цепи или основание Шиффа с выделением молекул воды. Полученное вещество нерастворимо в воде, но растворимо в горячем этиловом спирте и других органических растворителях.

Обсуждение результатов

В процессе синтеза метилольных производных сульфаниламида криоскопическим методом было установлено, что связанные с процессом показатели, включая выход реакции и молекулярные массы синтезированных веществ, изменяются в зависимости от соотношения исходных реагентов (молей), взятых для реакций.

Нетрудно предположить, что состав и структура продукта, образующегося в реакции сульфаниламида с формальдегидом, будут изменяться в зависимости от молярных соотношений исходных реагентов. В связи с этим молярные соотношения сульфаниламида к формальдегиду были выбраны в соответствии с экспериментальными вариантами, и изучена взаимосвязь между влиянием температуры реакции на выход конечного продукта (табл.1 – 4).

Таблица 1.

Выходы продуктов и молекулярные массы при молярном соотношении сульфаниламида к формальдегиду 1:1

№	температура, °C	выход продукта, %	Молекулярная масса
1	25-30	79	202
2	35-40	84,4	202
3	45-50	87,6	202
4	55-60	97,3	202
5	65-70	95	202

Таблица 2.

Выходы продуктов и молекулярные массы при молярном соотношении сульфаниламида к формальдегиду 1:2

№	температура, °C	выход продукта, %	Молекулярная масса
1	25-30	81,2	232
2	35-40	88	232
3	45-50	93,3	232
4	55-60	98,8	232
5	65-70	97,7	232

Таблица 3.

Выходы продуктов и молекулярные массы при молярном соотношении сульфаниламида к формальдегиду 1:4

№	температура, °C	выход продукта, %	Молекулярная масса
1	25-30	83	292
2	35-40	87,6	292
3	45-50	94,4	292
4	55-60	97,7	292
5	65-70	96,8	292

Таблица 4.

Выходы продуктов и молекулярные массы при молярном соотношении сульфаниламида к формальдегиду 1:n (n>4)

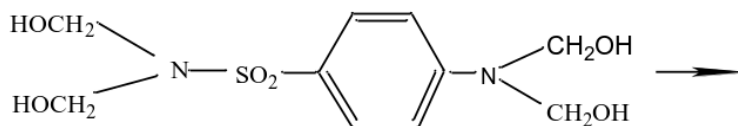
№	Harorat, °C	Unum, %	Molekulyar massa
1	25-30	86,3	322
2	35-40	90,4	352
3	45-50	93	382

№	Температура, °C	Выход, %	Молекулярная масса
4	55-60	94,6	412
5	65-70	94,1	412

Уравнение химической реакции для молярного соотношения сульфаниламида к формальдегиду 1:1 можно выразить следующим образом:

сульфаниламид

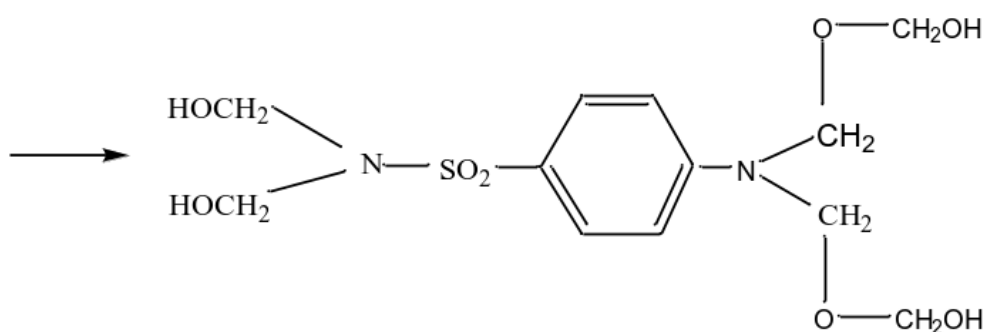
формальдегид



диметиол сульфаниламида

N,N-(дигидроксиметил) сульфаниламид

Если этот процесс будет продолжаться таким образом, то метилольные группы реагируют с формальдегидом, образуя метоксигруппу:



Как известно, одним из важных факторов, обеспечивающих протекание реакций в той или иной степени, является температура. Учитывая это, была изучена зависимость выхода реакции от температуры в процессе получения метилольных производных сульфаниламида из сульфаниламида и формальдегида. На основе полученных результатов были построены графики, выражающие взаимосвязь между этими двумя величинами, и одновременно выведены уравнения регрессии зависимости между значениями этих двух величин (рис.1 – 4).

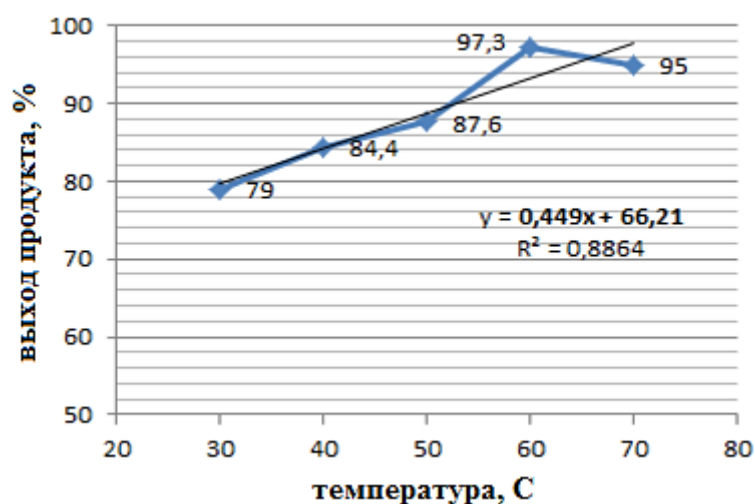


Рисунок 1. Зависимость выхода продукта от мольного соотношения сульфаниламида к формальдегиду (1:1) и от температуры

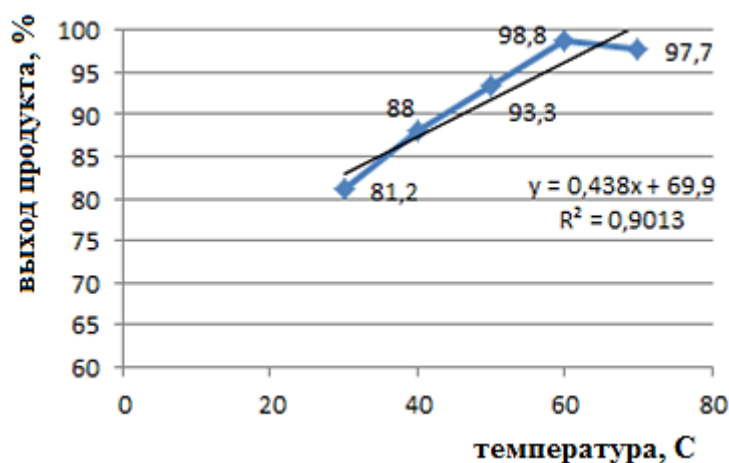


Рисунок 2. Зависимость выхода продукта от мольного соотношения сульфаниламида к формальдегиду (1:2) и от температуры

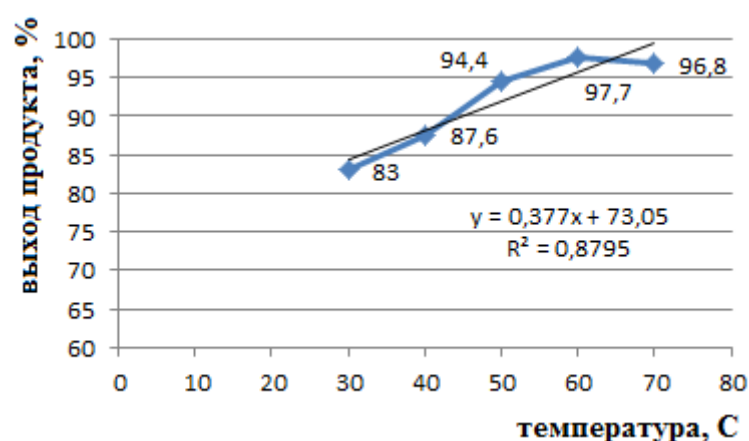


Рисунок 3. Зависимость выхода продукта от мольного соотношения сульфаниламида к формальдегиду (1:4) и от температуры

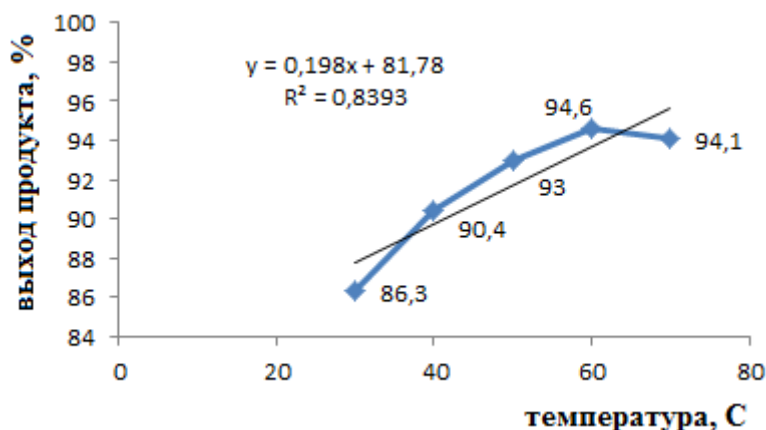


Рисунок 4. Зависимость выхода продукта от мольного соотношения сульфаниламида к формальдегиду (1:n) и от температуры

Как видно из рисунков, выход и состав продукта реакции образования моно-, ди-, три- и тетраметилольных производных сульфаниламида непосредственно зависит от мольных соотношений реагентов, а также pH - среды и температуры реакции.

Заключение

Из полученных данных проведенных опытов можно сделать вывод, что оптимальным (выход продукта реакции составляет от 94,6 до 98,8 %) условием проведения синтеза метилольных моно-, ди-, три- и тетраметилольных производных сульфаниламида является интервал температуры 55 – 60°C, pH = 7,5 – 7,8 в начале и pH = 6,5 – 6,8 в конце процесса при продолжительности процесса 45 – 50 минут.

Список литературы

1. Альсугайер А. и др. Синтез, структурный анализ и антибактериальная активность новых сильнодействующих производных сульфонида // Журнал биоматериалов и нанобиотехнологий. – 2011. – Т. 2, № 2.
2. Аскар Ф.В. и др. Синтез и оценка биологической активности новых производных сульфонида // Иракский научный журнал. – 2021.
3. Ван Дж. и др. Разработка и синтез сульфаниламид-аминофосфонатов в качестве новых антибактериальных средств против *Escherichia coli* // Китайский химический журнал. – 2021. – Т. 39, № 8.
4. Деодхар М.Н., Хопаде П.Л., Варат М.Г. Научная статья. Ингибиторы β -карбоангидразы на основе сульфониамидов: 2D QSAR-исследование. – 2013.
5. Елинский Т., Пшибылек М., Цисевский П. Преимущество растворимости сульфаниламида и сульфациетида в природных глубоких эвтектических системах: экспериментальные и теоретические исследования // Разработка лекарственных средств и промышленная фармацевтика. – 2019. – Т. 45, № 7.
6. Колачек А. и др. Биологическая активность и синтез производных сульфонида: краткий обзор // Химика. – 2014. – Т. 68.

7. Лоуренс Х.Р. и др. Синтез и биологическая оценка аналогов нафтохинона как нового класса ингибиторов протеасомы // Биоорганическая и медицинская химия. – 2010. – Т. 18.
8. Редди К.У. и др. Полимерный препарат на основе сульфаниламида: синтез, антимикробные и лекарственно-активные исследования // Журнал фармации и фармакологии. – 2007. – Т. 59, № 9.
9. Туркмен Х., Зенгин Г., Буюккиркали Б. Синтез производных сульфаниламида и исследование ингибирующей активности in vitro, а также антимикробных и физических свойств // Биоорганическая химия. – 2011. – Т. 39, № 3.
10. Умамахешвара Редди С. Умамахешвара Редди С. и др. Полимерный препарат на основе сульфаниламида: синтез, антимикробные свойства и исследования высвобождения лекарственного средства // Журнал фармации и фармакологии. – 2007. – Т. 59, № 9.
11. Шиленков Н.А. Синтез сульфаниамидов на основе перзамещённых пара-аминофенолов: дис. ... канд. хим. наук: 02.00.03. – Красноярск, 2020. – 142 с.

References

1. [Synthesis, Structural Analysis, and Antibacterial Activity of New Potent Sulfonamide Derivatives] // Zhurnal biomaterialov i nanobiotekhnologij. – 2011. – Vol. 2, No. 2. (In Russ.)
2. Askar F.V. i dr. [Synthesis and Evaluation of Biological Activity of New Sulfonamide Derivatives] // Irakskij nauchnyj zhurnal. – 2021. (In Russ.)
3. [Development and Synthesis of Sulfanilamide-Aminophosphonates as Novel Antibacterial Agents Against Escherichia coli] // Kitajskij khimicheskij zhurnal. – 2021. – Vol. 39, No. 8. (In Russ.)
4. Deodkhar M.N., Khopade P.L., Varat M.G. [Scientific Article. β -Carbonic Anhydrase Inhibitors Based on Sulfonamides: 2D QSAR Study]. – 2013. (In Russ.)
5. Elinskij T., Pshibylek M., Tsisevskij P. [Solubility Advantage of Sulfanilamide and Sulfacetamide in Natural Deep Eutectic Systems: Experimental and Theoretical Studies] // Razrabotka lekarstvennykh sredstv i promyshlennaya farmatsiya. – 2019. – Vol. 45, No. 7. (In Russ.)
6. [Biological Activity and Synthesis of Sulfonamide Derivatives: A Brief Review] // Khimika. – 2014. – Vol. 68. (In Russ.)
7. [Synthesis and Biological Evaluation of Naphthoquinone Analogues as a New Class of Proteasome Inhibitors] // Bioorganicheskaya i meditsinskaya khimiya. – 2010. – Vol. 18. (In Russ.)
8. Reddi K.U. i dr. [Polymeric Sulfonamide-Based Drug: Synthesis, Antimicrobial and Pharmacologically Active Studies] // Zhurnal farmatsii i farmakologii. – 2007. – Vol. 59, No. 9. (In Russ.)
9. Turkmen Kh., Zengin G., Buyukkirkali B. [Synthesis of Sulfanilamide Derivatives and Investigation of In Vitro Inhibitory Activity, as well as Antimicrobial and Physical Properties] // Bioorganicheskaya khimiya. – 2011. – Vol. 39, No. 3. (In Russ.)

-
10. [Umamaheshvara Reddy S. et al. Polymeric Sulfonamide-Based Drug: Synthesis, Antimicrobial Properties and Drug Release Studies] // Zhurnal farmatsii i farmakologii. – 2007. – Vol. 59, No. 9. (In Russ.)
 11. [Shilenkov N.A. 'Synthesis of Sulfanilamides Based on Persubstituted para-Aminophenols,' Dissertation for the Degree of Candidate of Chemical Sciences, Krasnoyarsk].– 142 s. – 2020. (In Russ.)

Статья поступила в редакцию: 10.09.2026

Статья принята к публикации: 16.09.2026

Статья опубликована: 28.09.2026

УДК 628.3+544.77

DOI: 10.32743/UniTech.2026.150.9.23404

Доочистка нефтесодержащих сточных вод древесными активированными углями, содержащими соединения железа и цинка

Умматов Обиджон Олимжон угли
соискатель

Кокандский государственный университет
Республика Узбекистан, г. Коканд

Очилов Голиб Мамаюнович
д-р хим. наук, проф.

Кокандский государственный университет
Республика Узбекистан, г. Коканд
E-mail: golibjon.ochilov@mail.ru

Матмусаев Абдумуталиб Каххоржон угли
докторант

Кокандский государственный университет
Республика Узбекистан, г. Коканд
E-mail: Abdumutalib07091997@gmail.com

Эшметов Иzzат Дусимбатович
д-р тех. наук, проф.

Институт общей и неорганической химии АН РУз
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: izzat.dusimbatovich@gmail.com

Библиографическое описание: Доочистка нефтесодержащих сточных вод древесными активированными углями, содержащими соединения железа и цинка // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Умматов О.О.У. [и др.]. 2026. 9(150). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23404>

Polishing of oil-containing wastewater with wood-derived activated carbons containing iron and zinc compounds

Ummatov Obidjon

*Applicant, Kokand State University
Republic of Uzbekistan, Kokand*

Ochilov Golib

*Dr. Sci. (Chem.), Professor
Kokand State University
Republic of Uzbekistan, Kokand*

Matmusaev Abdumutalib

*Doctoral student
Kokand State University
Republic of Uzbekistan, Kokand*

Eshmetov Izzat

*doctor of Technical Sciences
professor Institute of General and Inorganic Chemistry
Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan
Republic of Uzbekistan, Tashkent*

Аннотация

Целью работы являлось сравнение эффективности промышленного угля БАУ, железосодержащего древесного угля AU–Fe и цинксодержащего угля Zn-1,0 при адсорбционной доочистке реальной нефтесодержащей сточной воды. Оценена пригодность древесных активированных углей, модифицированных соединениями железа и цинка, для решения этой задачи. Адсорбенты получены из отходов мебельного производства карбонизацией с последующей совместной химической активацией и модификацией хлоридами металлов. Испытания проводили на воде Ферганского нефтеперерабатывающего завода после механической очистки в статических условиях: 25 ± 2 °C, доза 5 г/л, контакт 60 мин, перемешивание 200 об/мин. Контролировали семь показателей: нефтепродукты, фенольные соединения, ароматические углеводороды, ионы меди и свинца, химическое потребление кислорода и мутность. Установлено, что при использовании цинксодержащего угля Zn-1,0 содержание нефтепродуктов снижается со 142,0 до 8,4 мг/л, фенольных соединений – с 14,60 до 0,58 мг/л, меди – с 2,80 до 0,09 мг/л, свинца – с 1,90 до 0,05 мг/л, а химическое потребление кислорода – с 1260 до 72 мг O_2 /л. Степень удаления составила 93,2–97,4 %, расчётная нагрузка по нефтепродуктам – 26,72 мг/г. Для всех показателей остаточное значение было наименьшим при использовании Zn-1,0 и наибольшим для БАУ. Практическая значимость работы состоит в обосновании применения адсорбентов из местного древесного сырья на стадии доочистки нефтесодержащих стоков.

Abstract

The aim of the study was to compare the efficiency of commercial BAU activated carbon, iron-containing wood-derived carbon AU–Fe, and zinc-containing carbon Zn-1.0 for the adsorption polishing of actual oil-containing wastewater. The study evaluates the suitability of wood-derived activated carbons modified with iron and zinc compounds for the adsorption polishing of actual oil-containing wastewater and compares them with commercial BAU activated carbon. The adsorbents were obtained from furniture-production waste by carbonisation followed by simultaneous chemical

activation and modification with metal chlorides. Tests were carried out on water from the Fergana oil refinery after mechanical treatment under batch conditions: 25 ± 2 °C, dosage 5 g/L, contact time 60 min, agitation 200 rpm. Seven indicators were monitored: petroleum products, phenolic compounds, aromatic hydrocarbons, copper and lead ions, chemical oxygen demand, and turbidity. It was established that with the zinc-containing carbon Zn-1.0 the content of petroleum products decreases from 142.0 to 8.4 mg/L, phenolic compounds from 14.60 to 0.58 mg/L, copper from 2.80 to 0.09 mg/L, lead from 1.90 to 0.05 mg/L, and chemical oxygen demand from 1260 to 72 mg O₂/L. Removal efficiencies ranged from 93.2 to 97.4 %, and the calculated petroleum-product loading was 26.72 mg/g. For all indicators the residual value was lowest with Zn-1.0 and highest with BAU. The practical value of the work lies in substantiating the use of adsorbents made from local wood raw materials at the polishing stage of oil-containing effluent treatment.

Ключевые слова: нефтесодержащие сточные воды, адсорбционная доочистка, активированный уголь, древесные отходы, модификация металлами, химическое потребление кислорода, тяжёлые металлы.

Keywords: oil-containing wastewater, adsorption polishing, activated carbon, wood waste, metal modification, chemical oxygen demand, heavy metals.

Введение

Реальная нефтесодержащая сточная вода представляет многокомпонентную среду, для которой необходимо оценивать одновременно несколько показателей очистки. Снижение концентрации одной органической примеси не означает соответствующего уменьшения химического потребления кислорода (ХПК), содержания металлов или мутности, поэтому сравнение сорбентов должно проводиться на одной водной матрице при одинаковых условиях контактирования [1]. Активированные угли из растительных отходов рассматриваются как экономически доступная альтернатива промышленным сорбентам [10]; для Узбекистана такой подход дополнительно решает задачу утилизации отходов деревообработки.

Исследования реальных нефтепромышленных стоков показывают различие вклада отдельных стадий обработки и необходимость отдельного учёта загрязнителей [7, 9]. Дополнительную сложность создаёт дисперсное состояние нефтяных компонентов: их сорбция зависит от условий диспергирования и присутствия диспергаторов [4], поэтому результаты, полученные на растворах индивидуальных веществ, не заменяют испытания реальной смеси.

Цель работы – сравнить промышленный уголь БАУ, железосодержащий древесный уголь AU–Fe и цинксодержащий Zn-1,0 при доочистке воды Ферганского нефтеперерабатывающего завода после механической ступени. Задачи: определить степень снижения каждого контролируемого показателя, рассчитать нагрузку на сорбент по удалённым веществам и установить границы переноса статических результатов на технологический процесс.

Материалы и методы

Адсорбенты получены из отходов мебельного производства (опилки и мелкая стружка без покрытий и химической обработки). Сырьё очищали от посторонних включений, сушили при 105 ± 2 °С до постоянной массы, измельчали и просеивали. Карбонизацию проводили в токе аргона при скорости нагревания 10 °С/мин и выдержке 60 мин. Карбонизат подвергали совместной химической активации и модификации водными растворами хлоридов железа и цинка с последующей термообработкой в инертной среде, промывкой до отсутствия хлорид-ионов в фильтрате и сушкой при 105 ± 2 °С.

Испытания проведены 1–15 апреля 2026 г. на воде ООО «Ферганский нефтеперерабатывающий завод», отобранной после механической очистки. Контрольным сорбентом служил промышленный уголь марки БАУ. Статическое контактирование осуществляли при 25 ± 2 °С, дозе сухого сорбента 5 г/л, перемешивании 200 об/мин и продолжительности 60 мин. После отделения твёрдой фазы определяли остаточные нефтепродукты, фенольные соединения, ароматические углеводороды, Cu^{2+} , Pb^{2+} , ХПК и мутность.

Степень снижения показателя рассчитывали как $R = 100(C_0 - C_{60})/C_0$, где C_0 – исходное значение, C_{60} – значение после 60 мин обработки. Нагрузку по удалённому компоненту определяли выражением $q_{60} = (C_0 - C_{60})/D$ при дозе $D = 5$ г/л; при концентрациях в мг/л результат выражается в мг/г и характеризует количество вещества, перешедшее из жидкой фазы на сорбент в условиях опыта, а не предельную равновесную ёмкость. Показатели «нефтепродукты», «ароматические углеводороды» и «фенольные соединения» определяли отдельно и не суммировали, поскольку учитываемые группы веществ могут частично пересекаться.

Результаты и их обсуждение

Все три угля уменьшали значения контролируемых показателей относительно воды после механической обработки (таблица 1). Для каждого показателя порядок остаточных значений сохранялся: БАУ > АУ–Fe > Zn-1,0.

Таблица 1.

Показатели сточной воды до и после контактирования с активированными углями

Показатель	До обработки	БАУ	АУ–Fe	Zn-1,0
Нефтепродукты, мг/л	142,0	24,6	12,8	8,4
Фенольные соединения, мг/л	14,60	2,45	0,95	0,58
Ароматические углеводороды, мг/л	24,8	5,2	2,4	1,6
Cu^{2+} , мг/л	2,80	0,92	0,46	0,09
Pb^{2+} , мг/л	1,90	0,64	0,34	0,05
ХПК, мг O_2 /л	1260	285	118	72
Мутность, NTU	118	32	14	8

Условия опыта: доза 5 г/л, время контакта 60 мин, температура 25 ± 2 °С.

При использовании Zn-1,0 содержание нефтепродуктов уменьшалось на 133,6 мг/л, фенольных соединений – на 14,02 мг/л, ароматических углеводородов – на 23,2 мг/л. По сравнению с БАУ остаточная концентрация нефтепродуктов была меньше в 2,93 раза, фенольных соединений – в 4,22 раза.

Таблица 2.

Относительное снижение контролируемых показателей, %

Показатель	БАУ	AU–Fe	Zn-1,0
Нефтепродукты	82,7	91,0	94,1
Фенольные соединения	83,2	93,5	96,0
Ароматические углеводороды	79,0	90,3	93,5
Cu ²⁺	67,1	83,6	96,8
Pb ²⁺	66,3	82,1	97,4
ХПК	77,4	90,6	94,3
Мутность	72,9	88,1	93,2

Расчёт по данным таблицы 1. Для ХПК и мутности приведено снижение показателя, а не массовая степень удаления отдельного вещества.

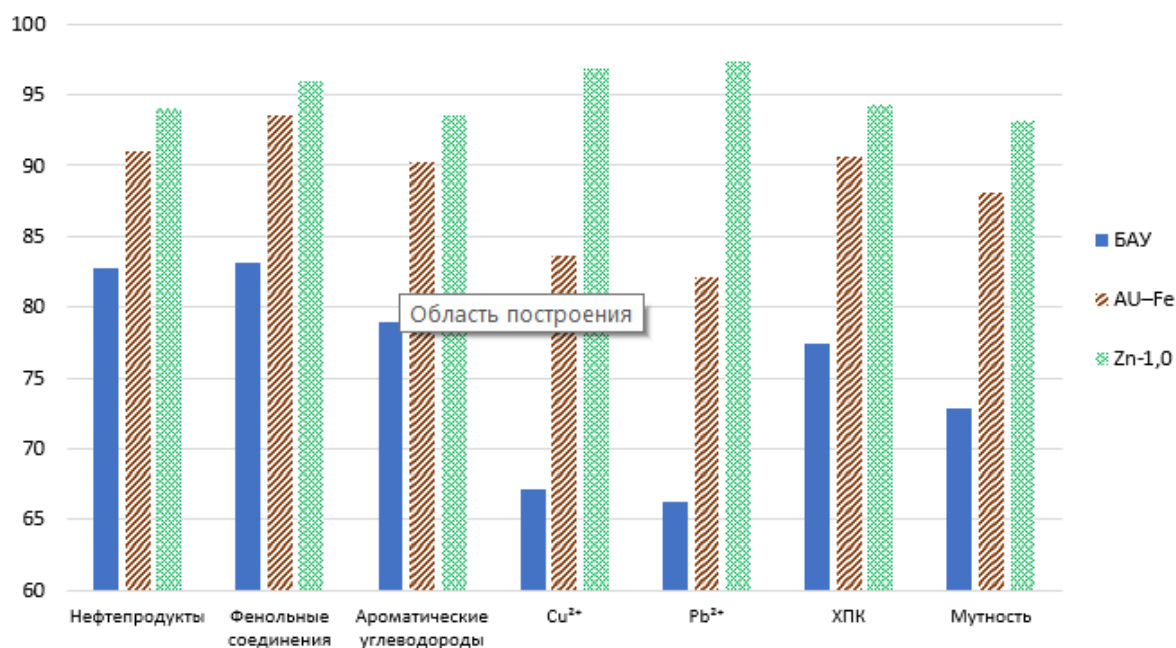


Рисунок 1. Степень снижения контролируемых показателей сточной воды при обработке углями БАУ, AU–Fe и Zn-1,0

Различие между Zn-1,0 и БАУ по степени удаления меди составляло 29,6 процентного пункта, свинца – 31,1, тогда как для нефтепродуктов разрыв был меньше – 11,4. Таким образом, относительное преимущество материала зависело от контролируемого компонента, несмотря на единый порядок ранжирования.

Расчёт q_{60} позволяет выразить снижение концентрации относительно дозы угля (таблица 3). Для нефтепродуктов нагрузка составляла 23,48 мг/г на БАУ, 25,84 мг/г на АУ–Fe и 26,72 мг/г на Zn-1,0. Преимущество Zn-1,0 по этой величине относительно БАУ равно 13,8 %, хотя остаточная концентрация различалась почти втрое: при высокой общей степени удаления небольшое дополнительное поглощение существенно уменьшает остаток.

Таблица 3.**Нагрузка по компонентам, удалённым из жидкой фазы за 60 мин, мг/г**

Компонент	БАУ	АУ–Fe	Zn-1,0
Нефтепродукты	23,480	25,840	26,720
Фенольные соединения	2,430	2,730	2,804
Ароматические углеводороды	3,920	4,480	4,640
Cu^{2+}	0,376	0,468	0,542
Pb^{2+}	0,252	0,312	0,370

Расчёт по данным таблицы 1 при $D = 5$ г/л. Значения не суммируются и не являются предельными равновесными ёмкостями.

Падение ХПК на 1188 мг O_2 /л при использовании Zn-1,0 отражает уменьшение кислородного эквивалента окисляемых веществ и не равно массе удалённых нефтепродуктов; снижение мутности характеризует оптическое свойство воды и не пересчитывается в мг/г.

Преимущество металлсодержащих образцов совместимо с более развитой поверхностью этих материалов, однако сравнение с БАУ не изолирует эффект модификатора: материалы различаются сырьём, размером частиц и пористостью. Обработка поверхности не даёт универсального улучшения всех показателей: введение железооксидной составляющей снижало ёмкость по природному органическому веществу [6], а азотнокислотная модификация давала разнонаправленные изменения удаления свинца и фенола [5]. Из разности концентраций нельзя выделить вклад собственно адсорбции, удержания дисперсной фазы и соосаждения; возможным фактором остаётся и конкуренция фоновой органики [11]. Остаточные концентрации фенольных соединений сопоставимы с результатами для углей из растительного сырья [3].

Испытанный режим отвечает расходу 5 кг угля на кубометр воды; это пересчёт лабораторной дозы, а не норма непрерывной установки. Для оценки повторного применения необходимы данные об отделении угля, вымывании модификатора и регенерации [2], причём оптимальная обработка материала для удаления органики может отличаться от оптимальной для минерального компонента [8].

Заключение

При дозе 5 г/л и контактировании 60 мин цинксодержащий древесный уголь Zn-1,0 обеспечивал наименьшие остаточные значения всех семи контролируемых показателей реальной нефтесодержащей сточной воды после механической очистки. Степень удаления нефтепродуктов составила 94,1 %, фенольных соединений – 96,0 %, меди – 96,8 %, свинца – 97,4 %; ХПК снизилось с 1260 до 72 мг O_2 /л. Железосодержащий АУ–Fe занимал

промежуточное положение между Zn-1,0 и промышленным углём БАУ. Расчётная нагрузка по нефтепродуктам достигала 26,72 мг/г и относится к выбранной дозе и продолжительности опыта.

Результаты обосновывают применение активированных углей из местных древесных отходов на стадии адсорбционной доочистки нефтесодержащих стоков. Дальнейшая разработка требует динамических испытаний в колонном режиме, контроля pH, оценки вымывания модификатора и регенерации загрузки.

Список литературы

1. Ateia M., Helbling D.E., Dichtel W.R. Best practices for evaluating new materials as adsorbents for water treatment // ACS Materials Letters. – 2020. – Т. 2, № 11. – DOI: 10.1021/acsmaterialslett.0c00414.
2. Drenkova-Tuhtan A., Inskeep C.S., Luthardt L. [et al.] Reusable and inductively regenerable magnetic activated carbon for removal of organic micropollutants from secondary wastewater effluents // Water Research. – 2024. – Т. 255. – Art. 121525. – DOI: 10.1016/j.watres.2024.121525.
3. Franco D.S.P., Georgin J., Netto M.S. [et al.] Highly effective adsorption of synthetic phenol effluent by a novel activated carbon prepared from fruit wastes of the Ceiba speciosa forest species // Journal of Environmental Chemical Engineering. – 2021. – Т. 9, № 5. – Art. 105927. – DOI: 10.1016/j.jece.2021.105927.
4. Ji H., Xie W., Liu W., Liu X., Zhao D. Sorption of dispersed petroleum hydrocarbons by activated charcoals: Effects of oil dispersants // Environmental Pollution. – 2020. – Т. 256. – Art. 113416. – DOI: 10.1016/j.envpol.2019.113416.
5. Kim H.-K., Kim S.-J., Kim H.-R., Park J.-W. Nitric acid modified powdered activated carbon for simultaneous adsorption of lead and phenol in aqueous solution // Journal of Environmental Chemical Engineering. – 2024. – Т. 12, № 6. – Art. 114889. – DOI: 10.1016/j.jece.2024.114889.
6. Lompe K.M., Menard D., Barbeau B. The influence of iron oxide nanoparticles upon the adsorption of organic matter on magnetic powdered activated carbon // Water Research. – 2017. – Т. 123. – DOI: 10.1016/j.watres.2017.06.045.
7. Madi N.E., Chabani M., Bouafia-Chergui S., Touil A. Removal of chemical oxygen demand from real petroleum refinery wastewater through a hybrid approach: Electrocoagulation and adsorption // Chemical Engineering and Processing. – 2024. – Т. 196. – Art. 109680. – DOI: 10.1016/j.cep.2024.109680.
8. Nigri E.M., Santos A.L.A., Mesquita P.L., Viana P.R.M., Rocha S.D.F. Simultaneous removal of strontium and refractory organic compounds from electrodialysis effluents by modified bovine bone char // Desalination and Water Treatment. – 2019. – Т. 145. – DOI: 10.5004/dwt.2019.23655.
9. Nigri E.M., Santos A.L.A., Rocha S.D.F. Removal of organic compounds, calcium and strontium from petroleum industry effluent by simultaneous electrocoagulation and adsorption // Journal of Water Process Engineering. – 2020. – Т. 37. – Art. 101442. – DOI: 10.1016/j.jwpe.2020.101442.

-
10. Pereira L., Castillo V., Calero M. [et al.] Insights into using plastic waste to produce activated carbons for wastewater treatment applications: A review // Journal of Water Process Engineering. – 2024. – Т. 62. – Art. 105386. – DOI: 10.1016/j.jwpe.2024.105386.
 11. Yilmaz E., Altiparmak E., Dadaser-Celik F., Ates N. Impact of natural organic matter competition on the adsorptive removal of acetochlor and metolachlor from low-specific UV absorbance surface waters // ACS Omega. – 2023. – Т. 8, № 35. – DOI: 10.1021/acsomega.3c02588.

УДК 666.968: 666.76

Регулирование с помощью добавок сроков схватывания и реологических свойств огнеупорных алюмохромофосфатных клеевых композиций**Шамадинова Наргис Эркиновна**

PhD, ст. преп

Ташкентский химико-технологический институт

Республика Узбекистан, г. Ташкент

E-mail: nargisxon@mail.ru

Шарафутдинова Нозима Пулатовна

ст. преп

Филиал Российского государственного университета нефти и газа (НИУ)

имени И.М. Губкина

Республика Узбекистан, г. Ташкент

E-mail: shnazima@mail.ru

Ганиева Сайера Хуршитовна

доц.

Филиал Российского государственного университета нефти и газа (НИУ)

имени И.М. Губкина

Республика Узбекистан, г. Ташкент

E-mail: sayyora7420@gmail.com

Regulation of setting time and rheological properties of refractory aluminochromophosphate adhesive compositions using additives**Shamadinova Nargis**

senior lecturer

Tashkent Institute of Chemical Technology

Republic of Uzbekistan, Tashkent

Sharafutdinova Nozima

senior Lecturer

Branch of the Gubkin Russian State University of Oil and Gas (NRU) in Tashkent

Republic of Uzbekistan, Tashkent

Ganieva Sayyora

Associate Professor

Branch of the Gubkin Russian State University of Oil and Gas (NRU) in Tashkent

Republic of Uzbekistan, Tashkent

Аннотация

В работе исследовано влияние химических добавок на кинетику твердения, растекаемость и технологическую жизнеспособность огнеупорных клеевых композиций на основе алюмохромофосфатного связующего. Целью работы является исследовать влияние

Библиографическое описание: Шамадинова Н.Э., Шарафутдинова Н.П., Ганиева С.Х. Регулирование с помощью добавок сроков схватывания и реологических свойств огнеупорных алюмохромофосфатных клеевых композиций // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 9(150). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23419>

добавок на сроки схватывания и реологические свойства огнеупорных алюмохромофосфатных клеевых композиций и определить их оптимальное содержание. В качестве регулирующих добавок изучены щавелевая кислота, поверхностно-активное вещество ОП-10 и технический глицерин. Исследования проводили на основе оптимизированной композиции, содержащей 15 % огнеупорной глины при соотношении жидкость/твердое Ж/Т = 0,9. Кинетические изменения технологических свойств оценивали по изменению диаметра расплыва клеевой массы во времени. Установлено, что эффективность ингибирования процесса твердения существенно зависит от природы и концентрации вводимой добавки. Наиболее стабильное сохранение подвижности композиции в течение 8 ч обеспечивается при введении 2–3 % щавелевой кислоты и 4–6 % эмульгатора ОП-10 от массы фосфатного связующего. Технический глицерин в концентрации 10–12 % способствует повышению начальной растекаемости, однако его применение сопровождается увеличением пористости и снижением прочности клеевого шва после термической обработки. Полученные результаты позволяют рекомендовать совместное применение щавелевой кислоты и ОП-10 для регулирования сроков схватывания и повышения технологической стабильности огнеупорных клеевых композиций.

Abstract

This study investigates the effect of chemical additives on the hardening kinetics, spreadability, and technological workability of refractory adhesive compositions based on an alumochromophosphate binder. The aim of this study is to investigate the effect of additives on the setting time and rheological properties of refractory aluminochromophosphate adhesive compositions and to determine their optimal concentrations. Oxalic acid, the surfactant OP-10, and technical glycerol were studied as setting-regulating additives. The experiments were performed using an optimized composition containing 15 % refractory clay at a liquid-to-solid ratio (L/S) of 0.9. Changes in the technological properties were evaluated by monitoring the variation in the spread diameter of the adhesive mass over time. The results demonstrated that the inhibiting effect on the hardening process strongly depends on the nature and concentration of the additive. The most stable retention of the composition's workability for 8 h was achieved with 2–3 % oxalic acid and 4–6 % OP-10 emulsifier, calculated relative to the mass of the phosphate binder. Technical glycerol at a concentration of 10–12 % increased the initial spreadability; however, its use was accompanied by increased porosity and reduced joint strength after thermal treatment. The results indicate that the combined use of oxalic acid and OP-10 is promising for controlling setting time and improving the technological stability of refractory adhesive compositions.

Ключевые слова: огнеупорный клей, алюмохромофосфатное связующее (АХФС), сроки схватывания, ингибитор, щавелевая кислота, ОП-10, технический глицерин.

Keywords: refractory adhesive, alumochromophosphate binder (ACPB), setting time, inhibitor, oxalic acid, OP-10, technical glycerin.

Введение

Огнеупорные клеевые композиции широко применяются при строительстве, ремонте и восстановлении футеровок тепловых агрегатов, печей, камер сгорания и других высокотемпературных установок. Их использование позволяет обеспечить надежное соединение огнеупорных и керамических материалов, повысить целостность футеровки и сократить продолжительность ремонтных работ. В связи с ужесточением требований к эксплуатационной надежности тепловых агрегатов особый интерес представляют неорганические клеевые материалы, способные сохранять прочность и устойчивость при высоких температурах.

Перспективным направлением является применение клеевых композиций на основе фосфатных связующих. Фосфатные системы характеризуются высокой адгезионной способностью, сравнительно низкой температурой формирования связанной структуры, хорошей совместимостью с алюмосиликатными и высокоглиноземистыми наполнителями, а также способностью формировать прочные соединения после термической обработки [1, 9, 5]. Особый интерес представляют алюмохромофосфатные связующие, использование которых в сочетании с огнеупорными наполнителями позволяет получать клеевые композиции с удовлетворительными технологическими и высокими термомеханическими характеристиками.

Вместе с тем практическое применение фосфатных огнеупорных клеев связано с необходимостью регулирования их реологических и кинетических характеристик. Интенсивное протекание процессов взаимодействия компонентов связующего может приводить к быстрому снижению подвижности клеевой массы и сокращению ее жизнеспособности. Это особенно существенно при выполнении футеровочных работ, когда требуется определенное время для нанесения, распределения и формирования равномерного клеевого шва. С другой стороны, чрезмерное замедление процессов схватывания может увеличивать продолжительность технологических операций и отрицательно влиять на формирование плотной структуры соединения [2, 3].

В связи с этим актуальной задачей является направленное регулирование скорости твердения и сохранение необходимой подвижности фосфатных клеевых композиций в течение заданного технологического периода. Одним из эффективных способов решения данной задачи является введение в состав связующего специальных химических добавок — ингибиторов и модификаторов, способных изменять кинетику взаимодействия компонентов без существенного ухудшения конечных эксплуатационных характеристик материала [10, 4, 6].

Особый интерес в качестве регулирующих добавок представляют органические кислоты, поверхностно-активные вещества и многоатомные спирты. Их введение может влиять на скорость протекания реакций в фосфатном связующем, характер структурообразования, вязкость и растекаемость клеевой массы. Однако эффективность действия таких добавок зависит от их природы и концентрации, поэтому определение оптимального состава является необходимым условием получения технологически стабильной клеевой композиции.

Результаты проведенных комплексных исследований показывают, что на основе системы $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3$ – глинистый кремнезём – фосфатное связующее возможно получение огнеупорных клеевых композиций, обладающих удовлетворительными реологическими характеристиками и высокой механической прочностью. Такие составы могут успешно применяться для склеивания различных огнеупорных и керамических материалов.

Однако при их масштабном промышленном использовании в строительстве и ремонте тепловых агрегатов выявляется ряд существенных технологических недостатков. В первую очередь они связаны с жизнеспособностью масс, изменением сроков схватывания и времени контакта. Короткие сроки схватывания вызывают резкое снижение жизнеспособности композиции. Напротив, чрезмерно длительное твердение усложняет проведение футеровочных работ (кладки), в результате чего снижается стабильность и плотность монолитной футеровки. По этой причине регулирование сроков схватывания и начальной активности огнеупорных фосфатных клеев путем введения специальных ингибиторов (пассиваторов) реакции твердения является актуальной технологической задачей.

Целью работы, являются установление влияния щавелевой кислоты, эмульгатора ОП-10 и технического глицерина на сроки схватывания, реологические свойства и жизнеспособность огнеупорных алюмохромофосфатных клеевых композиций, а также определить оптимальные концентрации добавок для обеспечения требуемой технологической подвижности и сохранения высоких термомеханических характеристик клеевого соединения.

Методы исследования

С целью замедления и оптимизации процесса твердения композиций на основе НЗРО4 (с введением гидроксида алюминия) было изучено влияние ингибиторов фосфатных связующих — щавелевой кислоты, поверхностно-активного вещества (ПАВ) — эмульгатора ОП-10 и технического глицерина.

В качестве базовой матрицы использовали оптимальный состав клеевой композиции, содержащий 15 % огнеупорной глины при соотношении жидкость/твердое ($\text{Ж/Т} = 0.9$). Кинетическое изменение подвижности и технологической пригодности клеевой смеси оценивали по изменению диаметра расплыва (растекаемости) массы с использованием стандартных методик.

Результаты и их обсуждение

Было исследовано влияние количества щавелевой кислоты, ПАВ ОП-10 и технического глицерина на кинетику растекаемости клеевых композиций. Результаты реологических изменений зафиксированы в виде кинетических зависимостей (рис. 1, 2, 3). Анализ полученных графических данных показал, что щавелевая кислота является наиболее эффективным ингибитором в исследуемой системе. При содержании в композиции 2–3 % щавелевой кислоты и 4–6 % ПАВ ОП-10 от массы связующего наблюдается стабильное сохранение подвижности клеевой массы в течение 8 часов с весьма незначительным

снижением растекаемости со временем. Это существенно продлевает технологическое время работы с материалом. Введение 10–12 % технического глицерина обеспечивает высокие начальные показатели растекаемости смеси [6,7].

Следует отметить, что щавелевая кислота и ОП-10 в указанных концентрационных пределах практически не оказывают негативного влияния на итоговые термомеханические свойства клеевого соединения.

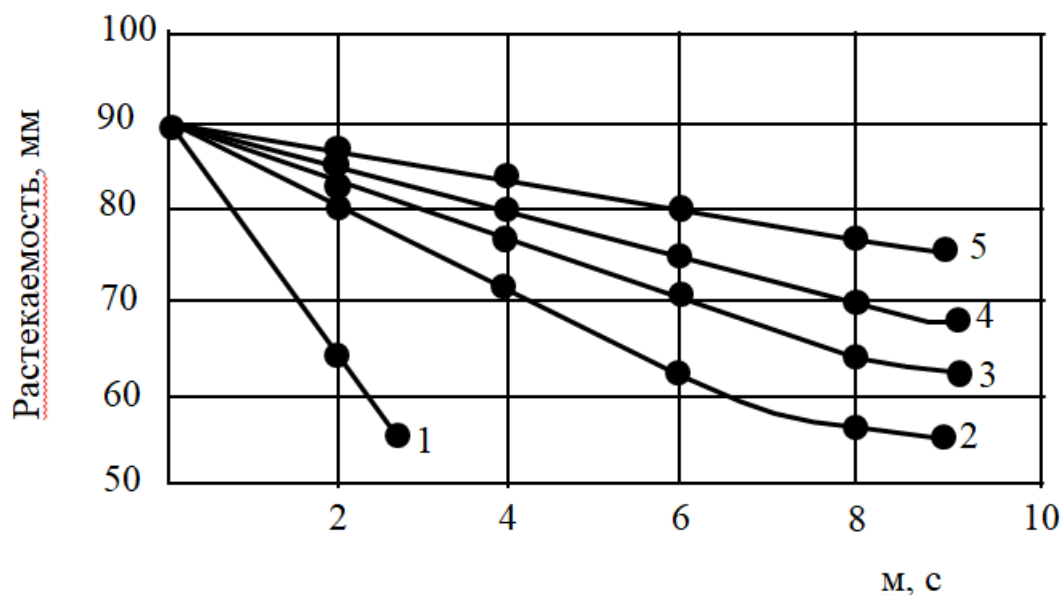


Рисунок 1. Зависимость изменения степени растекаемости огнеупорной клеевой композиции от концентрации щавелевой кислоты. 1 – без добавки; 2,3,4,5 – образцы с содержанием щавелевой кислоты 3,4 %

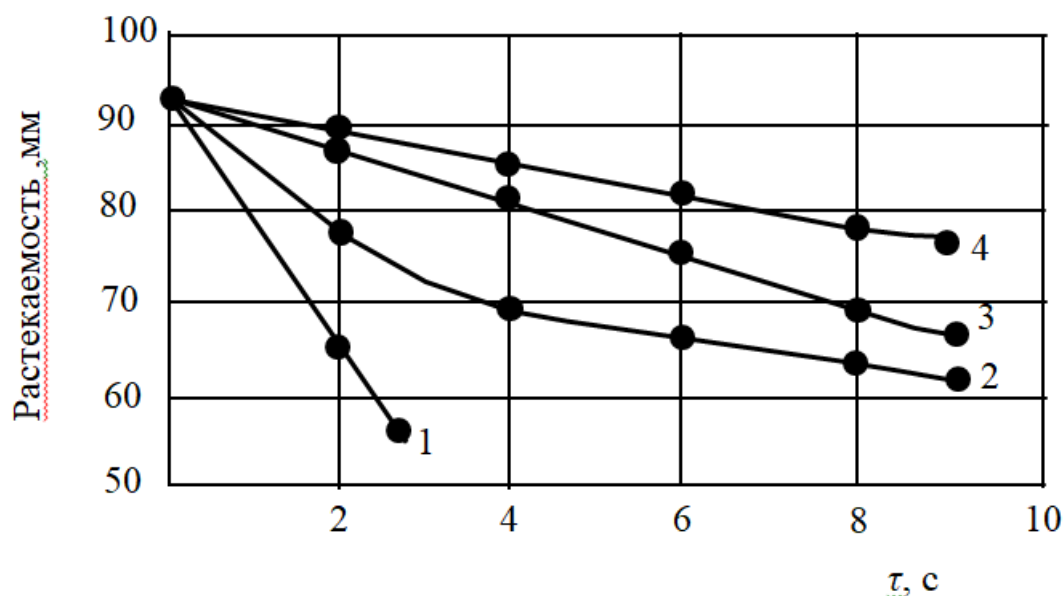


Рисунок 2. Зависимость изменения степени растекаемости огнеупорной клеевой композиции от количества ОП-10. 1 – без добавки; 2, 3, 4 – с содержанием 6 % ОП-10 (от общей массы)

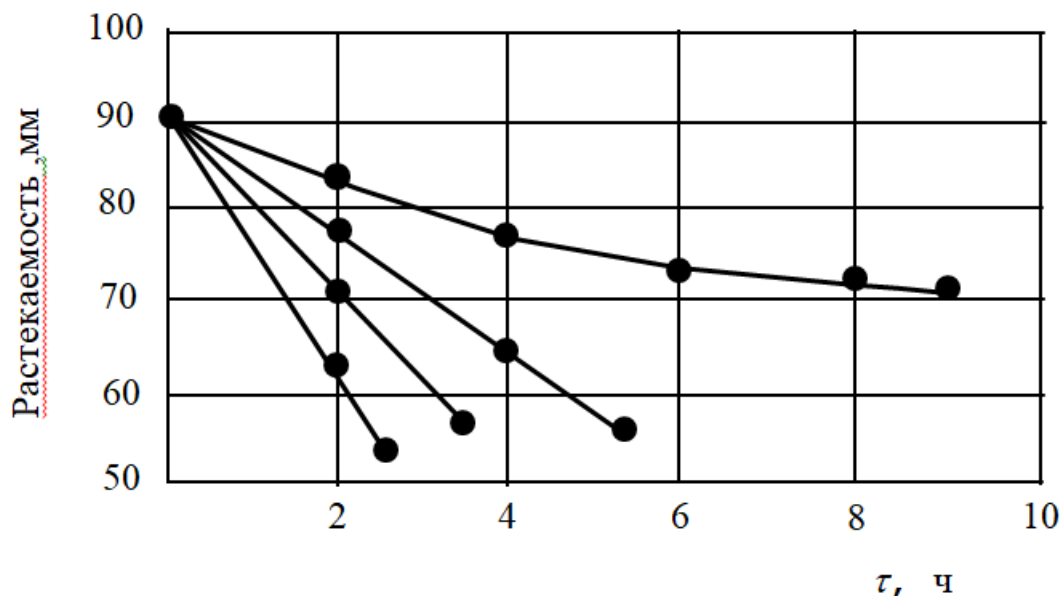


Рисунок 3. Зависимость изменения степени растекаемости огнеупорной клеевой композиции от количества технического глицерина. 1 – без добавки; 2, 3, 4 – с содержанием 4, 8, 12 % глицерина соответственно

Однако введение технического глицерина частично снижает прочность и повышает пористость шва. Данный факт объясняется высоким содержанием органических веществ, которые полностью разлагаются в процессе высокотемпературной термообработки с выделением газообразных продуктов. Это приводит к разрыхлению матрицы и нарушению плотности структуры затвердевшего клеевого шва.

Заключение

На основании физико-химических исследований установлено, что для эффективного регулирования реологических свойств и жизнеспособности огнеупорного клея на основе алюмохромфосфатного связующего (АХФС) целесообразно совместное применение щавелевой кислоты в количестве 2–3 % и эмульгатора ОП-10 в количестве 4–6 % от массы АХФС.

Введение данных целевых добавок позволяет снизить избыточную кинетическую активность фосфатных систем при пониженных температурах, обеспечивая контролируемые технологические сроки схватывания при сохранении высоких термомеханических характеристик получаемого клеевого соединения.

Список литературы

1. Гундарина З.Н. Исследование поведения твердых растворов алюмохромфосфатного связующего при термической обработке / З.Н. Гундарина, А.В. Лавров // Неорганические материалы. – 2089. – Т. 14, № 11. – С. 2085–2089.
2. Копейкин В.А. Огнеупорные растворы на фосфатных связующих / В.А. Копейкин, В.С. Климентьева, Б.Л. Красный. – М.: Металлургия, 1986. – 104 с.

3. Муродов С.И. Модификация свойств неорганических клеев на основе фосфатных систем химическими добавками / С.И. Муродов, Х.А. Абдуллаева // Огнеупоры и техническая керамика. – 2023. – № 5. – С. 32–38.
4. Сычев М.М. Неорганические клеи. – Л.: Химия, 1986. – 153 с.
5. Тарасовский В.П. Огнеупорные вяжущие вещества и композиции на их основе / В.П. Тарасовский, И.Д. Кашеев. – Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2018. – 186 с.
6. Шамадинова Н.Э. Исследование формирования структуры обожжённых клеевых композиций / Н.Э. Шамадинова [и др.] // Universum: химия и биология. – 2022. – № 12 (102). – С. 14–21. – DOI: 10.32743/UniChem.2022.102.12.14559.
7. Шамадинова Н.Э. Свойства композиции на основе отработанного активированного оксида алюминия / Н.Э. Шамадинова, А. Жалилов, Т.А. Атакузиев // Химия и химическая технология. – 2012. – № 3. – С. 28–31.
8. Braulio M.A.L. High-alumina phosphate-bonded refractory castables: Al(OH)₃ sources and their effects / M.A.L. Braulio, D.H. Milanez, V.C. Pandolfelli // Ceramics International. – 2015. – Т. 41, № 8. – P. 9637–9645.
9. Duderov Yu.G. Refractory alumina cement based on Al₂O₃ with an aluminochromophosphate binder / Yu.G. Duderov, A.M. Melnikov // Refractories and Industrial Ceramics. – 1980. – Т. 21, № 1–2. – P. 55–58.
10. Gonzales F.J. Reaction of orthophosphoric acid with several forms of aluminum oxide / F.J. Gonzales, J.W. Halloran // Am. Ceram. Soc. Bull. – 1980. – Т. 59, № 7. – P. 727–731.

References

1. Gundarina Z.N., Lavrov A.V. Investigation of the behavior of aluminum-chromium-phosphate binder solid solutions during heat treatment. Inorganic Materials. – 1978. – Vol. 14, No. 11. – P. 2085–2089.
2. Kopeykin V.A., Klimenteva V.S., Krasniy B.L. [Refractory Solutions on Phosphate Binders]. – М.: Metallurgiya, 1986. – 104 s (In Russ.)
3. S.I.Murodov, Kh.A.Abdullaeva Modifikatsiya svoystv neorganicheskikh kleev na osnove fosfatnykh sistem khimicheskimi dobavkami. [Refractories and Technical Ceramics. 2023. №. 5. P. 32–38] (In Russ.)
4. Sychev M.M. [Inorganic Adhesives]. – L.: Khimiya, 1986. – 153 s (In Russ.)
5. Tarasovskij V.P., Kashcheev I.D. [Refractory Binders and Compositions Based on Them]. – Ekaterinburg: UGTU–UPI, 2018. – 186 s (In Russ.)
6. Shamadinova N.E., Eshburiev T.N., Jalilov A., Mamazhanov M.M. Investigation of the Structure Formation of Fired Adhesive Compositions. Universum: Chemistry and Biology. 2022. No. 12(102). DOI: 10.32743/UniChem.2022.102.12.14559.
7. Shamadinova N.E., Jalilov A., Atakuziev T.A. Properties of a Composition Based on Spent Activated Aluminum Oxide. Chemistry and Chemical Technology. 2012. No. 3. P. 28–31.

-
8. Braulio M.A.L., Milanez D.H., Pandolfelli V.C. High-alumina phosphate-bonded refractory castables: $\text{Al}(\text{OH})_3$ sources and their effects. *Ceramics International*. 2015. Vol. 41, № 8. P. 9637–9645.
 9. Duderov Yu.G., Melnikov A.M. Refractory alumina cement based on Al_2O_3 with an aluminochromophosphate binder. *Refractories and Industrial Ceramics*. 1980. Vol. 21. P. 482–485.
 10. Gonzales F.J. Halloran J.W. Reaction of orthophosphoric Acid with Several Forms of Aluminium Oxide // *Am.Ceram.SOC.Bull.* – 1980. – Vol. 59, No. 7. – P. 727–731.

Статья поступила в редакцию: 31.08.2026

Статья принята к публикации: 06.09.2026

Статья опубликована: 28.09.2026

УДК 536.2+621.694

DOI: 10.32743/UniTech.2026.150.9.23379

Влияние числа пластин и диаметра портов на распределение теплоносителя в пластинчатом теплообменнике

Юсупова Надира Кайпбаевна

д-р техн. наук

. DSc, доц. Алмалыкский Государственный технический институт

Республика Узбекистан, г. Алмалык

E-mail: nadira__87@mail.ru

Сарсенбаев Нурлан Тенелбаевич

ассистент, преподаватель

Каракалпакский государственный университет им. Бердаха

Республика Узбекистан, г. Нукус

E-mail: nurlan0595s@gmail.com

The effect of the number of plates and port diameter on heat carrier distribution in a plate heat exchanger

Yusupova Nadira Kajpbaевна

Dr. Sci. (Tech.), DSc, Associate Professor, Almalyk State Technical Institute

Republic of Uzbekistan, Almalyk

Sarsenbaev Nurlan Tenelbaevich

Assistant, Lecturer

Berdakh Karakalpak State University

Republic of Uzbekistan, Nukus

Аннотация

В работе исследована равномерность распределения теплоносителя по параллельным каналам пластинчатого теплообменника и установлено влияние конструктивных параметров аппарата на характер потокораспределения. Проведён расчётно-теоретический анализ гидравлического режима теплообменника при различном общем количестве пластин и значениях условного диаметра портов. Для количественной оценки неравномерности распределения расхода использованы отношения удельного расхода в первом и последнем каналах к среднему значению, а также отношение расходов в крайних каналах. Установлено, что увеличение числа пластин усиливает неравномерность распределения теплоносителя: расход в первых каналах возрастает, а в наиболее удалённых снижается. При $J = 30$ и $D_y =$

Библиографическое описание: Юсупова Н.К., Сарсенбаев Н.Т. Влияние числа пластин и диаметра портов на распределение теплоносителя в пластинчатом теплообменнике // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 9(150). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23379>

40 мм отношение расходов первого и последнего каналов достигает 3,34. Показано, что увеличение диаметра портов способствует выравниванию расходов между каналами. Наиболее равномерное распределение в исследованном диапазоне получено при $D_y = 80$ мм. Полученные результаты подтверждают необходимость учёта количества пластин и геометрических параметров портов при проектировании пластинчатых теплообменников. Предложенная методика позволяет оценивать степень неравномерности потокораспределения и определять рациональные конструктивные параметры аппарата для повышения эффективности теплообмена и надёжности его эксплуатации в заданных условиях.

Abstract

The study investigates the uniformity of heat-transfer fluid distribution through the parallel channels of a plate heat exchanger and evaluates the influence of the apparatus design parameters on flow distribution. A theoretical and computational analysis of the hydraulic regime was performed for different total numbers of plates and values of the nominal port diameter. To quantitatively assess flow maldistribution, the ratios of the specific flow rates in the first and last channels to the average value, as well as the ratio of flow rates in the extreme channels, were used. It was established that increasing the number of plates intensifies flow maldistribution: the flow rate in the first channels increases, while that in the most distant channels decreases. At ($J = 30$) and ($D_y = 40$) mm, the ratio of the flow rates in the first and last channels reaches 3.34. Increasing the port diameter promotes more uniform flow distribution. The most uniform distribution within the investigated range was obtained at ($D_y = 80$) mm. The results confirm the need to consider the number of plates and port geometry when designing plate heat exchangers. The proposed method enables the assessment of flow maldistribution and determination of rational design parameters to improve heat-transfer efficiency and operational reliability under specified conditions.

Ключевые слова: пластинчатый теплообменник, теплоноситель, потокораспределение, гидродинамика, удельный расход, число пластин, диаметр портов, равномерность потока.

Keywords: plate heat exchanger, heat carrier, flow distribution, hydrodynamics, specific flow rate, plate number, port diameter, flow uniformity.

Введение

Пластинчатые теплообменники хорошо известны своей превосходной теплопередачей, компактностью и низким уровнем хладагента. Несмотря на ряд преимуществ, они страдают от проблем с неправильным распределением потока. Неправильное распределение потока может ухудшить как теплопередачу, так и перепад давления, что в конечном итоге приводит к снижению эффективности системы при использовании пластинчатых теплообменников. Проблемы неправильного распределения потока становятся более выраженными, когда размер теплообменника относительно велик, а количество пластин больше, что ограничивает использование пластинчатых теплообменников в крупных промышленных системах. В результате анализ и понимание поведения неправильного распределения потока в пластинчатых теплообменниках, а также поиск способов смягчения проблем, связанных с этим распределением, становятся важными темами [7].

Падение статического давления в каналах достигает максимума в первом канале, уменьшается по осевому направлению и достигает минимума в последнем канале. Соответственно, скорости потока в отдельных каналах также уменьшаются к концу впускного коллектора. Неправильное распределение означает отклонение этих скоростей каналов от идеализированного случая равномерного (теоретического) распределения. Если бы все изменения давления в коллекторах были полностью обратимыми, то статический профиль давления в выхлопном коллекторе повторил бы профиль впускного коллектора. В таком случае не произойдет неправильного распределения и падение статического давления по каждому каналу будет одинаковым [5].

Экспериментальные исследования теплогидродинамических характеристик паяных пластинчатых теплообменников (ВРНЕ) включают одновременное измерение скорости потока и температуры теплоносителей в каналах аппарата с применением инфракрасной термографии поверхности пластин. Использование данного неинвазивного метода позволяет получать пространственно-временную информацию о распределении температуры и выявлять изменения тепловых характеристик теплообменника при его загрязнении. Установлено, что образование отложений приводит к снижению эффективности теплообмена, что проявляется в изменении среднего уровня температуры и увеличении её пространственной неоднородности [3].

В работе исследовано влияние геометрии входного и выходного коллекторов пластинчатого теплообменника на равномерность распределения потока между отдельными каналами. В качестве исходной конструкции рассматривался коллектор постоянного диаметра 10 мм без сужения. Число Рейнольдса изменяли в диапазоне от 2100 до 276636 за счёт изменения массового расхода на входе. Результаты численного моделирования показали, что с увеличением числа Рейнольдса степень неравномерности распределения потока между пластинами возрастает [8].

Результаты моделирования показали, что геометрия коллектора оказывает существенное влияние не только на равномерность распределения теплоносителя между каналами, но и на величину гидравлического сопротивления аппарата. Изменение площади поперечного сечения коллектора вдоль направления движения потока позволяет управлять локальными скоростями и статическим давлением, вследствие чего изменяется расход через отдельные каналы пластинчатого теплообменника. При этом использование более сложных профилей коллектора позволяет рассматривать компромисс между уменьшением неравномерности распределения потока и снижением потерь давления [9].

Авторы экспериментально исследовали особенности распределения теплоносителя по каналам пластинчатых теплообменников с малым и большим числом пластин. В экспериментах рассматривались аппараты, содержащие 20 и 80 каналов, при изменении числа Рейнольдса в диапазоне от 1000 до 17 000. Установлено, что характер неравномерности потокораспределения определяется величиной перепада давления и зависит от расхода теплоносителя, площади поперечного сечения распределительных портов и количества каналов. Показано, что с увеличением общего гидравлического сопротивления теплообменника неравномерность распределения потока по каналам усиливается. Кроме того, авторами введен безразмерный параметр, характеризующий относительное отклонение расхода в отдельном канале от его среднего значения по пакету пластин [4].

Авторы провели экспериментальное и теоретическое исследование влияния неравномерности распределения теплоносителя от портов к каналам на тепловые характеристики пластинчатого теплообменника. Авторы установили, что интенсивность потокораспределения определяется расходом теплоносителя, числом каналов и размером портов. Увеличение неравномерности распределения приводит к росту гидравлического сопротивления и снижению тепловой эффективности аппарата. Полученные результаты показывают необходимость учета характеристик портов и количества каналов при проектировании пластинчатых теплообменников [10].

Методы и материалы

Для количественной оценки степени неравномерности потокораспределения использовались три критерия. Первый критерий характеризует отклонение расхода в первом канале от идеального значения:

$$K_1 = \frac{G_1}{G_m} \quad (1)$$

где (G_1) — удельный расход теплоносителя в первом канале, (G_m) — средний удельный расход при равномерном распределении.

Вторым критерием являлось отношение расхода в последнем канале к идеальному значению:

$$K_j = \frac{G_j}{G_m} \quad (2)$$

где (G_j) — удельный расход в наиболее удалённом от входа канале.

Для непосредственной оценки различия расходов между крайними каналами использовалось отношение:

$$K_{1j} = \frac{G_1}{G_j} \quad (3)$$

При полностью равномерном распределении теплоносителя значения (G_1/G_m) и (G_j/G_m) должны стремиться к единице, а отношение (G_1/G_j) должно быть близко к единице. Чем больше отклонение указанных критериев от единицы, тем выше степень неравномерности распределения потока по каналам теплообменника.

Расчётная методика основана на рассмотрении параллельных каналов как гидравлически взаимосвязанных участков, расход которых определяется их гидравлическим сопротивлением и распределением давления в распределительном и сборном коллекторах. При этом учитывалось изменение статического давления вдоль коллекторной зоны, обусловленное потерями на трение, изменением скорости потока и отбором теплоносителя в отдельные каналы.

Для каждого варианта геометрии определялись значения удельных расходов во всех каналах теплообменника. Полученные результаты использовались для построения диаграмм распределения расхода и последующего сравнительного анализа. Расчёты выполнялись для различных сочетаний количества пластин и диаметра коллекторов, что позволило установить закономерности изменения гидродинамической неравномерности при изменении конструктивных параметров аппарата.

В качестве основного критерия эффективности рассматриваемой конструкции принималась степень приближения фактических расходов в крайних каналах к среднему значению. На основании этого проводилась оценка рациональности выбранного диаметра коллекторов и количества пластин. Такой подход позволяет определить диапазон конструктивных параметров, обеспечивающих максимально равномерное распределение теплоносителя по параллельным каналам пластинчатого теплообменника.

Предложенная методика расчёта может быть использована для проведения параметрической оценки и последующей оптимизации гидравлической схемы пластинчатого теплообменного аппарата без необходимости изготовления экспериментального образца на начальной стадии проектирования.

Результаты и обсуждения

На диаграмме распределения теплоносителя по каналам теплообмена пластинчатого теплообменника (рис.1) показано равномерное распределение удельного расхода по каналам G_m , что характеризует одно из допущений при тепловом и гидравлическом расчете пластинчатых теплообменников [8]. Согласно полученным зависимостям, расход теплоносителя зависит от удаленности канала по расположению относительно неподвижной плиты. При этом динамика распределения потоков по каналам значительно отличается от условия равномерного распределения (рисунок 1). Значение удельного расхода в канале №24 (наиболее удаленный) ниже относительно канала №1 примерно в 2 раза.

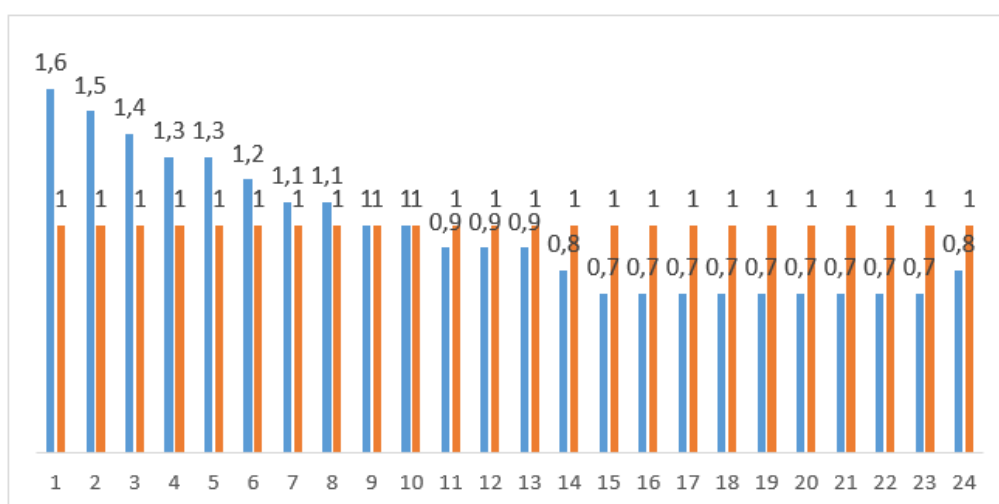


Рисунок 1. Диаграмма распределения удельных расходов теплоносителя по каналам теплообмена пластинчатого теплообменника

- ■ - удельный расход по каналам с учетом удаленности от входа, G ; - ■ - удельный расход по каналам при равномерном распределении, G_m

Типоразмерный ряд пластинчатых теплообменников имеет определенные технические характеристики как эксплуатационные, так и геометрические. Так каждому типу пластин по габаритным данным соответствует диапазон минимального и максимального количества возможного набора пластин, кроме того указывается диаметр условного прохода портов D_y [6], образованных угловыми отверстиями пластин.

На основании зависимостей по определению расходов в параллельных каналах можно предположить, что величина диаметра распределительного и сборного коллекторов оказывает влияние на равномерность потокораспределения [2].

В таблице 1 представлены полученные результаты расчета влияния общего числа пластин и величины диаметра коллектора на равномерность распределения расходов по каналам теплообмена. В качестве критерия оценки равенства расходов между каналами приняты отношения:

- удельного расхода в первом канале к расходу в последнем канале, G_1/G_J ;
- удельного расхода в первом канале к расходу в этом же канале при равномерном распределении потоков, G_1/G_m ;
- удельного расхода в последнем канале к расходу в этом же канале при равномерном распределении потоков, G_J/G_m

Равномерность потокораспределения по параллельным участкам будет характеризоваться наименьшей величиной расхождения удельных расходов между первым и последним каналами, а также стремлением предложенных критериев к 1.

Таблица 1.

Зависимость отношения удельных расходов в каналах в зависимости от общего числа пластин

Общее число пластин, J	G_1/G_m первого к идеальному	G_J/G_m последнего к идеальному	G_1/G_J первого к последнему
$D_y = 40$ мм			
10	1,09	1,07	0,98
15	1,25	1,02	1,22
20	1,50	0,91	1,66
23	1,83	0,74	2,46
30	2,14	0,64	3,34
$D_y = 50$ мм			
10	1,04	1,10	0,94
15	1,16	1,05	1,10
20	1,35	0,97	1,19
25	1,50	0,77	1,57
30	1,86	0,76	1,84
$D_y = 65$ мм			
10	1,02	1,11	0,91
15	1,10	1,08	1,01
20	1,22	1,03	1,19
25	1,42	0,90	1,57
30	1,60	0,87	1,84

Общее число пластин, J	G_1/G_m первого к идеальному	G_J/G_m последнего к идеальному	G_1/G_J первого к последнему
$D_y = 80$ мм			
10	1,01	1,12	0,90
15	1,10	1,10	0,97
20	1,15	1,06	1,09
25	1,31	0,95	1,38
30	1,43	0,94	1,53

G_1 – удельный расход в первом канале; G_J – удельный расход в последнем канале; G_m – идеальный (средний) удельный расход.

Анализ данных, представленных в таблице 1 показывает, что с увеличением общего числа пластин J наблюдается существенное перераспределение удельных расходов теплоносителя между крайними каналами теплообменного аппарата. Отношение удельного расхода в первом канале к идеальному значению (G_1/G_m) монотонно возрастает от 1,09 при $J = 10$ до 2,14 при $J = 30$, что свидетельствует о возрастающей неравномерности распределения потока по длине пакета пластин. В то же время отношение удельного расхода в последнем канале к идеальному (G_J/G_m) снижается с 1,07 до 0,64, указывая на дефицит расхода в выходных каналах при увеличении числа пластин. Данная тенденция объясняется ростом гидравлического сопротивления по ходу движения теплоносителя и усилением влияния коллекторных зон на распределение потока.

Наиболее показательным является рост отношения G_J/G_1 – от 0,98 до 3,34, что подтверждает резкое усиление неравномерности между первым и последним каналами при больших значениях J . При $J \geq 23$ наблюдается кратное превышение удельного расхода в первом канале над последним, что может приводить к локальным перегревам, снижению тепловой эффективности и ускоренному износу элементов теплообменного аппарата.

Анализируя полученные результаты расчета критериев равенства расходов, следует отметить их максимальное приближение к 1 в условиях принятого максимального числа пластин $J = 30$ и при увеличении диаметра коллекторов до $D_y = 80$ мм (наибольшее значение диаметра коллектора принято в пределах геометрических размеров пластины). При расчетном числе пластин $J = 24$ наблюдается максимальное приближение критериев равенства расхода к 1, также в случае принятия $D_y = 80$ мм.

При расчетном числе пластин $J = 10$ наблюдается стремление к 1 отношения удельного расхода в первом канале к расходу в этом же канале при равномерном распределении потоков, G_1/G_m , в условиях увеличения расчетного значения D_y , а значения критериев равенства расходов G_1/G_m и G_J/G_m приближаются к 1 при уменьшении диаметра распределительного и сборного коллекторов [9].

Заключение

Таким образом, согласно предлагаемой методике расчета гидравлического режима пластинчатых теплообменных аппаратов, возможно проведение оптимизационных расчетов по определению рациональных геометрических параметров с целью достижения максимально возможных условий равенства расходов теплоносителя по всем каналам.

Анализируя полученные результаты расчета критериев равенства расходов, следует отметить их максимальное приближение к 1 в условиях принятого максимального числа пластин $J = 30$ и при увеличении диаметра коллекторов до $D_y = 80$ мм (наибольшее значение диаметра коллектора принято в пределах геометрических размеров пластины). При расчетном числе пластин $J = 24$ наблюдается максимальное приближение критериев равенства расхода к 1, также в случае принятия $D_y = 80$ мм.

Список литературы

1. А.М. Хурмамаев, Н.К. Юсупова, С.Б. Бердимбетов, Н.Т. Сарсенбаев. Определение состава для интенсивной переработки нефтяных шламов // “Вестник Каракалпакского государственного университета им. Бердаха”. – 2025. – № 1 (68). – С. 19–24.
2. Н.К. Юсупова, Н.Т. Сарсенбаев, Ж.Қ. Мирзаев. Зависимость эффективности конденсации от концентрации твердой фазы в парогазовой смеси // “Журнал экспериментальных исследований”. – 2024. – № 5.
3. Berce J., Zupančič M., Može M., Golobič I. Local temperature distribution of a plate heat exchanger undergoing crystallization fouling. Heat and Mass Transfer. – 2025. – Vol. 61. – Article 68. – DOI: 10.1007/s00231-025-03593-1.
4. Bobbili, P.R., Sundén, B., Das, S.K. An experimental investigation of the port flow maldistribution in small and large plate package heat exchangers // Applied Thermal Engineering. – 1926. – T. 26, № 16. – P. 1919–1926. – DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2006.01.015.
5. Gusew S. Accounting for the impact of maldistribution on pressure drop in a plate heat exchanger [Электронный ресурс]. – Hannover: Independent Scientist. – 2025. – 9 с. – DOI: 10.13140/RG.2.2.30014.19521.
6. Lee J.K., Yoon S.H., Park H.C. Performance Evaluation of Welded Plate Heat Exchangers for Bitumen Cooling and Heating // Applied Thermal Engineering. – 2023. – T. 220. – Art. 118456.
7. Muneeshwaran M., Kim H.J., Tayyab M., Li W., Nawaz K., Yang C.-M. Flow maldistribution in plate heat exchangers – Impact, analysis, and solutions // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2025. – T. 207. – Art. 114905. – DOI: 10.1016/j.rser.2024.114905.
8. Rahman M.M., Jakkala S.G., Bénard A. Influence of Header Configuration on Flow Distribution within a U-Type Plate Heat Exchanger // Proceedings of the 8th Thermal and Fluids Engineering Conference (TFEC). – 2023. – P. 1463–1472. – DOI: 10.1615/TFEC2023.hex.046080.
9. Rahman M.M., Bénard A. Reduced-Order Model for Flow Distribution in Plate Heat Exchangers with Novel Header Designs [Электронный ресурс] / M.M. Rahman, A. Bénard. – SSRN. – 2025. – 45 с. – DOI: 10.2139/ssrn.5698471.
10. Rao, B.P., Sundén, B., Das, S.K. An experimental and theoretical investigation of the effect of flow maldistribution on the thermal performance of plate heat exchangers // Journal of Heat Transfer. – 2005. – T. 127, № 3. – P. 332–343. – DOI: 10.1115/1.1860568.

11. Yusupova N., Khurmamatov A., Sarsenbaev N., Berdimbetov S. Intensification of heat transfer in the condensation process of vapor-gas mixtures using plate heat exchangers // “Science and Education in Karakalpakstan”/2. – 2024. – № 4.

References

1. A.M. Xurmamatov, N.K. Yusupova, S.B. Berdimbetov, N.T. Sarsenbayev. Opredeleeniye sostava dlya intensivnoy pererabotki neftyanix shlamov // “Bestnik Karakalpakskogo gosudarstvennogo universiteta im. Berdaxa”. – 2025. – No. 1 (68).
2. [Yusupova, N.T. Sarsenbaev, Zh.Q. Mirzaev. Dependence of condensation efficiency on the concentration of solid phase in a vapor-gas mixture] // “Zhurnal eksperimental'nykh issledovaniy”. – 2024. – No. 5. (In Russ.)
3. Berce J. Zupančič M., Može M., Golobič I. Local temperature distribution of a plate heat exchanger undergoing crystallization fouling // Heat and Mass Transfer. – 2025. – Vol. 61, No. 8. – DOI: 10.1007/s00231-025-03593-1.
4. Bobbili P.R., Sundén, B., Das S.K. An experimental investigation of the port flow maldistribution in small and large plate package heat exchangers // Applied Thermal Engineering. – 1926. – Vol. 26, No. 16. – P. 1919–1926. – DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2006.01.015.
5. Gusew S. Accounting for the impact of maldistribution on pressure drop in a plate heat exchanger – Hannover: Independent Scientist. – 2025. – 9 c. – DOI: 10.13140/RG.2.2.30014.19521.
6. Lee J.K., Yoon S.H., Park H.C. Performance Evaluation of Welded Plate Heat Exchangers for Bitumen Cooling and Heating // Applied Thermal Engineering. – 2023. – Vol. 220. – Art. 118456.
7. Muneeshwaran M., Kim H.J., Tayyab M., Li W., Nawaz K., Yang C.-M. Flow maldistribution in plate heat exchangers – Impact, analysis, and solutions // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2025. – Vol. 207. – Art. 114905. – DOI: 10.1016/j.rser.2024.114905.
8. Rahman M.M., Jakkala S.G., Bénard A. Influence of Header Configuration on Flow Distribution within a U-Type Plate Heat Exchanger // Proceedings of the 8th Thermal and Fluids Engineering Conference (TFEC). – 2023. – P. 1463–1472. – DOI: 10.1615/TFEC2023.hex.046080.
9. Rahman M.M., Bénard A. Reduced-Order Model for Flow Distribution in Plate Heat Exchangers with Novel Header Designs – SSRN. – 2025. – 45 c. – DOI: 10.2139/ssrn.5698471.
10. Rao B.P., Sundén, B., Das S.K. An experimental and theoretical investigation of the effect of flow maldistribution on the thermal performance of plate heat exchangers // Journal of Heat Transfer. – 2005. – Vol. 127, No. 3. – P. 332–343. – DOI: 10.1115/1.1860568.
11. Yusupova N., Khurmamatov A., Sarsenbaev N., Berdimbetov S. Intensification of heat transfer in the condensation process of vapor-gas mixtures using plate heat exchangers // “Science and Education in Karakalpakstan”/2. – 2024. – No. 4. (In Russ.)

ДЛЯ ЗАМЕТОК

ДЛЯ ЗАМЕТОК

UNIVERSUM: ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Электронный научный журнал

№ 9(150)

Сентябрь 2026 г.

Часть 2

Свидетельство о регистрации СМИ: Эл № ФС 77 – 54434 от 17.06.2013

Мнение авторов может не совпадать с позицией редакции.

Издание содержит научную информацию и в соответствии с ч. 4 ст. 1
Федерального закона от 29.12.2010 № 436-ФЗ «О защите детей от информации,
причиняющей вред их здоровью и развитию» не подлежит классификации
(маркировке) по возрастным категориям

Издательство ООО «Юниверсум»

Объём издания: 84 с.

Минимальные системные требования: процессор с частотой от 1,3 ГГц; ОЗУ от
512 МБ; программа для чтения PDF-файлов; доступ к сети Интернет

Дата размещения в сети Интернет: 28.09.2026

Журнал размещается в:

CYBERLENINKA

e НАУЧНАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ
БИБЛИОТЕКА
LIBRARY.RU

Google
scholar

ULRICHSWEB
GLOBAL SERIALS DIRECTORY

>BASE

СОЦИОНЕТ

OpenAIRE



Registry of Open Access
Repositories (ROAR)