

• ISSN 2072-8158 •



# ВОДА:

## ХИМИЯ И ЭКОЛОГИЯ

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

№ 3 • 2024

**НОВЫЕ  
РЕШЕНИЯ**

В ТЕОРИИ  
И ПРАКТИКЕ  
ВОДОПОЛЬЗОВАНИЯ  
И ЭКОЛОГИЧЕСКОГО  
МОНИТОРИНГА

органическая и биорганическая химия |  
неорганическая химия | исследования в сфере  
химической, мембранной технологии | экология  
и гидробиология | новые и перспективные  
материалы для химической и микробиологической  
очистки воды | технологические инновации в сфере  
промышленной и бытовой очистки вод | исследования  
в области гидробиологии | вопросы мониторинга  
водных объектов и экономики водной отрасли |  
обзор передовых российских и зарубежных  
разработок, существующих патентов и нормативной  
документации | анализ чрезвычайных экологических  
ситуаций | совершенствование и разработка  
контрольно-измерительного оборудования в области  
водопользования | методическое и материально-  
техническое обеспечение образовательного процесса  
по специальностям, связанным с химией и экологией



● ISSN 2072-8158 ●



# ВОДА

# ХИМИЯ И ЭКОЛОГИЯ

НАУЧНО – ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

№3, 2024

г. Москва



Всероссийский научно–практический журнал «Вода: Химия и Экология» публикует оригинальные научные статьи и обзоры теоретического и практического характера, посвященные:

- ✓ органической химии;
- ✓ биоорганической химии;
- ✓ неорганической химии;
- ✓ процессов химической, мембранной технологии
- ✓ экологии;
- ✓ гидробиологии;
- ✓ исследованию новых перспективных материалов для химической и микробиологической очистки воды;
- ✓ технологическим инновациям в сфере промышленной и бытовой очистки вод;
- ✓ исследованиям в области гидробиологии;
- ✓ мониторингу водных объектов, экономике водной отрасли;
- ✓ обзору передовых российских и зарубежных разработок, существующих патентов и нормативной документации;
- ✓ чрезвычайным экологическим ситуациям;
- ✓ совершенствованию и разработке аналитических приборов;
- ✓ методическому и математическому обеспечению образования в области химии и экологии воды;

Миссия журнала: развитие фундаментальных и прикладных исследований в области химических, биологических наук и экологии, а также распространение оригинальных исследований в этих областях наук.

К публикации принимаются оригинальные исследования российских и зарубежных ученых, преподавателей, научных работников, аспирантов высших учебных заведений и научных организаций Российской Федерации, стран СНГ и дальнего зарубежья, ранее не опубликованные.

Настоящее издание включено в Перечень ведущих научных изданий, реферируемых Высшей аттестационной комиссией при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации.

Согласно паспорту Высшей аттестационной комиссии (ВАК) при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации, журнал рекомендован для публикации результатов научных исследований, выполняющихся в рамках подготовки диссертационных работ по следующим специальностям:

- |  |   |
|--|---|
| ✓ 1.4.3. Органическая химия (химические науки),    | ✓ 2.6.13. Процессы и аппараты химических технологий (химические науки), |
| ✓ 1.4.9. Биоорганическая химия (химические науки), | ✓ 2.6.15. Мембраны и мембранная технология (химические науки)           |

Редакция журнала ВОДА: ХИМИЯ И ЭКОЛОГИЯ в том числе принимает оригинальные научные труды, касающиеся сферы биологических наук и экологии.

**Язык:** Русский, английский **Количество статей в журнале:** до 15.

**Количество выпусков в год:** 12, Журналу присвоен ISSN, 2072–8158

**Регистрация СМИ:** серия ПИ № ФС 77 – 31640 10.04.2008

**Ссылка РИНЦ –** [https://www.elibrary.ru/title\\_about.asp?id=28251](https://www.elibrary.ru/title_about.asp?id=28251)

Журнал печатается в г. Москве

**Учредитель журнала:** Мельников Игорь Олегович, кандидат химических наук

**Адрес:** 127473, Москва г., 3–й Самотечный пер., д. 23, кв. 48, **E-mail:** [VAK-info@yandex.ru](mailto:VAK-info@yandex.ru)

**Типография и издательство:** Общество с ограниченной ответственностью "Издательство "Манускрипт" (ОГРН 1226100004679)

## ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:

**Каленский Александр Васильевич:** Доктор физико–математических наук, профессор, заведующий кафедрой химии твердого тела и химического материаловедения, чл корр РАЕН, один из ведущих преподавателей КемГУ, За многолетний плодотворный труд был награжден: почетными грамотами АКО, благодарностями ГОУ ВПО КемГУ, медалью «За веру и добро»

## РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

**Батаева Юлия Викторовна:** Доктор биологических наук, доцент, ведущий научный сотрудник отдела биологических технологий ФБУН Государственный научный центр прикладной микробиологии и биотехнологии

**Будко Елена Вячеславовна:** Доктор фармацевтических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Курский государственный медицинский университет»

**Гасаналиев Абдулла Магомедович:** Доктор химических наук, профессор кафедры, директор НИИ Общей и неорганической химии, заслуженный деятель науки РД и РФ, Дагестанский Государственный Педагогический Университет (Махачкала)

**Данилов–Данильян Виктор Иванович:** Доктор экономических наук, Российский учёный, экономист, эколог, гидролог, член–корреспондент РАН. Специалист в области экономики природопользования, экономико–математического моделирования, теории устойчивого развития, Институт водных проблем РАН (Москва)

**Евжанов Ходжанепес:** Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры общей химии, Международный университет нефти и газа имени Ягшыгелди Какаева. Лауреат государственной премии Туркменистана в области науки и техники

**Еременко Игорь Леонидович:** Советский и Российский химик, доктор химических наук член–корреспондент РАН с 1997 года, академик РАН с 2006 года, лауреат Государственной премии Российской Федерации, институт общей и неорганической химии им. н.с. курнакова РАН (Москва)

**Ефремов Игорь Владимирович:** Доктор биологических наук, кандидат технических наук, профессор кафедры безопасности жизнедеятельности Оренбургского государственного университета (Оренбург)

**Кашаев Рустем Султанхамитович:** Доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»

**Койфман Оскар Иосифович**, Доктор химических наук, Российский химик, специалист в области синтеза, изучения физико–химических свойств и практического использования порфиринов, металлопорфиринов, их структурных аналогов и жидкокристаллических соединений, ректор Ивановского государственного химико–технологического университета, Ивановский государственный химико–технологический университет (Иваново)

**Колесников Владимир Александрович**: Доктор технических наук, Российский учёный в области промышленной электрохимии, безопасности и ресурсосбережения применительно к процессам обработки современных материалов, создания экологически безопасных, ресурсосберегающих процессов в гальванотехнике, переработке жидких техногенных отходов и водообработке, Российский химико–технологический университет им. Д.И. Менделеева (Москва)

**Кузнецов Максим Валерьевич**: Доктор химических наук, главный научный сотрудник Федеральное государственное бюджетное учреждение "Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России"

**Кузьмина Лариса Владимировна**: Доктор физико-математических наук, Профессор кафедры химии твердого тела и химического материаловедения Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кемеровский государственный университет»

**Леонов Валерий Евгеньевич**: Доктор технических наук, профессор, действительный член международной академии «Экоэнергетика», Херсонская государственная морская академия

**Мурадов Шухрат Одилевич**: Доктор технических наук, профессор, член межвузовского координационного совета при МГУ им. Ломоносова, Каршинский инженерно-экономический институт (Узбекистан), профессор

**Мухамбетжанов Салтанбек Талапеденович**: доктор физико – математических наук, член – корр. Международной Инженерной Академии, Казахский национальный университет имени аль – Фараби, профессор кафедры вычислительной науки и статистики

**Мухин Виктор Михайлович**: Доктор технических наук, профессор по специальности «Экология», лауреат премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники, заслуженный изобретатель РФ, Почетный эколог (МЕЖДУНАРОДНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК ЭКОЛОГИИ, БЕЗОПАСНОСТИ ЧЕЛОВЕКА И ПРИРОДЫ), Почетный профессор Санкт–Петербургского государственного технологического института (технического университета), начальник лаборатории активных углей, эластичных сорбентов и катализаторов АО «Электростальское НПО «Неорганика» Ростеха (Москва)

**Пчелинцева Нина Васильевна:** Доктор химических наук, доцент, ФГБОУ ВО Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г.Чернышевского, профессор кафедры органической и биоорганической химии Института химии СГУ (Саратов)

**Селезнев Владимир Анатольевич:** Доктор технических наук, профессор, заместитель директора по научной работе Института экологии Волжского бассейна Российской академии наук, филиала Самарского федерального исследовательского центра РАН (Самара)

**Фролкова Алла Константиновна:** Советский и российский химик, доктор технических наук, МИРЭА–Российский технологический университет (Москва)

**Федосов Сергей Викторович:** Доктор технических наук, Заслуженный деятель науки РФ, Лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники, Национальный Исследовательский Московский Государственный Строительный Университет, профессор, академик РААСН (Москва)

**Хацаева Раиса Мусаевна:** Доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник Института проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, зав. кабинетом электронной микроскопии (Москва)

## **EDITOR-IN-CHIEF:**

**Kalensky Alexander Vasilyevich**, Doctor of Physico–Mathematical Sciences, Professor, Head of the Department of Solid State Chemistry and Chemical Materials Science, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, one of the leading teachers of KemSU, for many years of fruitful work was awarded: honorary diplomas of the AKO, commendations of the State Educational Institution of KemSU, the medal «For Faith and Kindness»

## **EDITORIAL BOARD:**

**Bataeva Yulia Viktorovna**: Doctor of Biological Sciences, Associate Professor, Leading Researcher at the Department of Biological Technologies of the Federal State Budgetary Institution State Scientific Center for Applied Microbiology and Biotechnology

**Budko Elena Vyacheslavovna**: Kursk State Medical University, Doctor of Pharmaceutical Sciences, Professor

**Abdulla Magomedovich Hasanaliyev**: Doctor of Chemical Sciences, Professor of the Department, Director of the Research Institute of General and Inorganic Chemistry, Honored Scientist of the Republic of Dagestan and the Russian Federation, Dagestan State Pedagogical University (Makhachkala)

**Danilov–Danilyan Viktor Ivanovich**: Doctor of Economics, Russian scientist, economist, ecologist, hydrologist, corresponding Member of the Russian Academy of Sciences. Specialist in the field of environmental economics, economic and mathematical modeling, theory of Sustainable Development, Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences (Moscow)

**Evzhanov Khojanepes**: Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of General Chemistry, Yagshygeldi Kakaev International University of Oil and Gas. Laureate of the State Prize of Turkmenistan in the field of science and technology

**Eremenko Igor Leonidovich**: Soviet and Russian chemist, Doctor of Chemical Sciences Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences since 1997, Academician of the Russian Academy of Sciences since 2006, laureate of the State Prize of the Russian Federation, N.S. Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry of the Russian Academy of Sciences (Moscow)

**Efremov Igor Vladimirovich**: Doctor of Biological Sciences, Candidate of Technical Sciences, Professor of the Life Safety Department Orenburg State University (Orenburg)

**Kashaev Rustem Sultanhamitovich**: Doctor of Technical Sciences, Professor, Kazan State Energy University

**Koifman Oskar Iosifovich**, Doctor of Chemical Sciences, Russian chemist, specialist in the field of synthesis, study of physico-chemical properties and practical use of porphyrins, metalloporphyrins, their structural analogues and liquid crystal compounds, Rector of Ivanovo State University of Chemical Technology, Ivanovo State University of Chemical Technology (Ivanovo)

**Kolesnikov Vladimir Aleksandrovich**: Doctor of Technical Sciences, Russian scientist in the field of industrial electrochemistry, safety and resource conservation in relation to the processes of processing modern materials, creating environmentally safe, resource-saving processes in electroplating, processing of liquid technogenic waste and water treatment, D.I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology (Moscow)

**Kuznetsov Maxim Valerievich**: Doctor of Chemical Sciences, Chief Researcher, Federal State Budgetary Institution "All-Russian Research Institute for Civil Defense and Emergency Situations of the Ministry of Emergency Situations of Russia"

**Kuzmina Larisa Vladimirovna**: Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of Solid State Chemistry and Chemical Materials Science Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Kemerovo State University"

**Leonov Valery Evgenievich**: Doctor of Technical Sciences, Professor, full member of the International Academy "Ecoenergetics", Kherson State Maritime Academy

**Muradov Shukhrat Odilovich**: Doctor of Technical Sciences, Professor, member of the Interuniversity Coordinating Council at Lomonosov Moscow State University, Karshi Institute of Engineering and Economics (Uzbekistan), Professor

**Mukhambetzhanov Saltanbek Talapedenovich**: Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Corresponding member. International Engineering Academy, Al-Farabi Kazakh National University, Professor of the Department of Computational Science and Statistics

**Mukhin Viktor Mikhailovich**: Doctor of Technical Sciences, Professor in the specialty "Ecology", laureate of the prize of the Government of the Russian Federation in the field of science and technology, Honored Inventor of the Russian Federation, Honorary Ecologist (INTERNATIONAL ACADEMY of Sciences of Ecology, Human Safety AND NATURE), Honorary Professor of the St. Petersburg State Technological Institute (Technical University), Head of the Laboratory of Active coals, elastic sorbents and catalysts of Neorganika Rostec Moscow)

**Pchelintseva Nina Vasilyevna**: Doctor of Chemical Sciences, Professor of the Department of Organic and Bioorganic Chemistry, Associate Professor, Saratov National Research State University named after N.G.Chernyshevsky (Saratov)

**Seleznev Vladimir Anatolyevich**: Doctor of Technical Sciences, Professor, Deputy Director for Scientific Work of the Institute of Ecology of the Volga Basin of the Russian Academy of Sciences - branch of the Samara Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (Samara)

**Frolkova Alla Konstantinovna**: Soviet and Russian chemist, Doctor of Technical Sciences, MIREA-Russian Technological University (Moscow)



**Fedosov Sergey Viktorovich:** *Doctor of Technical Sciences, Honored Scientist of the Russian Federation, Laureate of the Russian Government Prize in Science and Technology, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences (Moscow)*

**Khatsaeva Raisa Musaevna:** *Doctor of Biological Sciences, Leading Researcher at the Severtsov Institute of Ecology and Evolution of the Russian Academy of Sciences, Head. the electron microscopy room (Moscow)*

# СОДЕРЖАНИЕ НОМЕРА

## ОРГАНИЧЕСКАЯ ХИМИЯ (ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ)

- Тазетдинова Виктория Сергеевна, Попова Светлана Александровна,  
Павлова Эржена Тугденовна.**  
ПРИРОДНЫЙ ВОЛЬФРАМИТ КАК СОНОФОТОКАТАЛИЗАТОР ДЛЯ ОБРАБОТКИ  
ВОДЫ 12

## ФИЗИЧЕСКАЯ ХИМИЯ (ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ)

- Корчуганова Ксения Алексеевна, Яковлев Сергей Андреевич, Звекон  
Александр Андреевич, Пугачев Валерий Михайлович.**  
ПОЛУЧЕНИЕ ФЕРРИТА МЕДИ И ОЦЕНКА ЕГО ПРИМЕНИМОСТИ ДЛЯ  
КАТАЛИТИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ ВОДЫ 18

## ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ХИМИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ (ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ)

- Маркелов Александр Владимирович, Коробова Елена Борисовна,  
Гриценко Елена Александровна.**  
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОБЛЕМЫ ВОДООТВОДА С АВТОДОРОЖНЫХ МОСТОВЫХ  
СООРУЖЕНИЙ 27

- Гамазин Виктор Петрович.**  
ЭКОЛОГО-ХИМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА МЕТОДА ОЧИСТКИ  
ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ СТОЧНЫХ ВОД 33

- Незамаев Сергей Владимирович, Быков Александр Александрович,  
Бобков Владимир Иванович.**  
АНАЛИЗ СИСТЕМЫ ОЧИСТКИ АСПИРАЦИОННЫХ ГАЗОВ И ОТ ЗОНЫ  
ОХЛАЖДЕНИЯ АГЛОМЕРАЦИОННОЙ МАШИНЫ ДЛЯ СПЕКАНИЯ  
ФОСФОРИТОВОЙ РУДНОЙ МЕЛОЧИ 40

- Сысуев Владислав Васильевич.**  
ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ГРУНТОВЫХ И ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД ПРИ  
ФОРМИРОВАНИИ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА НИЗИННОГО ТОРФЯНИКА 47

- Фоменко Александра Ивановна.**  
АДСОРБЦИОННАЯ ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД ОТ ФОСФАТОВ 58

## ПРОЧИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ХИМИЧЕСКИХ НАУК

- Заитов Руслан Ильдарович.**  
ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КАТАЛИТИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ПРОЦЕССЫ КОНВЕРСИИ  
ПРИ СЖИГАНИИ ГАОЗЗОБРАЗНОГО ТОПЛИВА 66

# CONTENTS

## ORGANIC CHEMISTRY (CHEMICAL SCIENCES)

- Tazetdinova Victoria Sergeevna, Popova Svetlana Alexandrovna, Pavlova Erzhena Tugdenovna.**  
NATURAL WOLFRAMITE AS A SONOPHOTOCATALYST FOR WATER TREATMENT 12

## PHYSICAL CHEMISTRY (CHEMICAL SCIENCES)

- Korchuganova Ksenia Alekseevna, Yakovlev Sergey Andreevich, Zvekov Alexander Andreevich, Pugachev Valery Mikhailovich.**  
PRODUCTION OF COPPER FERRITE AND EVALUATION OF ITS APPLICABILITY FOR CATALYTIC WATER PURIFICATION 18

## PROCESSES AND DEVICES OF CHEMICAL TECHNOLOGIES (CHEMICAL SCIENCES)

- Markelov Alexander Vladimirovich, Korobova Elena Borisovna, Gritsenko Elena Alexandrovna.**  
INVESTIGATION OF THE PROBLEM OF DRAINAGE FROM ROAD BRIDGE STRUCTURES 27

- Gamazin Victor Petrovich.**  
ECOLOGICAL AND CHEMICAL JUSTIFICATION OF THE CHOICE OF GALVANIC WASTEWATER TREATMENT METHOD 33

- Nezamaev Sergey Vladimirovich, Bykov Alexander Alexandrovich, Bobkov Vladimir Ivanovich.**  
ANALYSIS OF THE ASPIRATION GAS PURIFICATION SYSTEM AND FROM THE COOLING ZONE OF THE SINTERING MACHINE FOR SINTERING PHOSPHORITE ORE FINES 40

- Sysuev Vladislav Vasilyevich.**  
THE INTERACTION OF GROUNDWATER AND SURFACE WATERS IN THE FORMATION OF THE CHEMICAL COMPOSITION OF A LOWLAND PEAT BOG 47

- Fomenko Alexandra Ivanovna.**  
ADSORPTION TREATMENT OF WASTEWATER FROM PHOSPHATES 58

## OTHER RESEARCH IN CHEMICAL SCIENCES

- Zaitov Ruslan Ildarovich.**  
ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF CATALYTIC SYSTEMS ON CONVERSION PROCESSES DURING COMBUSTION OF GASEOUS FUELS 66

# ОРГАНИЧЕСКАЯ ХИМИЯ (ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ)

---



УДК 549.08, 544.473

## ПРИРОДНЫЙ ВОЛЬФРАМИТ КАК СОНОФОТОКАТАЛИЗАТОР ДЛЯ ОБРАБОТКИ ВОДЫ

Тазетдинова Виктория Сергеевна,  
Попова Светлана Александровна,  
Павлова Эржена Тугденовна

*Данная работа посвящена минералогической характеристике и оценке сонофотокаталитической активности природного вольфрамита с Холтосонского месторождения Республики Бурятия под действием высокочастотного ультразвукового (1,7 МГц) и ультрафиолетового (365 нм) излучения светодиодов без и в присутствии окислителя  $H_2O_2$ . Установлен элементный и фазовый состав, получены СЭМ-снимки и определена удельная площадь поверхности по БЭТ. Результат РФА показал, что вольфрамит представляет собой гюбнерит состава  $Mn_{0.88}Fe_{0.12}WO_4$ , марганцевый член изоморфного ряда со следовым количеством железа. Методом химической дозиметрии с использованием 4-хлорбензойной кислоты как ловушки гидроксильных радикалов установлено, что гюбнерит активизируется только при одновременном облучении ультрафиолетом и ультразвуком. В присутствии  $H_2O_2$  эффективность такой сонофотокаталитической системы увеличивается на 35%. Полагаем, что природный гюбнерит может найти применение в разработке сонофотокаталитического метода обработки воды на базе высокочастотного ультразвука и более коротковолнового УФ излучения.*

**Ключевые слова:** природный вольфрамит, гюбнерит, сонофотокатализ, высокочастотный ультразвук, УФ излучение.

Природные минералы представляют собой привлекательную альтернативу синтезированным сонофотокатализаторам как доступные и экологичные материалы для очистки природных и сточных вод. Как известно, гетерогенный фотокатализ является эффективным методом, основанным на окислении органических молекул активными формами кислорода, в первую очередь, гидроксильными радикалами ( $\bullet OH$ ). Радикалы образуются в водной среде при поглощении полупроводниковым материалом (фотокатализатором) кванта электромагнитного излучения в УФ или видимом диапазоне с энергией, равной или превышающей ширину запрещенной зоны. В сонофотокатализе для активации фотокатализаторов также используется ультразвуковое (УЗ) излучение. Сонофотокатализ представляет собой большой интерес с точки зрения повышенной генерации радикалов и интенсификации окислительных реакций [1-3]. К настоящему времени, в сонофотокатализе применялся, в основном, низкочастотный ультразвук с частотой ниже 100 кГц. Как установлено ранее, высокочастотный ультразвук с частотой выше 100 кГц является более эффективным по генерации активных форм кислорода [4]. Синтезированные катализаторы, например, наноккомпозиты на основе  $TiO_2$ , обладают высокой активностью, но являются дорогостоящими и могут быть токсичными для водной биоты. Фотоактивные природные минералы, как известно, экологически безопасны, доступны по цене и являются перспективными фотокатализаторами для применения в обработке воды [5-9]. Целью данной работы является минералогическая характеристика и оценка сонофотокаталитической активности природного вольфрамита по генерации гидроксильных радикалов без и в присутствии окислителя  $H_2O_2$  с использованием УФ светодиодов (365 нм) и высокочастотного ультразвука (1,7 МГц).

### Материалы и методы

Рудные образцы природного вольфрамита  $[(Fe, Mn)WO_4]$  были отобраны на Холтосонском месторождении Республики Бурятия (Россия). Образцы измельчали на шаровой

мельнице, растирали в агатовой ступке и просеивали до получения порошка с размером частиц менее 75 мкм (Рисунок 1).

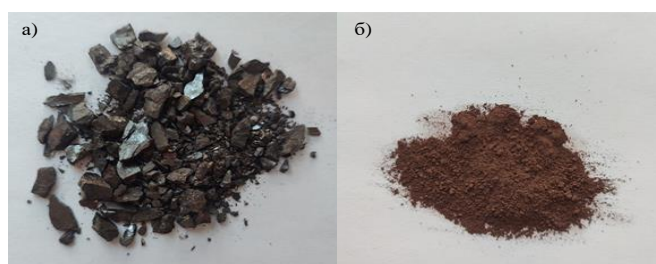


Рисунок 1. Исходный (а) и подготовленный (б) образец природного вольфрамита

Фазовый состав определяли методом рентгенофазового анализа (РФА) на порошковом рентгеновском дифрактометре D2 Phaser Bruker (CuK $\alpha$ -излучение, Bruker, Германия) в диапазоне углов 2 $\theta$  5°–80° с шагом 0.02. Микроскопические снимки образцов были получены с помощью сканирующей электронной микроскопии (JCM-6000, Jeol). Элементный состав определяли методом сканирующей электронной микроскопии (LEO-1430VP, Carl Zeiss) с системой микроанализа – энергодисперсионным спектрометром (INCA Energy 350, Oxford Instruments). Удельную площадь поверхности образцов природного вольфрамита по БЭТ измеряли методом низкотемпературной адсорбции-десорбции азота на установке Термосорб LP (ИФП СО РАН, г. Новосибирск).

Генерацию •ОН исследовали методом химической дозиметрии с использованием 4-хлорбензойной кислоты (4-ХБК) в качестве ловушки радикалов без и в присутствии вольфрамита в следующих системах: УФ, УЗ, УФ+Вольфрамит, УЗ+Вольфрамит, УФ+УЗ+Вольфрамит. Эти же системы протестированы в присутствии H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Водные растворы 4-ХБК (99%, Acros, Бельгия) и пероксида водорода (33%, Лега, Россия) готовили в деионизированной воде (18,2 мСм/см, Simplicity®UV, Millipore, Франция).

Эксперименты выполнены в лабораторном сонофотореакторе на основе УФ светодиодов (365 нм) и ультразвукового излучателя (1,7 МГц). Водный раствор 4-ХБК (C<sub>0</sub> = 34 мкмоль/л) помещали в реактор, вносили катализатор (C<sub>0</sub> = 1 г/л) и облучали УФ и/или УЗ излучением. Пробы, отобранные через 10, 20, 30 и 40 мин обработки, анализировали на остаточную концентрацию 4-ХБК методом ВЭЖХ с УФ детектором. Квазистационарные концентрации [•ОН] определяли по скорости деструкции по уравнению (1):

$$-\frac{d[4\text{-ХБК}]}{dt} = k_{4\text{-ХБК}, \bullet\text{ОН}} [4\text{-ХБК}][\bullet\text{ОН}], \quad (1)$$

где  $k_{4\text{-ХБК}, \bullet\text{ОН}} = 5 \times 10^9 \text{ M}^{-1} \text{ c}^{-1}$  [10].

Константы скорости деструкции 4-ХБК (с<sup>-1</sup>) определяли по уравнению реакции (псевдо)-первого порядка из линейных зависимостей Ln(C/C<sub>0</sub>) от времени (с).

### Результаты и обсуждение

Согласно литературным данным, вольфрамит имеет ширину запрещенной зоны 1.5 эВ и может возбуждаться видимым излучением [8]. Основной элементный состав природного вольфрамита представлен марганцем, вольфрамом и кислородом (99.4%) (Таблица 1). Установлено, что данный минерал из группы вольфрамита является гюбнеритом – марганцевым членом изоморфного ряда твёрдого раствора ферберит-гюбнерит, содержащим следовое количество железа.

Таблица 1.

Элементный состав природного вольфрамита

Элемент	Fe	Mn	W	O
Содержание, %	0.66	18.48	63.19	17.71

Дифрактограмма вольфрамита характеризовалась интенсивными рефлексиями при углах 2 $\theta$  15.4°, 18.4°, 23.6°, 24.1°, 29.9°, 30.3°, 31.2°, 36.0°, 36.1°, которые отнесены к фазе состава Mn<sub>0.88</sub>Fe<sub>0.12</sub>WO<sub>4</sub> [11] (Рисунок 2).

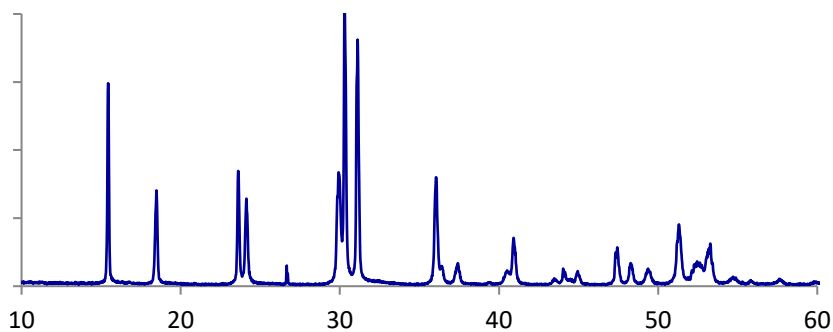


Рисунок 2. Дифрактограмма природного вольфрамита

Изотермы адсорбции показали, что площадь поверхности по БЭТ относительно низкая и составляет  $0.462 \text{ м}^2/\text{г}$ . Полученные значения указывают на низкие сорбционные свойства и сравнимы с литературными данными о площади поверхности природного вольфрамита из Китая ( $0.9763 \text{ м}^2/\text{г}$ ) [8]. Поверхность представлена микрочастицами неправильной формы в широком диапазоне размеров (Рисунок 3).

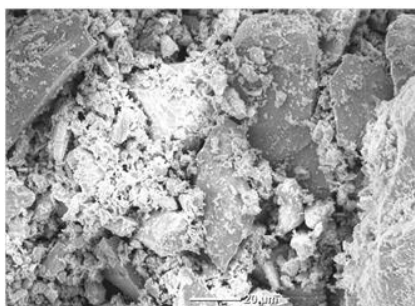


Рисунок 3. СЭМ снимок природного вольфрамита (губнерита)

Результаты тестирования вольфрамита на генерацию  $\bullet\text{OH}$  показали, что при УФ и УЗ облучении (системы УФ+Вольфрамит и УЗ+Вольфрамит) он не проявляет измеримую фотокаталитическую активность и 4-ХБК не окисляется (Рисунок 4). Это обусловлено наличием примесей в составе и для фотоактивации данного минерала, возможно, требуется более высокоэнергичный квант (более коротковолновое ультрафиолетовое излучение).

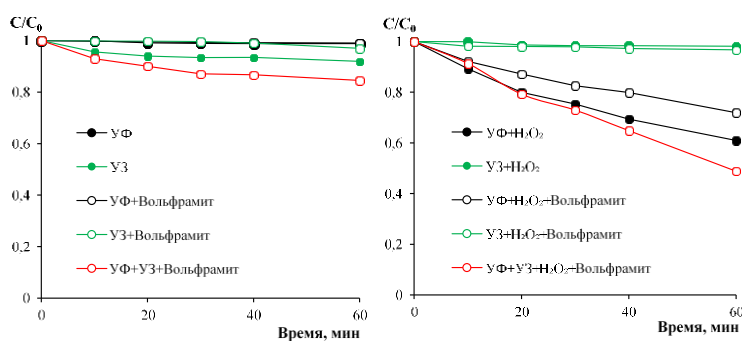


Рисунок 4. Кинетика окисления 4-хлорбензойной кислоты как ловушки радикалов в сонофотокаталитических системах без и в присутствии  $\text{H}_2\text{O}_2$ .  
 $[4\text{-ХБК}]_0 = 34 \text{ мкмоль/л}$ ,  $[\text{Вольфрамит}]_0 = 1 \text{ г/л}$ ,  $[\text{H}_2\text{O}_2]_0 = 1 \text{ ммоль/л}$

Тем не менее, дополнительное облучение высокочастотным ультразвуком в течение 60 мин (УФ+УЗ+Вольфрамит) привела к разложению 15% 4-ХБК, что качественно указывает на генерацию радикалов. В силу нелинейности кинетических зависимостей константы скорости окисления и концентрации  $\bullet\text{OH}$  в этой системе определить не удалось. Внесение  $\text{H}_2\text{O}_2$  увеличило эффективность сонофотокаталитической системы с губнеритом на 35% (УФ+УЗ+ $\text{H}_2\text{O}_2$ +Вольфрамит). Найденная при этом квазистационарная концентрация  $\bullet\text{OH}$

составила  $2,4 \times 10^{-12}$  моль/л ( $k=0,0002 \text{ с}^{-1}$ ). Это в два раза выше концентрации  $\bullet\text{OH}$  без УЗ воздействия в системе УФ+ $\text{H}_2\text{O}_2$ +Вольфрамит ( $k=0,0001 \text{ с}^{-1}$ ). Таким образом, сонофотокаталитическая система с использованием  $\text{H}_2\text{O}_2$  является наиболее эффективной по генерации гидроксильных радикалов.

#### **Заключение**

Природный вольфрамит (гюбнерит) проявляет сонофотокаталитическую активность при облучении УФ светодиодами (365 нм) и высокочастотным ультразвуком (1,7 МГц) в водном растворе. Фотокаталитическая активность минерала (без ультразвука) не выявлена. В присутствии пероксида водорода эффективность сонофотокаталитической системы увеличивается. Полагаем, что природный гюбнерит перспективен как сонофотокатализатор при обработке воды высокочастотным ультразвуком и более коротковолновым УФ излучением.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Бурятского государственного университета имени Доржи Банзарова (проект 123102500045-5).*

#### **БИБЛИОГРАФИЯ**

1. Sathishkumar P., Mangalaraja R.V., Anandan S., 2016. Review on the recent improvements in sonochemical and combined sonochemical oxidation processes – A powerful tool for destruction of environmental contaminants. *Ren. Sustain. Energy Rev.* 55, 426–454.
2. Panda D., Manickam S. Recent advancements in the sonophotocatalysis (SPC) and doped-sonophotocatalysis (DSPC) for the treatment of recalcitrant hazardous organic water pollutants // *Ultrason. Sonochem.* 2017. Vol. 36. P.481–496.
3. Yap H.C., Pang Y.L., Lim S., Abdullah A.Z., Ong H.C., Wu C.-H., 2019. A comprehensive review on state-of-the-art photo-, sono-, and sonophotocatalytic treatments to degrade emerging contaminants. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 16, 601–628.
4. Matafonova G.; Batoev V. Review on low- and high-frequency sonolytic, sonophotolytic and sonophotochemical processes for inactivating pathogenic microorganisms in aqueous media // *Water Res.* 58 2019. Vol. 166. P. 115085.
5. *Advances in Photocatalytic Disinfection, Green Chemistry and Sustainable Technology* [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-53496-0> (дата обращения: 26.03.2024).
6. Hamza, A.; John, I.J.; Mukhtar, B. Enhanced photocatalytic activity of calcined natural sphalerite under visible light irradiation // *J. Mater. Res. Technol.* 2017. Vol. 6. P. 1–6.
7. Moradi M., Kalantary R.R., Esrafil A., Jafari A.J., Gholami M., 2017. Visible light photocatalytic inactivation of *Escherichia coli* by natural pyrite assisted by oxalate at neutral pH. *J. Mol. Liq.* 248, 880–889.
8. Li L., Li Y., Li Y., Lu A., Ding H., Wong P.K., Sun H., Shi J., 2020. Natural wolframite as a novel visible-light photocatalyst towards organics degradation and bacterial inactivation. *Catal. Today* 358, 177–183.
9. Shen C.; Gu X.; Yang B.; Zhang D.; Wang Z.; Shu Z.; Dick J.; Lu A. Mineralogical characteristics and photocatalytic properties of natural sphalerite from China // *J. Environ. Sci.* 2020 Vol. 89. P. 156–166.
10. Elovitz M.S., von Gunten U. 1999. Hydroxyl radical/ozone ratios during ozonation processes. I. The  $R_{ct}$  concept. *Ozone Sci. Eng.* 21, 239–260.
11. ICDD PDF-2 Data Base: Cards №01-084-3823.

\*\*\*\*\*



## NATURAL WOLFRAMITE AS A SONOPHOTOCATALYST FOR WATER TREATMENT

Tazetdinova V.S., Popova S.A., Pavlova E.T.

This study is devoted to the mineralogical characterization and assessment of the sonophotocatalytic activity of natural wolframite from Kholtoison deposit of the Republic of Buryatia under exposure to high-frequency ultrasonic (1.7 MHz) and ultraviolet (365 nm) radiation of light-emitting diodes with and without H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. The elemental and phase composition was determined, SEM images were obtained and the BET specific surface area was calculated. The XRD analysis showed that the wolframite represents the hubnerite of composition Mn<sub>0.88</sub>Fe<sub>0.12</sub>WO<sub>4</sub>, a manganese-rich member of the isomorphic series with a trace amount of iron. Using chemical dosimetry with 4-chlorobenzoic acid as a radical trapping agent, the hubnerite was found to be activated only under simultaneous irradiation with UV and ultrasound. Adding H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> increased the efficiency of such sonophotocatalytic system by 35%. We propose that natural hubnerite can be applied for the development of sonophotocatalytic method of water treatment on the basis of high-frequency ultrasound and shorter wavelength UV radiation.

**Keywords:** natural wolframite, hubnerite, sonophotocatalysis, high-frequency ultrasound, UV radiation.

---

## Сведения об авторах:

**Тазетдинова Виктория Сергеевна**

Магистрант первого года обучения, инженер,  
ФГБОУ ВО «Бурятский государственный университет имени Доржи Банзарова»,  
Институт естественных наук,  
ФБГУН Байкальский институт природопользования СО РАН  
Республика Бурятия, г. Улан-Удэ  
E-mail: [vtazetdinova02@binm.ru](mailto:vtazetdinova02@binm.ru)

**Попова Светлана Александровна**

Кандидат биологических наук, научный сотрудник  
лаборатории инженерной экологии,  
ФБГУН Байкальский институт природопользования СО РАН  
Республика Бурятия, г. Улан-Удэ,  
E-mail: [spopova@binm.ru](mailto:spopova@binm.ru)

**Павлова Эржена Тугденовна**

Кандидат химических наук, доцент,  
заведующий лабораторией материаловедения ФГБОУ ВО «Бурятский государственный  
университет имени Доржи Банзарова»  
Институт естественных наук,  
Республика Бурятия, г. Улан-Удэ  
E-mail: [pavlova@bsu.ru](mailto:pavlova@bsu.ru)

# ФИЗИЧЕСКАЯ ХИМИЯ (ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ)

---

УДК 66.067.12; 54.4

## ПОЛУЧЕНИЕ ФЕРРИТА МЕДИ И ОЦЕНКА ЕГО ПРИМЕНИМОСТИ ДЛЯ КАТАЛИТИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ ВОДЫ

Корчуганова Ксения Алексеевна,  
Яковлев Сергей Андреевич,  
Звеков Александр Андреевич,  
Пугачев Валерий Михайлович,

*В работе предложен вариант получения феррита меди при помощи спекания порошков оксалат железа (II) и основного карбоната меди. Методом рентгеноструктурного анализа показано, что в первом случае получается феррит в модификации кубической шпинели с высоким содержанием примеси оксида меди, а во втором - тетрагональной шпинели. Измеренные спектры комбинационного рассеяния подтвердили структуру образца, полученного цитратным методом, и показали неоднородность образца, полученного спеканием порошков. Возможность использования полученных ферритов для каталитической водоочистки продемонстрирована на модельной реакции окисления метиленового синего пероксидом водорода в водном растворе. Показано, что в присутствии феррита меди наблюдается полное окисление в течении 12 часов, без катализатора убыли концентрации красителя практически не наблюдается.*

**Ключевые слова:** феррит меди, каталитическая очистка воды, рентгено-фазовый анализ, спектроскопия комбинационного рассеяния.

Ферриты металлов являются разновидностью смешанных оксидов, которые также можно рассматривать как соли несуществующей кислоты  $\text{HFeO}_2$ . Ферриты широко применяются благодаря своим магнитным свойствам в радиотехнической аппаратуре (антенны сотовых телефонов) и электронных системах для преобразования электрической энергии в другие формы, в частности тепловую (микроволновые печи), механическую (поворот ракетных двигателей, вращение оружейных систем наведения) [1]. Область магнитных наноферритов привлекает интерес исследователей во всем мире благодаря их уникальным электронным, оптическим и магнитным свойствам, которые можно настраивать с помощью внешнего магнитного поля, что открывает новые возможности с технологической и теоретической точки зрения [2-4].

Ферриты привлекают внимание и как катализатор для окислительно-восстановительных реакций, включая дегидрирование углеводородов [5] и восстановление п-нитрофенола до п-аминофенола борогидридом натрия [6]. Предложено использовать ферриты как катализаторы озонолитической очистки воды [7]. Усиление окислительной способности озона в этом случае достигается за счет генерации гидроксильных радикалов [7], что позволяет окислять соединения не склонные к классическом озонолиту. Феррит меди, полученный из отходов металлургического производства, показал высокую активность в качестве катализатора фотохимического окисления метиленового синего [8]. Имеется возможность получения ферритов с высокими значениями удельной площади поверхности [9], что позволяет их использовать в адсорбционных технологиях очистки воды.

Классические технологии производства ферритов предусматривают применение оксидов цветных металлов очень высокой степени очистки, а также высокие энергозатраты при синтезе (предварительный обжиг и спекание в течение 2-6 часов при температурах

900-1200 °С) [4]. По этой причине разрабатываются способы, основанные на соосаждении железа и необходимого металла, а также на комплексоновой гомогенизации [9]. Отдельное актуальное направление: разработка способов получения товарных ферритов из отходов промышленных предприятий. На ряде металлообрабатывающих производств в ходе технологического процесса применяют травление металлических деталей, с последующей гальванической обработкой. В результате чего сточные воды загрязняются солями железа, меди, кадмия, кобальта и цинка. Высокое содержание солей металлов делает их перспективным сырьем для получения ферритов смешанного состава.

Таким образом, разработка методов получения ферритов с использованием новых прекурсоров для каталитических приложений, в том числе окислительной и адсорбционной водоочистки [10-13], является перспективным направлением исследований. Ранее в нашей лаборатории предложен метод получения композитного материала в виде пористой углеродной матрицы с нанесенным на ее поверхность магнетитом [14,15], который можно рассматривать как феррит железа. Предложенный способ может получить дальнейшее развитие с использованием ферритов металлов в высшей степени окисления. Цель работы: апробация методики получения феррита цинка спеканием порошков оксалата железа (II) и основного карбоната меди и оценка его применимости в окислительной очистке воды. Задачи: получение образцов феррита меди, характеристика продукта физико-химическими методами, оценка активности в реакции окисления метиленового синего пероксидом водорода.

#### **Методы получения**

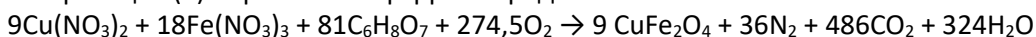
Получение феррита меди из оксалата железа и основного карбоната меди заключалась в перетирании исходных веществ в агатовой ступке с добавлением 1% нитрата калия в качестве агента, улучшающего сплавление. Полученный порошок спекали в муфельной печи при 900 °С в течении 6 часов. Методика основана на типичных подходах к синтезу ферритов спеканием порошков [16].

Для сравнения феррит меди также был получен цитратным методом. Получение образцов было произведено по нижеперечисленным методикам, найденным в литературных источниках [16], и скорректированным согласно имеющихся реактивов.

В ходе первого метода – получали смеси хелатированных ионов металлов, гомогенно распределенных в растворе с протеканием реакции самовозгорания, что приводит к получению феррита.

Брали заранее рассчитанную навеску нитратов железа (III), нитрата меди (II) и лимонной кислоты и растворяют в дистиллированной воде, получали раствор, в котором на один ион металла приходится по три молекулы лимонной кислоты. При нагревании и непрерывном перемешивании добавляли аммиак для поддержания pH ~ 8 (слабощелочная среда). Наблюдала изменение цвета раствора ввиду образования золя [16].

Раствор упаривали на плитке до образования медообразной массы (геля). Гель помещали в муфельную печь, разогретую до температуры 150°С, выдерживают 6-10 часов. Возможная реакция (2) образования феррита представлена ниже:



Ввиду протекания экзотермических реакций при горении органических веществ и разложении нитратов возможно локальное повышение температуры при выдерживании в муфельной печи. Далее полученный образец прокаливали 6 часов в муфельной печи при 900 °С.

#### **Методы исследования**

Для характеристики полученных образцов были применены физико-химических методы исследования:

- Рентгенофазовый анализ – определение элементного, химического и фазового составов продуктов. Рентгенограммы и спектры образцов регистрировали на дифрактометрах Дифрей-401 в железном излучении (с бета-фильтром) и ДРОН-8 в медном излучении [17-18].

- Спектроскопия комбинационного рассеяния была выполнена с помощью конфокального спектрометра Horiba LabRAM HR800 с решеткой 1800 штр/мм, объективом LWDx50 и установленным конфокальным отверстием 200 мкм в геометрии обратного рассеяния. Для измерения интенсивности рассеянного света использовался охлаждаемый (-70 °С) матричный фотоприемник Synapse354308.



При оценке каталитической активности спектры оптического поглощения растворов измеряли на спектрофотометре SHIMADZU UV-1700 PharmaSpec.

### Результаты и обсуждения

Для проверки закладываемого при синтезе состава, фазовой структуры, параметров, а также формы элементарной ячейки, провели рентгенофазовый анализ. Ферриты двухвалентных металлов обычно имеют структуру шпинели, представляющей собой трехслойную плотнейшую упаковку из атомов кислорода (8 ГЦК-ячеек на ячейку шпинели), в октаэдрических пустотах которой в основном находятся атомы железа ( $Me^{3+}$ ), а в тетраэдрических – атомы меди ( $Me^{2+}$ ). В отличие от многих оксидов  $MeO$ , относящихся к структурному типу  $NaCl$ , оксид меди  $CuO$  имеет моноклинную решетку и более сложную структуру. Такая склонность меди к образованию менее симметричных структур, очевидно, сказывается и на структуре шпинели.

Соответственно в базе данных ICDD имеется два варианта: один – нормальная ГЦК-шпинель с параметром решетки 8.349 Å (3 на Рисунок 1), другой – шпинель с тетрагональным искажением и параметрами  $a = 5.844$  и  $c = 8.630$  Å (4 на Рисунок 2). Тетрагональная решетка – объемно-центрированная, но можно выбрать тетрагональную ГЦ-ячейку (ГЦТ) с параметром «а», являющимся диагональю основания тетрагональной ячейки, т.е. 8.265 Å.

В исследуемых образцах параметры составляют 8.230(1) и 8.687(2) у шпинели-1 и 8.419(1) у шпинели-2 (в одноименных образцах на Рисунок 1).

Наблюдаемое разнообразие параметров и формы элементарной ячейки обусловлено, в частности, различным соотношением металлов (оксидов) в шпинелях. Можно предположить, что медь склонна искажать кислородное тетраэдрическое окружение так, что размеры тетраэдра вдоль его осей 2-го порядка становятся в направлении оси «а» меньше, чем в направлении «с». Это и приводит к тетрагональному искажению с удлиненным параметром «с».

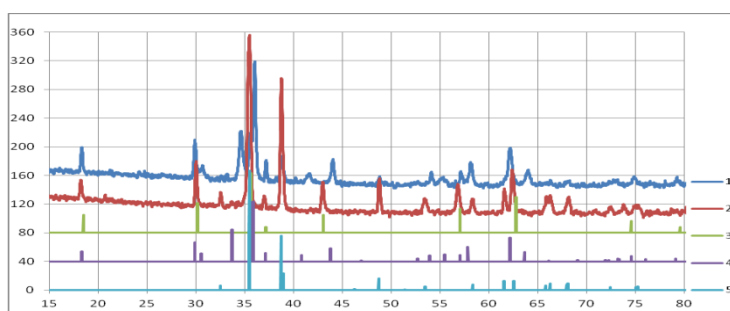


Рисунок 1. Дифрактограммы исследуемых образцов 1 и 2 и штрихдиаграммы по данным баз ICDD:  $CuFe_2O_4$  (3 – PDF 250289, 4 – PDF 340425) и  $CuO$  (5 – PDF 480937)

В «эталонных» шпинелях 3 и 4 наблюдается аналогичная закономерность – антибатное изменение параметров, и также меди может быть больше в тетрагональной шпинели-4 (Таблица 1).

Таблица 1.

Параметры решетки шпинелей  $CuO \cdot Fe_2O_3$

N	a	c	V	
3	8,349	8,349	582,0	ГЦК
2	8,419	8,419	596,7	ГЦК
4	8,265	8,630	589,5	ГЦТ
1	8,230	8,687	588,4	ГЦТ

Дополнительным фактором влияния на параметры ячейки в шпинелях является возможность их обращения, когда двухвалентные катионы занимают места не только в тетраэдрах, но и в октаэдрах, соответственно трёхвалентные могут попасть в тетраэдры. Наконец, часть железа может оказаться в двухвалентном состоянии и тогда тетраэдры могут заполняться смешанным образом. Все это и приводит к вариативности параметров и формы элементарной ячейки.

КР-спектры образца, полученного золь-гель методом представлены на Рисунок 2, различные кривые измерены в разных точках образца. Область волновых чисел более 800 содержит только обертона. В данном случае образец достаточно однородный, поскольку спектр слабо меняется при измерении в различных точках. Спектр (Рисунок 2) совпадает с приведенным в [4] для феррита меди со структурой тетрагональной шпинели (таблица 2).

Таблица 2.

**Полосы в КР-спектре феррита меди, полученного золь-гель методом**

п/п	Волновое число, см <sup>-1</sup>	
	Настоящая работа	Литературные данные [4]
1	181	192
2	264	286
3	360	347
4	487	482
5	542	553
6	693	660.7

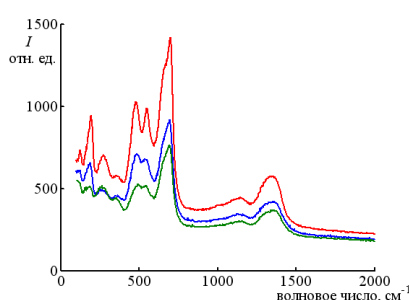


Рисунок 2. КР-спектры феррита, полученного золь-гель методом, измеренные в различных точках образца

КР-спектр феррита, полученного спеканием порошков, зависит от точки измерения (Рисунок 3). Полосы при 290 и 680 см<sup>-1</sup> (синяя кривая) встречаются в КР-спектре кубического феррита 295 и 696 см<sup>-1</sup> соответственно [4]. Полоса при 451 см<sup>-1</sup> (зеленая кривая на Рисунок 3), возможно связана с кубическим ферритом (477 см<sup>-1</sup>). Полоса при 327 см<sup>-1</sup> может быть интерпретирована как связанная с примесью оксида меди CuO - 336 см<sup>-1</sup> [19]. Интерпретация полос при 378 и 434 см<sup>-1</sup> затруднительна. Зависимость КР-спектра от точки измерения, а также наличие полосы, типичной для оксида меди согласуются с рассмотренными ранее результатами рентгенографического исследования образца, полученного методом спекания порошков.

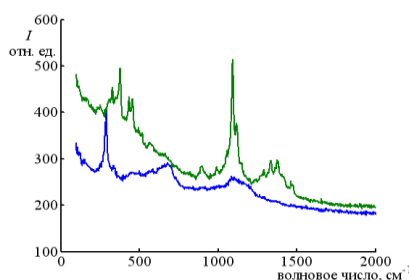


Рисунок 3. КР-спектры феррита, полученного спеканием порошков, измеренные в различных точках образца

Для оценки применимости полученных ферритов в процессе очистки воды использовался следующий модельный эксперимент. В две пробирки был помещен раствор красителя метиленового синего, разбавленный водным раствором пероксида водорода (3%). В одну из пробирок добавили полученный феррит меди, полученный золь-гель методом. При добавлении повысилась скорость разложения пероксида водорода, видимая по появлению пузырьков газа. После оставления пробирок на 12 часов в темном месте наблюдалось практически полное обесцвечивание раствора в случае присутствия феррита меди (Рисунок 4).

Цвет раствора в холостом опыте сохранился. Результаты визуальных наблюдений доказывают измеренные спектры поглощения растворов, представлены на Рисунок 5.



Рисунок 4. Фотографии пробирок, показывающие каталитическую активность феррита меди в реакции окисления метиленового синего пероксидом водорода

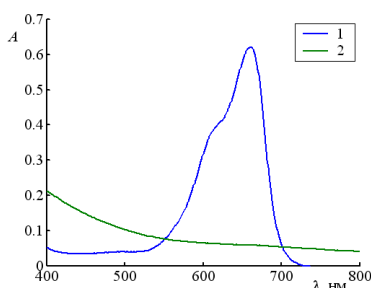


Рисунок 5. Спектры поглощения раствора холостого опыта (1) и при наличии феррита меди (2)

Представленный на Рисунок 5 спектр типичен для метиленового синего в водном растворе. Наблюдаемый на втором спектре фон свидетельствует о сохранении в растворе небольшого количества коллоидных частиц феррита меди, при этом метиленовый синий полностью окислился пероксидом водорода.

Результаты модельного эксперимента показывают каталитическую активность феррита меди в процессе окисления органических соединений пероксидом водорода. В дальнейшем планируется протестировать более практичные окислители, в частности, озон.

#### **Заключение**

Предложена разновидность метода получения феррита меди спеканием оксалата железа и основного карбоната меди, для сравнения получен образец золь-гель синтезом. Показано, что в первом случае преобладает кубическая с примесью оксида меди, а втором – тетрагональная шпинель. Доказано, что полученные ферриты обладают каталитической активностью в реакции окисления органических соединений пероксидом водорода, что делает их применение в процессах водоочистки обнадеживающим.

*Работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FZSR-2020-0007 в рамках государственного задания № 075-03-2020-097/1). Авторы выражают благодарность м.н.с. Чирковой И.М. и к.ф.-м.н. Севостьянову О.Г. за измерение спектров комбинационного рассеяния.*

#### **БИБЛИОГРАФИЯ**

1. Налогин, А.Г. Электронная техника. Серия 1: СВЧ-техника / А.Г. Налогин, М.Г. Семенов, Н.Д. Урсуляк // 2016. – № 4. – (531). – С. 65-71.
2. Balaji, M. Core-shell structure in copper ferrite-polyaniline nanocomposite: Confirmation by laser Raman spectra / M. Balaji, P. Chithra Lekhab, D. Pathinettam Padiyan // Vibrational Spectroscopy. – 2012. – V. 62 – P. 92– 97.

3. Singh, S. Structural, Optical and vibrational study of zinc copper ferrite nanocomposite prepared by exploding wire technique. / S. Singh, A. Sahai, S.C. Katyal, N. Goswami // *Materials Science-Poland*. – 2018. – V. 36. – P. 722-732.
4. Channagoudra, G. Role of structure and cation distribution on magnetic and electrical properties in inverse spinel copper ferrite / G. Channagoudra, A. K. Saw, V. Dayal // *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. – 2021. – V. 154. – 110086.
5. Toledo-Antonio, J.A. Correlation between the magnetism of non-stoichiometric zinc ferrites and their catalytic activity for oxidative dehydrogenation of 1-butene/ J.A. Toledo-Antonio, N. Nava, M. Mart'inez, X. Bokhimi // *Applied Catalysis A: General*. – 2002. – V. 234. – P. 137–144
6. Zhang, H. Copper ferrite–graphene hybrid: a highly efficient magnetic catalyst for chemoselective reduction of nitroarenes / H. Zhang, Sh. Gao, N. Shang, Ch. Wang, Zhi Wang // *RSC Advances*. – 2014. - № 4. – P. 31328-31332.
7. Zhang, F. Zinc ferrite catalysts for ozonation of aqueous organic contaminants: phenol and bio-treated coking wastewater / F. Zhang, C. Wei, Y. Hu, H. Wu // *Separation and Purification Technology*. – 2015. – V. 156. – 625-635.
8. Rashad, M.M. Magnetic and catalytic properties of cubic copper ferrite nanopowders synthesized from secondary resources / M.M. Rashad, R.M. Mohamed, M.A. Ibrahim, L.F.M. Ismail, E.A. Abdel-Aal. // *Advanced Powder Technology*. – 2012. – V. 23 – P. 315–323.
9. Tadjarodi, A. Innovative one pot synthesis method of the magnetic zinc ferrite nanoparticles with a superior adsorption performance / A. Tadjarodi, M. Salehi, M. Imani. // *Materials Letters* – 2015. – V. 152. – P. 57–59.
10. Власова, А.Ю. Повышение эффективности очистки воды питьевого качества путем внедрения сорбционного метода/ А.Ю. Власова, И.Н. Шкиндерова, С.Н. Савдур // *Вода: химия и экология*. – 2023. – № 10. – С. 10-15.
11. Фоменко, А.И. Адсорбция катионов железа из водных растворов минеральными сорбентами/ А.И. Фоменко // *Вода: химия и экология*. – 2023. – № 10. – С. 22-28.
12. Арзуманова, А.В. Разработка каталитически активного материала на основе феррита никеля (II) для очистки водных растворов от ионов хрома / А.В. Арзуманова, Ю.А. Гайдукова // *Вода: химия и экология*. – 2023. – № 8. – С. 10-17.
13. Юдаков, А.А. Новые высокоэффективные искусственно гидрофобизированные сорбенты для очистки сточных вод от нефтепродуктов / А.А. Юдаков, Т.В. Ксеник, А.В. Перфильев // *Водоочистка*. – 2009. – № 5-6. – С. 64-65.
14. Каленский, А.В. Получение магнитных углеродных материалов при разложении солей железа, нанесенных на пористую углеродную матрицу/ А.В. Каленский, А.А. Звекон, А.Н. Попова, В.А. Ананьев, О.В. Гришаева // *Журнал прикладной химии*. – 2021. – Т. 94. – Вып. 4. – С. 491- 495.
15. Kalenskii, A. The adsorption performance of porous activated carbons prepared from iron (II) precursors precipitated on the porous carbon matrix thermolysis / A. Kalenskii, A. Ivanov, D. Sevostyanov, A. Zvekov, A. Krechetov // *Magnetochemistry*. – 2023. – V. 9. – № 6. – С. 151.
16. Зирник, Г.М. Установление минимальных температурных и временных порогов образования ферритов-шпинелей  $\text{CuFe}_2\text{O}_4$ ,  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$ ,  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$ ,  $\text{ZnFe}_2\text{O}_4$  для методов твердофазного и жидкофазного синтеза / Г.М. Зирник, А.С. Чернуха, Н.С. Некорыснова, А.В. Вепрева, К.В. Матвеев, К.Р. Смолякова, Д.А. Винник // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Химия»*. – 127. – 2021. – Т. 14. – № 4. – С. 127–139.
17. Zakharov, Y.A. Influence of NiCoreAushell nanoparticles' morphology on their magnetic properties / Y.A. Zakharov, V.M. Pugachev, A.S. Bogomyakov, V.I. Ovcharenko, K.A. Korchuganova, D.M. Russakov, R.P. Kolmykov // *Journal of Physical Chemistry C*. – 2020. – Т. 124. № 1. – P. 1008-1019. – DOI: 10.1021/acs.jpcc.9b07897.
18. Pugachev, V.M. Nanostructured Ni-Cd powders / V.M. Pugachev, Y.A. Zaharov, A.S. Valnyukova, V.G. Dodonov, K.A. Daty // *Russian Chemical Bulletin*. – 2018. – Т. 67, № 6. – P. 1018-1025.
19. Meyer, B. K. Binary copper oxide semiconductors: from materials towards devices / B. K. Meyer, A. Polity, D. Reppin, M. Becker, P. Hering, P. J. Klar, Th. Sander, C. Reindl, J. Benz, M. Eickhoff, C. Heiliger, M. Heinemann, J. Bläsing, A. Krost, S. Shokovets, C. Müller, and C. Ronning // *Phys. Status Solidi B*. -2012. – V. 249. – P. 1487-1509.

\*\*\*\*\*

ON THE PREPARATION OF COPPER FERRITE FROM THE BASIC CARBONATE  
AND ITS APPLICATION FOR CATALYTIC WATER PURIFICATION

Korchuganova K.A., Yakovlev S.A., Zvekov A.A., Pugachev V.M.

An approach of the copper ferrite preparation by powders of iron (II) oxalate and copper carbonate basic sintering was suggested. The X-ray diffraction showed that cubic spinel impured by copper oxide is formed, while in the sol-gel case the tetragonal spinel is the only product. The Raman spectra confirmed the structure of the product prepared by sol-gel method and the heterogeneous character of the sintering prepared one. The ability of the ferrites' utilization for water catalytic purification was demonstrated on the model reaction of methylene blue oxidation by hydrogen peroxide in aqueous medium. The entire oxidation is observed after 12 hours in the presence of the copper ferrite, while in its absence the dye concentration in the solution remains almost unchanged.

**Keywords:** copper ferrite, catalytic water purification, X-ray diffraction, Raman spectroscopy.

---

Сведения об авторах:

**Корчуганова Ксения Алексеевна**

К.х.н, доцент, Кафедра химии твердого тела и химического материаловедения, Институт фундаментальных наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кемеровский государственный университет»,  
г. Кемерово, Россия  
E-mail: [datiy-kseniya@mail.ru](mailto:datiy-kseniya@mail.ru)  
SPIN-код: 9678-1668

**Яковлев Сергей Андреевич**

Студент бакалавриата по специальности химия твердого тела, Институт фундаментальных наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кемеровский государственный университет»,  
г. Кемерово, Россия  
E-mail: [sergiy-qqq@yandex.ru](mailto:sergiy-qqq@yandex.ru)

**Звеков Александр Андреевич**

Профессор, Кафедра химии твердого тела и химического материаловедения, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кемеровский государственный университет»,  
г. Кемерово, Россия  
E-mail: [zvekova@gmail.com](mailto:zvekova@gmail.com)  
SPIN-код: 7727-7988

**Пугачев Валерий Михайлович**

Доцент, Кафедра химии твердого тела и химического материаловедения, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кемеровский государственный университет»,  
г. Кемерово, Россия  
E-mail: [vm1707@mail.ru](mailto:vm1707@mail.ru)  
SPIN-код: 6909-7888

**ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ  
ХИМИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ  
(ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ)**

---

УДК 66.081.63:624.21:628.32

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОБЛЕМЫ ВОДООТВОДА С АВТОДОРОЖНЫХ МОСТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ

Маркелов Александр Владимирович,  
Коробова Елена Борисовна,  
Гриценко Елена Александровна

*На автодорожных мостах система водоотведения представляет собой продольные и поперечные уклоны или водоотводные трубки с целью водосброса под пролетное строение. Проведенные аналитические и натурные исследования мостовых сооружений показали, что большинство объектов подобной дорожной инфраструктуры не отвечают требованиям законодательства и нормативов в данном направлении. Водные стоки с дорожных мостов, как правило сбрасываются в открытый водоем без очистки, что приводит к значительному загрязнению окружающей среды нефтепродуктами, свинцом и другими токсичными веществами. Проблема очистки сточных вод является актуальной для подобных объектов во всем мире. В работе представлен анализ загрязняющих веществ, содержащихся в поверхностных сточных водах, и методы очистки и обезвреживания водных ресурсов от загрязнений техногенного характера. Сделан вывод о том, что одним из эффективных методов решения этой проблемы является применение в качестве очистных сооружений баромембранных процессов*

**Ключевые слова:** сточные воды, автомобильные мосты, очистные сооружения, мембраны

Постоянный рост автомобильного транспорта и расширение городских агломераций приводит к интенсификации развития транспортной инфраструктуры, неотъемлемой частью которой являются дороги и мостовые сооружения.

Автомобильный транспорт является одним из основных источников загрязнения воздушного и водного бассейнов [1]. Большая часть негативного воздействия на окружающую среду происходит вследствие образования сточных вод на объектах инфраструктуры, которые содержат превышающие ПДК взвешенные вещества, растворенные и эмульсированные нефтепродукты и др. виды загрязнений [1, 2, 3, 4, 5].

В соответствии со сводом правил СП 35.13330.2011 [2] для предотвращения попадания дождевых стоков и иных вод с пролетных строений мостов они должны направляться в предусмотренные в комплексе объектов дорожно-мостового строительства локальные очистные сооружения или направляться в централизованную или дорожную ливневую канализацию для последующей очистки [2, 6]. Как показывают многочисленные исследования в этом направлении проблема совершенствования систем водоотвода поверхностного стока с мостового полотна является актуальной и не до конца решенной [1 - 7].

Целью работы является привлечения внимания всех заинтересованных сторон к проблеме загрязнения окружающей среды при водоотводе с мостовых сооружений и разработкой рекомендаций по минимизации наносимого ущерба водным и почвенным ресурсам России.

Поставленная цель предполагает решения целого комплекса задач теоретического и прикладного значения:

- анализ загрязнений, содержащихся в поверхностных сточных водах с мостовых сооружений;
- исследование реального состояния систем водоотвода с мостовых сооружений;



- анализ существующих методов совершенствования водоотвода с дорожного полотна и мостовых сооружений;
- анализ методов и технологических решений по очистке поверхностных сточных вод.

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Методология исследования строилась на анализе научных работ, проведенных по проблеме водоотвода и очистке стоков с автомобильных дорог и мостовых сооружений как отечественными, так и зарубежными учеными, а также исследовании в лабораторных условиях состава загрязнений поверхностных сточных вод, собранных на объектах дорожной инфраструктуры Ивановской и Ярославской областей. При анализе загрязнений использовались современное лабораторное и аналитического оборудование, стандартные средства и методы анализа (потенциометрический, гравиметрический, титриметрический) с использованием обоснованных методов математической статистики.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Как показал анализ большого числа научных работ, на водоотвод с мостовых сооружений поступают стоки, которые имеют различный характер в зависимости от времени года и образуются в результате выпадения осадков, таяния снега, поливомоечных работ и реагентной обработки для предотвращения наледи [1, 4, 5, 8 - 11].

В указанных сточных водах накапливаются опасные для окружающей среды и здоровья населения загрязняющие вещества, связанные с интенсивным движением автомобильного транспорта по объектам дорожной инфраструктуры.

В результате аналитического обзора научной литературы и лабораторных исследований поверхностных сточных были выявлены следующие основные виды загрязняющих веществ:

- оксиды углерода, азота и серы, сажа, оксиды тяжелых металлов [8, 10, 11, 12, 13];
- отработанные смазочные материалы, топливо и др. нефтепродукты [8, 10, 11, 14];
- взвешенные вещества, представляющие продукты износа и коррозии деталей автомобилей и дорожного покрытия, содержащие железо, марганец, кадмий, цинк и др. металлы, мелкие частицы твердых веществ органического и минерального происхождения [8, 10, 11, 13, 14, 15];
- соли (хлориды, ацетаты, карбамиды, нитраты и др.) и твердые фрикционные материалы (песок, мраморная крошка и т.п.) – продукты противогололедной обработки дорожного покрытия [8, 14, 16];
- органические соединения (синтетические поверхностно-активные вещества, фенолы и т.п), применяемые при поливомоечных работах [8, 16].

Многие из перечисленных загрязняющих веществ являются опасными для окружающей среды и здоровья человека и значительно превышают предельно допустимые концентрации (ПДК). Их негативное влияние хорошо изучено и представлено в большом объеме научных работ российских и зарубежных ученых [17-19]. Поэтому в соответствии с Федеральными законами РФ № 74-ФЗ [20] и № 416-ФЗ [21] сброс таких стоков непосредственно в водный бассейн или центральную канализацию без предварительной очистки и обезвреживания опасных загрязнений запрещен.

Для избежания попадания опасных веществ в открытые водоемы и почвы необходимо выполнять требования свода правил [2], которые регламентируют экологические принципы водоотвода с мостовых сооружений.

Однако проведенные предварительные исследования 5 % дорожной инфраструктуры Ивановской и Ярославской области, а также ряд исследований авторов в других регионах РФ [3-8] показали их неудовлетворительное техническое состояние и наличие большого количества дефектов, в том числе, проблемы с водоотводом. Наиболее часто встречающиеся дефекты:

- застой воды на дорожном полотне, вследствие нарушения продольных и поперечных уклонов моста;
- коррозия металлических и железобетонных элементов из-за нарушения герметичности деформационных швов и гидроизоляции мостового полотна;

- затрудненный водоотвод, из-за разрушения или загрязнения конструкций водоотводных труб и каналов;
- сброс стоков в подмостовую зону и открытые водоемы из-за отсутствия водоотводных лотков и каких-либо очистных сооружений.

Обследованные объекты требуют проведения реконструкции как в связи с потерей несущей способности сооружений вследствие повышенной коррозии бетона и арматуры, так и с недопустимостью сброса неочищенных поверхностных стоков с дорожного полотна в водоемы и прилегающие территории.

Существует большое разнообразие методов очистки сточных вод: механические (отстаивание, фильтрование, сепарация), химические (нейтрализация, окисление, восстановление), физико-химические (коагуляция, ионный обмен, флотация, коалесценция), биологические (аэротенки, биофильтры, аэрофильтры) и др. [22, 23].

Выбор метода очистки сточных вод зависит от следующих факторов: объем и разновидность сточных вод, экономическая целесообразность, требования к качеству воды для сброса в водоем, мощность водоема, наличие локальных и централизованных очистных сооружений [22, 23].

Недостатком большинства классических методов очистки сточных вод является необходимость наличия больших площадей для эффективной организации очистных сооружений [22, 23].

Одним из наиболее перспективных и малозатратных направлений решения этой проблемы является применение баромембранных процессов с использованием ультрафильтрационных мембран. Эта технология получила активное развитие в последние 20-25 лет. При этом 80% всех внедренных мембранных систем очистки приходится на страны Западной Европы, США и Китая [24].

К достоинствам баромембранной технологии по очистке сточных вод можно отнести [24, 25]:

- сокращение общей площади очистных сооружений на 25-50%;
- автоматизация процесса, позволяющая уменьшить численность обслуживающего персонала и управление на удаленном расстоянии;
- тонкость очистки в 0,01 - 0,05 мкм позволяет полностью отделить взвешенные вещества, некоторые макромолекулярные метаболиты, яйца паразитов, бактерии и некоторые вирусы, а также нефтепродукты;
- отсутствие сорбционных фильтров, которые применяются в классических системах после дополнительной доочистки гипохлоритом натрия;
- энергопотребление составляет порядка 0,1 кВт·час/м<sup>3</sup>, что сопоставимо или менее затратно с классическими способами очистки.

В качестве примера применения мембранной технологии можно привести очистные сооружения в городе Вовфельсбах (Германия) мощностью 1860 м<sup>3</sup>/сут., которые работают с 2005 года. Очищенные стоки сбрасываются в озеро-водохранилище Рурзее, которое является местом отдыха и источником забора воды для потребления населением. Основной причиной выбора такого метода очистки было вызвано отсутствием достаточных площадей для организации классических систем [8]. В таблице 1 - показаны нормативные показатели и качество воды после очистки с помощью ультрафильтрационных установок, смонтированных в Германии и Италии [8].

Таблица 1.

**Нормативные требования, показатели воды до и после очистки**

Показатели	Значение показателя, мг/дм <sup>3</sup>		
	норматив	Филлотрано, Италия	Нордканал, Германия
Взвешенные вещества	300	<0,5	<0,5
Нефтепродукты	10	0,5	0,5
ХПК	125	<1	5
БПК <sub>5</sub>	25	<10	25

Одним из основных недостатков мембранной технологии по очистке сточных вод являются значительные затраты на борьбу с отложениями, которые накапливаются на поверхности разделения. Зачастую для этого используется ручной труд и необходимость остановки процесса разделения для химической регенерации мембранных модулей.

#### ВЫВОДЫ

Выполнен анализ и проведено исследование состояния мостовых сооружений, которые выявили проблемы с водоотводом и сбросом неочищенных стоков в водоемы и прилегающие мостовые территории.

Решением данной проблемы является разработка методики расчета объема сточных вод с объектов дорожной инфраструктуры и на ее основе разработка обоснованных проектов реконструкции существующих мостов и проектов новых сооружений, максимально учитывающих состояние окружающей среды, построенное на принципах экологически рационального проектирования.

Для качественной очистки сточных вод предлагается использовать баромембранные реакторы, которые показали свою эффективность во многих зарубежных странах. В связи с этим необходимо провести ряд теоретических и экспериментальных исследований для разработки технологических схем по очистке стоков на основе отечественных комплектующих и материалов.

#### БИБЛИОГРАФИЯ

1. Стадник М.Е. Негативное воздействие компонентов транспортной системы на состояние окружающей среды / М.Е. Стадник // Научный диалог. – 2013. - №12 (24): Общественные науки. – С. 38-47
2. СП 35.13330.2011. Свод правил. Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84\*. Электронный ресурс. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200084849>. – Дата обращения 28.03.2024
3. Лапина О.А. Экологические требования к проектам строительства. Интернет-журнал Науковедение. – 2013. - №5. – С. 133
4. Садыков Р.Р. Защита окружающей среды при строительстве транспортных сооружений. Актуальные направления фундаментальных и прикладных исследований: Материалы XXIII международной научно-практической конференции, North Charleston, USA, 22–23 июня 2020 года. – North Charleston, USA: LuluPress, Inc., – 2020. – С. 77-79.
5. Петропаловских О.К. Анализ системы водоотвода на автодорожном мосту через р. Бирба в г. Биробиджан. Техника и технология транспорта. – 2021. - №2 –
6. Азаров В.Н., Манжилевская С.Е. Экологические требования при проектировании и строительстве объектов. Вестникевразийской науки. -2018. -Т10. - №6. – С. 57.
7. Петропавловских О. К., Ибрагимова А. А., Садыков Р. Р., Галиев А. Р., Губайдуллин Р.Ф. Совершенствование системы водоотвода с мостового полотна автодорожных мостов // Известия КазГАСУ. - 2022. - №1 (59).
8. Винокуров К.И., Крестьянинова А.Ю. Локальные очистные сооружения поверхностного стока на автомобильных дорогах и мостовых переходах // Экология и строительство. 2019. № 4. С. 42–52. doi: 10.35688/2413-8452-2019-04-005.
9. Davis M., Naumann S. Making the Case for Sustainable Urban Drainage Systems as a Nature-Based Solution to Urban Flooding. In: Kabisch N., Korn H., Stadler J., Bonn A. (eds) Nature-Based Solutions to Climate Change Adaptation in Urban Areas. Theory and Practice of Urban Sustainability Transitions. Springer, Cham. – 2017. – С. 123-137. DOI:10.1007/978-3-319-56091-5\_8
10. Michalek, A. Assessment of climatic and anthropogenic controls on bridge deck drainage and sediment removal / A. Michalek, A. Husic, J. Roundy, A. T. Hansen // Water (Switzerland). – 2021. – Vol. 13. – № 24. DOI: 10.3390/w13243556
11. Activities of the European Union on sustainable urban development. A brief overview. European Urban Knowledge Network. URL: <https://www.eukn.eu/fileadmin/Lib/files/EUKN/2013/Activities%20of%20the%20European%20Union%20on%20sustainable%20urban%20development.pdf> (дата обращения: 10.02.2022).

12. Ватин Н.И., Чечевичкин В.Н. Особенности состава и очистки поверхностного стока крупных городов // Инженерно-строительный журнал. – 2014. – № 6. – С. 67-74.
13. Jianlong Wang, Yuanling Zhao, Liqiong Yang, Nannan Tu, Guangpeng Xi, Xing Fang. Removal of heavy metals from urban stormwater runoff using bioretention media mix // Water. – 2017. – №9 (11). – P. 854.
14. Красногорская Н.Н., Мусина С.А., Бреднева Т.О. Ливневый сток с автотранспортной инфраструктуры как источник загрязнения водных объектов // Актуальные проблемы социальноэкономической и экологической безопасности: материалы VIII междунар. науч.-практ. конф. – Казань: КФ МИИТ, 2016. – С. 59-62.
15. Сабанаев Р.Н., Никитин О.В. Нагрузка ливневого стока на поверхностные воды внутригородского водотока // Вестник технологического университета. – 2016. – Т.19. – №19.
16. Thomson N.R., Mcbean E.A., Snodgrass W., Monstrenko I.B. Highway stormwater runoff quality: development of surrogate parameter relationships // Water, Air and Soil Pollution. – 1997. – №94. – P. 307-347.
17. Грушко Я.М. Вредные неорганические соединения в промышленных сточных водах: справочник / Я.М. Грушко. – Л.: Химия, 1979. – 160 с. 1
18. Грушко Я.М. Вредные органические соединения в промышленных сточных водах: справочник / Я.М. Грушко. – Л.: Химия, 1982. – 216 с.
19. Dsikowitzky, L., Schwarzbauer, J. Organic Contaminants from Industrial Wastewaters: Identification, Toxicity and Fate in the Environment. In: Lichtfouse, E., Schwarzbauer, J., Robert, D. (eds) Pollutant Diseases, Remediation and Recycling. Environmental Chemistry for a Sustainable World, 2013. vol 4. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-02387-8\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-02387-8_2)
20. "Водный кодекс Российской Федерации" от 03.06.2006 N 74-ФЗ (ред. от 25.12.2023) (с изм. и доп., вступ. в силу с 30.12.2023). Электронный ресурс. Режим доступа: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_60683/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_60683/). Дата обращения 28.03.2024.
21. Федеральный закон "О водоснабжении и водоотведении" от 07.12.2011 N 416-ФЗ (последняя редакция). Электронный ресурс. Режим доступа: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_122867/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_122867/). Дата обращения 28.03.2024.
22. Родионов А.И. Защита биосферы от промышленных выбросов. – М.: Химия, КолосС. - 2005. – 392 с.
23. Хенце М. Очистка сточных вод: Пер. с англ. – М.: Мир. – 2006. - 480 с.
24. Трухина М. Г., Пельменёва Н. Д. Мембранные биореакторы: опыт применения в зарубежных странах // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2022. №2 (41). – Электронный ресурс. – режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/membrannye-bioreaktory-opyt-primeneniya-v-zarubezhnyh-stranah>. - Дата обращения: 19.03.2023.
25. Markelov, A.V., Volkov, D.V. & Korobova, E.B. (2023) Separation of oil-containing effluents of construction industry enterprises, Smart Composite in Construction, 4(1), pp. 68-80 [online]. Available at: [http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/V4N1\\_2023](http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/V4N1_2023). DOI: 10.52957/27821919\_2023\_1\_68

\*\*\*\*\*

## INVESTIGATION OF THE PROBLEM OF DRAINAGE FROM ROAD BRIDGE STRUCTURES

**Markelov A.V., Korobova E.B., Gritsenko E.A.**

On road bridges, the drainage system consists of longitudinal and transverse slopes or drainage pipes for the purpose of spillway under the superstructure. Analytical and field studies of bridge structures have shown that most of the objects of such road infrastructure do not meet the requirements of legislation and regulations in this area. Wastewater from road bridges is usually discharged into an open body of water without treatment, which leads to significant environmental pollution with petroleum products, lead and other toxic substances. The problem of wastewater treatment is relevant for such facilities all over the world. The paper presents an analysis of pollutants contained in surface wastewater and methods of purification and neutralization of water resources

from man-made pollution. It is concluded that one of the effective methods of solving this problem is the use of baromembrane waste treatment plants

---

**Keywords:** wastewater, automobile bridges, sewage treatment plants, membranes

---

Сведения об авторах:

**Маркелов Александр Владимирович**

ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет»,  
доцент кафедры инфраструктуры и транспорта,  
РФ, г. Ярославль,  
E-mail:[aleksandr203.37@mail.ru](mailto:aleksandr203.37@mail.ru)

**Коробова Елена Борисовна**

ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет»,  
аспирант кафедры инфраструктуры и транспорта,  
РФ, г. Ярославль  
E-mail:[lena-korobova@inbox.ru](mailto:lena-korobova@inbox.ru)

**Гриценко Елена Александровна**

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет»,  
заведующая кафедрой транспорта и автомобильных дорог,  
РФ, г. Иваново  
E-mail:[gritsencko.lena@yandex.ru](mailto:gritsencko.lena@yandex.ru)

УДК 628.316.12

## ЭКОЛОГО-ХИМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА МЕТОДА ОЧИСТКИ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ СТОЧНЫХ ВОД

Гамазин Виктор Петрович

*В статье представлена информация по проблеме организации и проведении очистки гальванических сточных вод на примере ряда машиностроительного производства, рассмотрены основные требования по составу и критериям очистки гальванических сточных вод при использовании замкнутых систем промывок в гальваническом производстве.*

*Освещена проблема обеспечения качественной очистки сточных вод до нормативных требований и возможности реализации замкнутых водооборотных систем для гальванического цеха, вопросы эксплуатации локальных очистных сооружений, индивидуальных особенностей состава сточных вод и их влияние на выбор и технологическую компоновку, недостатки и преимущества применяемых на практике методов очистки воды от тяжелых металлов.*

*Приведены результаты лабораторных исследований и общие рекомендации по технологическому режиму при использовании совместной сорбционной и ионообменной очистки воды от ионов тяжелых металлов, достаточность обеспечения качества воды для водооборотного цикла в гальваническом цехе в качестве промывных вод.*

**Ключевые слова:** *очистка сточных вод, тяжелые металлы, сорбция, ионообменные смолы, гальваническое производство, критерии очистки, углеродистые сорбенты, скорость фильтрации*

Современная очистка сточных вод гальванического и им подобным производствам характеризуется наличием нескольких одновременно задействованных методов очистки воды по ряду показателей, среди которых наибольшее значение придается нейтрализации воды, снижению концентрации загрязняющих веществ и ряда других физико-химических параметров, которые позволяют не только довести значение степени очистки воды до необходимых показателей, но и при необходимости обеспечить их соответствие нормативным значениям ПДК.

Как правило, технологически процессы очистки протекают в четыре последовательных этапа, на первоначальном из которых типовым и наиболее распространённым ввиду простоты и относительной эффективности процессом является отстаивание воды, целью которого является удаление взвешенных веществ и грубодисперсных примесей. В ряде случаев достигается до 80-90 % осадение, после чего вода самотеком или под давлением подается на фильтрацию через пористые наполнители различной формы и происхождения. Этот процесс условно можно отнести ко второму этапу, основное назначение которого является осветление воды и снижение нагрузку на другие аппараты на третьем и четвертом этапе очистки, а также для повышения общей эффективности очистки воды [1].

Правильно подобные режимы фильтрации и времени контакта с загрузкой фильтра обеспечивается на практике апробацией и последующей корректировкой на каждом этапе технических параметров эксплуатации локальных очистных сооружений (ЛОС), а также индивидуальных особенностей состава сточных вод.

Рассматривая вопрос об токсичности тяжелых металлов, целесообразности очистки воды от них до гигиенических нормативов и современной ситуации в области образования гальванических сточных вод, следует принимать во внимание, что представление об обязательной токсичности всех тяжелых металлов в допустимых концентрациях не

соответствует действительности, поскольку доказано, что токсические металлы в низких дозах не оказывают вредного действия.

По составу выделяются 3 основные компонентные группы сточных вод:

- хромсодержащие с концентрацией хроматов до 80-120 мг/л.;
- кислотно-щелочные промывные воды с незначительными концентрациями тяжелых металлов (порядка 1,5-12 мг/л), содержат сильные кислоты (реже щелочи), объем которых может достигать до 80- 90% от общего суточного объема образования гальваностоков на отдельных предприятиях, рН воды примерно в том же диапазоне, как и для первой группы;
- циансодержащие щелочные сточные воды, которые образуются в ряде случаев при осуществлении меднения, цинкования или кадмирования соответственно. Концентрация металлов в этой группе может достигать до 30 -38 мг/ л, а рН воды носит слабощелочной характер. Последнее необходимо учитывать в случае объединения их с водами других групп и общей очистке на очистных сооружениях предприятия [2].

Обезвреживание и снижение общей токсичности гальваностоков является одной из главных задач на предприятиях с таким производством способности тяжёлых металлов к биоаккумуляции, их высокой токсичности и физико-химической активности, которая характеризуется образованием соединений с органическими компонентами в этих сточных водах.

Достаточно часто рассматриваемые гальваностоки включают в себя как концентрированные отработанные растворы с концентрацией металлов от 140 мг/л до 200 мг/ л, а в отдельных случаях и более 1,0 г/л и характеризуются периодичностью их образования, так и промывные воды от межоперационной промывки поверхностей в которых концентрация в среднем составляет от 1,5 -3,5 мг/л до 18-25 мг/л. Объемы образования сточных вод также характеризуются большим разбросом, Так, при проведении цинкования деталей объем сточных вод в среднем составляет от 0,7 м<sup>3</sup>/ час до 27-32 м<sup>3</sup>/час, при проведении никелирования и хромирования от 0,25 м<sup>3</sup>/ час до 19,0-22,5 м<sup>3</sup>/час, а при использовании меди в составе технологических линий от 0,4 м<sup>3</sup>/час до 18-20 м<sup>3</sup>/час. Из указанных объемов на кислотно-щелочные воды может приходиться от 50 до 95 % от общего объема образующихся гальваностоков [3].

Все металлы, кроме железа, в значительных концентрациях являются и токсичными и способными накапливаться в живых организмах.

Несмотря на обширный аналитический и объем исследований в этой области, следует не забывать о том что каждый объект образования указанных сточных вод имеет индивидуальные особенности, а их токсичность в ряде случаев многократно возрастает в случае отсутствия необходимого уровня обезвреживания и наличия постоянного лабораторного и санитарно-гигиенического контроля при сбросе очищенных стоков в поверхностные водные объекты.

Эпизодические отборы проб в «ручном» режиме и отсутствия автоматизированного химического контроля как правило не дают точной картины и в целом снижают реальную концентрация сброса тяжелых металлов. Наличие в составе стоков кислот и щелочей сказывается на их токсичности и технически осложняет их последующую очистку.

Разнообразие технологий нанесения гальванического покрытия, аппаратного оформления, режима обработки и применяемых реагентов приводит к тому, одна и та же технология или метод очистки при разных условиях имеет большой разброс и представляет большую проблему при подборе и обосновании технологии очистки или доочистки сточных вод до ПДК [4].

При обосновании выбора наиболее эффективного метода очистки сточных вод (ОСВ) от ионов тяжелых металлов (независимо от того, какой вид и источник образования сточных вод, а также и условия их образования) зависит от таких условий, среди которых в первую очередь следует учитывать:

- качественно-количественную характеристику металлов, учитывая их первоначальную исходную концентрацию и сам перечень веществ;
- степень удаления с учетом технологических нормативов или требований по качеству воды;



- объемы и периодичность накопления гальваностоков;
- наличие примесей и взвешенных веществ, снижающих общую эффективность ОСВ и необходимость доочистки или задействование дополнительной ступени очистки;
- технико-экономические показатели очистки (себестоимость очистки из расчета на объем образования за сутки или час).

С учетом обзора имеющихся сведений и опубликованных информационных материалов можно выделить наиболее применяемые методы очистки:

- реагентная очистка;
- сорбционная очистка;
- мембранные технологии и обратный осмос;
- электрохимические методы.

Другие методы и направления очистки имеют меньшее распространение в силу недостаточной эффективности или недостатков технологического характера [5].

Гидромеханическая очистка в силу специфики формы нахождения ионов тяжелых металлов возможна как предварительная стадия очистки воды от взвешенных веществ, имеющая крайне недостаточные показатели по нормативам очистки, в основном характеризуется только присутствием в типовых локальных очистных сооружениях отстойников или зернистых фильтров крупной загрузкой.

Основная задача в таком случае их сводится к снижению нагрузки на последующие аппараты физико-химической или химической очистки, а также выравниванию концентрации всех загрязняющих веществ при их сборе и отстое для обеспечения относительной стабильности по концентрации указанных веществ, а также избежание пиковых нагрузок или резких перепадов по их концентрации.

Реагентная обработка как один из видов химической очистки основана на окислительно-восстановительных процессах, а также процессах нейтрализации и/или осаждения загрязняющих веществ.

На практике чаще всего соединения тяжелых металлов переводятся в малорастворимые соединения, используя гидроксиды кальция и натрия, а также сульфат железа (II) или натрия, с последующей обязательной фильтрацией и при необходимости нейтрализацией воды.

Указанная обработка позволяет существенно снизить исходную концентрацию практически до нормативных показателей, но отличается нестабильностью и требует соблюдения точного технологического режима очистки, но при этом имеет и ряд принципиальных недостатков, которые не позволяют говорить об их достаточности обеспечения необходимых показателей очистки для каждой группы гальванических стоков [6].

Практика подтверждает, что реагенты используют для ОСВ в 2 случаях:

- предварительная подготовка воды для последующей биологической или физико-химической очистки,
- общая обработка и нейтрализация стоков в ЛОС уже объединенных производственных сточных вод.

Последнее может не только понизить общую эффективность, но и привести к росту себестоимости ОСВ.

Среди способов физико-химической очистки особая роль отводится сорбции, зарекомендовавшая себя как наиболее эффективный способ очистки воды. Она получила широкое применение благодаря универсальности и большому перечню выпускаемых серийно или прошедших промышленные испытания и апробацию адсорбентов, характеризуется в ряде случаев параллельным протеканием химического взаимодействия не только с основными загрязнителями, но и сопутствующими химическими веществами органического и неорганического происхождения.

Предельно допустимые концентрации (ПДК) большинства тяжелых металлов, которые анализируются в гальваностоках промышленных предприятий Брянской области, относятся ко 2 и 3 классу опасности, значение которых для питьевой воды, систем централизованного и нецентрализованного водоснабжения, а также для всех категорий водных объектов приведено в таблице 1 и говорит о низких значениях ПДК согласно данным СанПиН 1.2.3685-21 [7].

Таблица 1.

**ПДК основных тяжелых металлов (суммарно по каждому)**

Наименование	Cu	Zn	Ni	Cr	Fe	Co
Класс опасности	3	3	2	2	3	2
ПДК, мг/л	1,0	5,0	0,02	0,05	0,3	0,1

В настоящее время на всей территории Российской Федерации сложилась практика применения для очистки гальванических сточных вод сочетанием механической очистки как предварительной стадии очистки для снижения массы взвешенных веществ на 80-95 %, далее подготовленные воды направляются как правило на химическую или физико-химическую очистку как наиболее эффективные и обеспечивающие наибольший эффект снижении концентрации ионов тяжелых металлов до нормативных показателей.

Несмотря на то, что метод химической очистки сточных вод для рассматриваемых производств является достаточно оправданным с точки зрения эффективности очистки, он имеет и ряд существенных недостатков, таких как:

- высокая себестоимость очистки из расчёта на 1 м<sup>3</sup> воды;
- образование побочных продуктов как вторичных загрязнителей;
- образованием водонасыщенного и плохо уплотняемого осадка с содержанием воды до 95 -98 %, который представляет из себя гальванический шлам с веществами как правило 2 и 3 класса опасности [8].

Это в свою очередь представляет проблему с точки зрения утилизации этого шлама ввиду дороговизны его обезвреживания, а при невозможности такого варианта его захоронения на специальных объектах размещения отходов (ОРО).

Первый вариант ОРО не всегда имеет в соответствии с лицензией право на прием указанного шлама, второй вариант ОРО имеет узкое распространение в ряде регионов, часто собственниками их выступают сами предприятия, которые запроектировали и построили их для собственных нужд, но по ряду технических или экономических причин могут не принять чужие гальваношламы.

Кроме того, возникает проблема по их сбору и транспортировке, поскольку они относят к II классу опасности отходов, но чаще всего к III или IV классу опасности отходов, что автоматически требует наличие специальной лицензии на его транспортировку с учётом класса опасности и наименование его в ФККО.

Сложившаяся практика проектирования и строительства локальных очистных сооружений (ЛОС) в нашей стране позволяет сделать вывод о том, что основными критериями их строительства и эксплуатации (с учетом критериев выбора метода очистки воды) выступают также такие факторы, как:

- простота оформления и обслуживания оборудования;
- себестоимость очистки воды до нормативных значений для самого предприятия;
- наличие и возможность отбора проб воды при проведении инструментального экологического контроля с учетом ГОСТ Р 59024-2020;
- минимизация объемов образования осадков или шлама после очистки;
- возможность частичного или полного возврата очищенной воды с учётом технологических потерь обратно в гальванические ванны или промывные ванны;
- отсутствие образования более токсичных компонентов в любой форме и на любой стадии очистки воды;
- наличие положительного опыта внедрения и эксплуатации ЛОС с учетом соответствия требованиям категории как наилучшая доступная технология (НДТ) в области очистки производственных сточных вод [9].

Большинстве российских промышленных предприятий, где образуются ГСВ, при наличии ЛОС применяют преимущественно ионообменные и сорбционные процессы, которые обеспечивают высокую степень очистки для слабо концентрированных сточных вод [10].

Из сорбентов чаще всего применяются:

- неуглеродные сорбенты, такие как глинистые породы или цеолиты,

- сорбенты на основе поликремниевых кислот,
- различные шлаки,
- отходы деревообрабатывающей или целлюлозно-бумажной промышленности, а также шлаки и шламы металлургических производств при соответствующем обосновании.

Для удаления и последующей рекуперации тяжелых металлов на многих предприятиях применяют ионообменную и сорбционную очистки, что является явным преимуществом при сравнении с другими методами очистки.

В целом, можно отметить достоинство сорбционных процессов и ионного обмена, которые в сравнении с другими методами отличаются большим перечнем преимуществ и меньшим количеством недостатков.

Таким образом, указанные два метода можно рекомендовать как наиболее эффективные и обоснованными с учетом перечисленных ранее критериев выбора и использования метода очистки воды.

Исследование процесса очистки от тяжелых металлов проводилось с учетом усреднения воды, сорбционной и последующей ионообменной доочистки воды. В качестве загрузки в первой колонне был использован сорбента марки АС с адсорбционной активностью не менее 45-50 %, суммарным объемом пор по воде не менее 2,8 см<sup>3</sup>/г и размером фракций в диапазоне 1,0-2,5 мм. Во второй колонне был задействован катионит КУ-2-8 с размером гранул 0,5-1,2 мм. Экспериментальная установка, принципиальная схема которой вынесена на рисунке 1, включает в себя:

- усреднитель-накопитель с перегородкой для отстаивания и отбора воды;
- фильтр с ионообменной смолой КУ-2-8,
- сорбционный фильтр с активированным углем марки АС,
- накопительный бак для отбора проб.

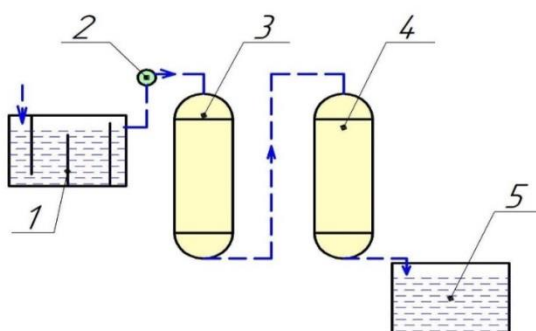


Рисунок 1. Принципиальная схема экспериментальной установки

Снижение концентрации Cr, Zn и Cu показали, что скорость фильтрации через фильтры варьировала от 0,5 м/с до 5,0 м/с, оптимальный режим подачи воды в диапазоне 3,0-3,5 м/с при снижении исходных концентраций хрома с 2,7-3,1 мг/л до 0,04-0,06 мг/л, цинка с 7,8-8,1 мг/л до 0,07-0,09 мг/л, меди – с 3,6 -4,2 мг/л до 0,03-0,08 мг/л. Увеличение скорости расхода воды приводит к снижению степени очистки до 95%.

По результатам оценки степени очистки, приведенной на рисунке 2, можно сделать вывод, что степень очистки достигается на уровне 98,5-99,6 %. Все концентрации металлов после очистки не превышают их ПДК, что позволяет использовать очищенную воду в водооборотной системе цеха гальваники предприятия при условии дополнительной подпитки свежей технической водой с учетом технологических потерь при гальваническом производстве и последующей очистке воды.

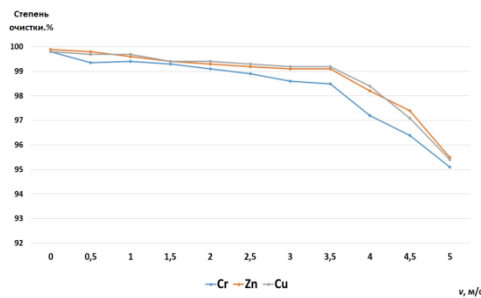


Рисунок 2. Изменение степени очистки воды от скорости фильтрации

Полученные результаты позволяют сделать вывод о эффективности совместного применения катионита и активированного угля для снижения концентрации по всем указанным тяжелым металлам до значения менее их ПДК, целесообразности использовать очищенную воду в водооборотной системе цеха гальваники предприятия при условии дополнительной подпитки свежей технической водой с учетом технологических потерь при гальваническом производстве и последующей очистке воды.

## БИБЛИОГРАФИЯ

1. Александрова Н.Ю., Попова О.В. Методы очистки сточных вод // Водоснабжение и водоотведение. - 2016. - № 7. - С. 56-62.
2. Измайлова А.Р., Рустамова А.И. Технологии обезвреживания сточных вод гальванического производства: А.Р. Измайлова, А.И. Рустамова. - E-SCIO. – 2017. - №4 (43). – С.516-519.
3. ИТС 8-2022. Очистка сточных вод при производстве продукции (товаров), выполнении работ и оказании услуг на крупных предприятиях: издание официальное – Москва : Бюро НДТ, 2022. – IV, - 84 с.
4. Каратаев О.Р., Кудрявцева Е.С., Мингазетдинов И.Х. Очистка сточных вод от ионов шестивалентного хрома. Вестник Казанского технологического университета, 2018, т. 17, № 2, - с. 52–54.
5. Папков А.В. Современные методы очистки воды от тяжелых металлов // Водоснабжение, химия и прикладная экология. - Гомель: Учреждение образования "Белорусский государственный университет транспорта", 2021. - С. 129-132.
6. Подкопаева, О. А. Очистка сточных вод от ионов меди (II) сорбционным методом / О. А. Подкопаева, А. В. Лысенко, Д. А. Колмыкова // Фундаментальные и прикладные исследования в области химии и экологии - 2021: сборник научных статей Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Курск, 16 ноября 2021 года. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2021. – С. 138-141.
7. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания : по состоянию на 01.01.2023: Последняя редакция: [СанПиН 1.2.3685-21]: Официальное издание: утверждены Постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от от 28.01.2021 : введены в действие 01.03 2021. Москва : Центрмг, 2023. – 736 с.
8. Костылева Н.В., Рачева Н.Л. Характеристики загрязняющих веществ из раздела «II. Для водных объектов» «Перечня загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды», утвержденного распоряжением Правительства Российской Федерации от 08.07.2015 г. № № 1316-р: Справочник – М. : ФГБУ УралНИИ «Экология», 2016. – 296 с.
9. Смирнова, В. С. Очистка сточных вод гальванических производств от ионов тяжелых цветных металлов / В. С. Смирнова, С. А. Худорожкова, О. И. Ручкинова. - // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. – 2018. – Т. 2. – С. 405-417.

10. Дальнова О.А., Бебешко Г.И., Еськина В.В., Барановская В.Б., Карпов Ю.А. Современные методы определения тяжелых металлов в сточных водах (обзор). –// Заводская лаборатория. Диагностика материалов. - 2017. - № 83(6). - С. 5-13.

\*\*\*\*\*

ECOLOGICAL AND CHEMICAL JUSTIFICATION  
OF THE CHOICE OF GALVANIC WASTEWATER TREATMENT METHODS

**Gamazin V.P.**

The article provides information on the problem of organizing and conducting treatment of galvanic wastewater on the example of a number of machine-building industries, discusses the basic requirements for the composition and criteria for treatment of galvanic wastewater when using closed flushing systems in galvanic production.

The problem of ensuring high-quality wastewater treatment up to regulatory requirements and the possibility of implementing closed water circulation systems for a galvanic workshop, issues of operation of local wastewater treatment plants, individual characteristics of wastewater composition and their impact on the choice and technological layout, disadvantages and advantages of practical methods of water purification from heavy metals are highlighted.

The results of laboratory studies and general recommendations on the technological regime for the use of joint sorption and ion exchange water purification from heavy metal ions, the sufficiency of water quality assurance for the water cycle in the galvanic workshop as washing waters are presented.

**Keywords:** wastewater treatment, heavy metals, sorption, ion exchange resins, electroplating, purification criteria, carbon sorbents, filtration rate

---

Сведения об авторах:

**Гамазин Виктор Петрович**

Доцент кафедры химии, кандидат технических наук,  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего  
образования «Брянский государственный университет имени академика  
Ивана Георгиевича Петровского»,  
Брянск, Россия

**E-mail:** [vgamazin@yandex.ru](mailto:vgamazin@yandex.ru)

**SPIN-код:** 2926-2697

УДК 66.074.2

## АНАЛИЗ СИСТЕМЫ ОЧИСТКИ АСПИРАЦИОННЫХ ГАЗОВ И ОТ ЗОНЫ ОХЛАЖДЕНИЯ АГЛОМЕРАЦИОННОЙ МАШИНЫ ДЛЯ СПЕКАНИЯ ФОСФОРитОВОЙ РУДНОЙ МЕЛОЧИ

---

Незамаев Сергей Владимирович,  
Быков Александр Александрович,  
Бобков Владимир Иванович

*В представленном исследовании рассматриваются вопросы очистки газовых выбросов, образующихся в технологической зоне охлаждения агломерационной машины, в процессе спекания рудного фосфатного материала. Приводятся технические решения для очистки газов процесса охлаждения агломерата, с учётом процесса конденсации влаги из газов внутри эксгаустеров. Установлено, что орошение пенных аппаратов, должно осуществляться осуществляется 3% раствором едкого натра, который непрерывно поступает в циркуляционный бак. Выявлены технологические параметры функционирования пенных аппаратов, циклонов, брызгоуловителей.*

*Научно обоснована последовательность стадий сухой и влажной очистки, газов, формирующихся в технологической зоне охлаждения агломерационной машины, и состоящая из двух параллельно расположенных пенных аппарата. А уловленную пыль в циклонах, следует возвращать в процесс агломерации. Представлена содержательная постановка задачи анализа, технологических особенностей очистки аспирационного воздуха в фосфорном производстве, отличающаяся учётом входной запылённости отделений подготовки шихты и агломерации и среднегеометрический диаметр взвешенных частиц, что позволяет использовать пылесосодочные камеры в первой ступени очистки. Научно обоснована мокрая одноступенчатая очистка газов производства фосфора в пенных аппаратах, с учётом опыта работы аналогичных установок и физико-технических свойств газа и пыли. Обнаружено, что пенный аппарат для очистки аспирационного воздуха, должен обладать высокоразвитой поверхностью контакта газовой и жидкой фаз, в отличие от аппарата, рекомендованного для очистки газов процессов спекания и охлаждения фосфоритового агломерата. Предлагается аппаратный инжиниринг для перераспределения газо-воздушных потоков сложной системы очистки аспирационного воздуха фосфорного производства.*

**Ключевые слова:** *газовые выбросы, очистка, экологическая безопасность, химическая технология, агломерат, химико-энерготехнологический процесс.*

---

В сложном энергоёмком химико-энерготехнологическом процессе термической подготовки рудного сырья на конвейере агломерационной машины образуется значительное количество газовых выбросов, содержащих токсичные компоненты [1]. Особое внимание уделяется газам, формирующимся в технологической зоне охлаждения агломерационной машины, а также и других переделов фосфатного рудного сырья, агломерата, кокса и кварцита [2].

Назначение аспирационных систем – создание благоприятных условий труда и недопущение повышения содержания пыли в воздухе рабочих зон выше значений предельно-допустимых концентраций [3, 4]. Достигается это локализацией выбросов на месте их образования и дальнейшей очисткой аспирационного воздуха от вредных компонентов [5, 6].

Настоящими исходными данными предусматривается очистка аспирационного воздуха в цехе подготовки сырья и агломерационном отделении [7, 8].

Анализ установок очистки аспирационного воздуха на действующих заводах фосфорной промышленности, а также опыт эксплуатации аналогичных установок металлургических производств, позволяют рекомендовать для очистки аспирационного воздуха при входной запылённости свыше  $10\text{г}/\text{м}^3$  двухступенчатую очистку в пылесадочной камере первой ступени и в циклонах в качестве второй ступени очистки [9]. При запылённости менее  $10\text{г}/\text{м}^3$  рекомендуется осуществлять одноступенчатую очистку аспирационного воздуха в циклонах [10].

В аспирационных газах отделений подготовки шихты и агломерации преобладает крупнодисперсная пыль со среднемедианным диаметром частиц  $40\div 80\text{мкм}$ .

Это позволяет, без каких-либо дополнительных энергетических затрат, с эффективностью  $40\div 50\%$  использовать пылесадочные камеры как первую ступень очистки [11, 12].

Параметры газовых выбросов процесса охлаждения агломерата рудного фосфатного сырья на входе в систему очистки: объём газов –  $500000\text{м}^3/\text{ч}$ , температура –  $350^\circ\text{C}$ , разрежение –  $4000\text{-}5000\text{Па}$ . Содержание токсичных компонентов,  $\text{г}/\text{м}^3$ : пыли – 3,0, диоксида серы – 0,16, триоксида серы – 0,02, общего фтора – 0,025, в том числе в виде кремнефторида – 0,01, пентоксида фосфора – 0,03, хлорида натрия – 0,25.

Параметры газов на входе в газоочистку, от одной печи: объём –  $100000\text{м}^3/\text{ч}$ , температура –  $40\div 60^\circ\text{C}$ , влагосодержание –  $20\text{г}/\text{м}^3$ . Содержание токсичных компонентов,  $\text{г}/\text{м}^3$ : пентаоксида фосфора – 0,1, общего фтора – 0,13, в том числе кремнефторида – 0,02, диоксида серы 0,2, пыли – 0,2.

#### Описание технологической схемы системы очистки газов от зоны охлаждения.

Основные технические решения для очистки газов процесса охлаждения агломерата аналогичны очистке газов химико-энерготехнологического процесса спекания агломерата [13].

Газы процесса охлаждения первоначально поступают на первую ступень системы очистки – четыре одиночных параллельно расположенных циклона позиция 1, рисунок 1.

Из бункеров этих циклонов часть газов дымососом, позиция 2, пропускается через два параллельно расположенных конических циклона, позиция 3.

Уловленную пыль в циклонах, позиция 1 и 3, возвращают в процесс агломерации [14, 15].

Пройдя сухую стадию очистки, газы поступают на мокрую очистку, состоящую из двух параллельно расположенных пенных аппарата типа ПАСС, позиции 4.

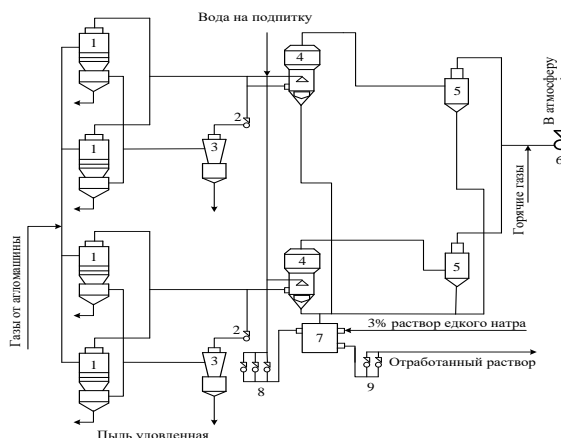


Рисунок 1. Схема очистки газов от процесса охлаждения агломерата. 1 – циклон, 2 – дымосос, 3 – циклон конический, 4 – аппарат пенный ПАСС, 5 – брызгоуловитель центробежный, 6 – эксгаустер, 7 – бак циркуляционный, 8 – насос циркуляционный, 9 – насос шламовый

Очищенные в пенных аппаратах газы поступают в брызгоуловители центробежного типа, позиция 5 [16]. Освободившись от брызг газы эксгаустером, позиция 6, через дымовую трубу выбрасываются в атмосферу [17].

Для предотвращения конденсации влаги из газов внутри эксгаустеров, в участок газохода, расположенный между брызгоуловителями и эксгаустером, вводят горячие газы.

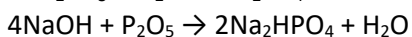
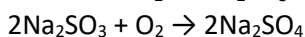
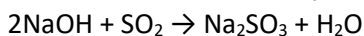
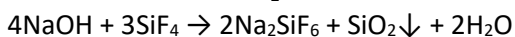
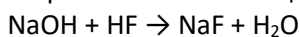


Орошение аппаратов, осуществляется 3% раствором едкого натра, который непрерывно поступает в циркуляционный бак, позиция 7. Отработанный раствор насосами, позиция 9, выводится из нижней части бака, позиция 7, и направляется в испарительный бассейн.

Исходя из параметров газов, физико-технических свойств газа и пыли, а также из опыта работы аналогичных установок на действующих предприятиях, предусматривается мокрая одноступенчатая очистка газов в пенных аппаратах.

Конструкция пенного аппарата несколько отличается от аппарата, рекомендованного для очистки газов химико-энерготехнологических процессов спекания и охлаждения агломерата. Контактная ступень представляет собой сплошную горизонтально расположенную перегородку, диаметром 0.9 внутреннего диаметра корпуса аппарата с установленным на неё усечённым конусом. Перегородка образует со стенкой корпуса кольцевой зазор. Этот аппарат характеризуется созданием более высоко развитой поверхности контакта газовой и жидкой фаз, чем аппарат, рекомендованный для очистки газов процессов спекания и охлаждения агломерата. Однако он имеет свои специфические недостатки. Во-первых, скорость газа в сечении аппарата ниже, следовательно, меньше и удельная производительность. Во-вторых, максимальный диаметр аппарата не должен превышать 3.2÷3.5м. Исходя из этого, применение этих аппаратов возможно для очистки газов, объём которых не превышает 100-120тысяч м<sup>3</sup>/ч.

Реакции взаимодействия токсичных компонентов, содержащихся в газах, с раствором едкого натра описывается следующими уравнениями:



Для компенсации испарившейся воды производится непрерывная подпитка расчётного количества воды на верхнюю ступень пенных аппаратов, позиция 4.

Параметры функционирования циклонов, позиция 1: условная скорость газов в сечении – 4.9м/с, гидравлическое сопротивление – 3000Па, эффективность улавливания пыли – 82%.

Параметры функционирования циклонов, позиция 3: условная скорость газов в сечении аппарата – 1.8м/с, гидравлическое сопротивление – 3000Па, эффективность улавливания пыли – 94%.

Параметры работы пенных аппаратов, позиция 4: орошение циркуляционное 3% раствором едкого натра, скорость газов в свободном сечении (средняя) – 2.45м/с, плотность орошения – 20м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>·час, расход циркулирующего орошающего раствора – 400-500м<sup>3</sup>/час, количество воды на подпитку (на всю систему очистки) – 43-46м<sup>3</sup>/час, количество отработанного отводимого раствора (от всей системы) – 3м<sup>3</sup>/час, расход едкого натра (на всю систему) – 0.86т/час, гидравлическое сопротивление – 5000Па.

Параметры работы брызгоуловителя: скорость газа в свободном сечении – 3м/с, гидравлическое сопротивление – 1000Па, эффективность улавливания брызг – 98%.

Содержание токсичных компонентов в газах на выходе из брызгоуловителей (до ввода в газопровод горячих газов), г/нм<sup>3</sup>: пыли – 0.03, диоксида серы – 0.03, триоксида серы – 0.008, общего фтора – 0.008, в том числе в виде кремнефторида – 0.004, пентоксида фосфора 0.01, хлорида натрия – 0.06.

Параметры газов на выходе из брызгоуловителей (до ввода в газопровод горячих газов): объём – 76.4м<sup>3</sup>/с, температура – 63-65°С, содержание брызг – 0.1г/нм<sup>3</sup>.

Содержание токсичных компонентов в газах на выбросе в атмосферу, г/нм<sup>3</sup>: пыли – 0.03, диоксида серы – 0.04, триоксида серы – 0.009, общего фтора – 0.009, в том числе в виде кремнефторида – 0.004, пентоксида фосфора – 0.01, хлорида натрия – 0.05.

Параметры газов на входе в эксгаузер (после ввода в газопровод горячих газов): объём – 84.7м<sup>3</sup>/с, температура – 80°С.

Общая эффективность очистки газов от токсичных компонентов, %: пыли – 99, диоксида серы – 75, триоксида серы – 55, общего фтора – 80, в том числе кремнефторида – 60, пентоксида фосфора – 66.6, хлорида натрия 75.

Содержание компонентов в обработанном растворе, г/л: пыли – 70.5, натрий сульфат – 20.4, натрий сульфит – 16.5, натрий фторид – 1.5, натрий кремнефторид 6.2, натрий хлорид – 22.5, натрий фосфит – 6.5.

Газы, отходящие от шлаковых лётков и желобов печного отделения в количестве 100м<sup>3</sup>/ч с температурой 40÷60°C поступают на два параллельно работающих пенных аппарата. Орошение пенных аппаратов осуществляется в циркуляционном режиме раствором едкого натра. Из циркуляционного бака посредством насосов отработанный раствор непрерывно отводится шламовыми насосами. Подпитка раствором NaOH осуществляется также непрерывно в циркуляционный бак. Очищенные газы протягиваются вентилятором и выбрасываются в атмосферу.

#### Рекомендации по сокращению сточных вод

Для сокращения количества сточных вод и отработанных растворов, обеспечения устойчивой работы газоочистного оборудования при высокой эффективности очистки газов и снижения коррозии, концентрация орошающего абсорбционного раствора едкого натра должна быть равной 3%, а кислотность отводимого отработанного раствора – pH = 7-8.

#### Технологические параметры работы основного оборудования

Параметры работы пенного аппарата, на одну печь: плотность орошения - 15÷20м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>·ч, расход орошающего раствора – 200м<sup>3</sup>/ч, расход воды на подпитку - 5м<sup>3</sup>/ч, количество отработанного раствора - 1м<sup>3</sup>/ч, скорость газов в сечении аппарата – 1.73м/с, сопротивление аппарата – 6000Па, расход NaOH – 0.05т/ч.

Параметры газов на выходе из аппарата: объём – 74880м<sup>3</sup>/ч, температура – 30÷40°C, влагосодержание – 60г/м<sup>3</sup>, содержание брызг – 5г/м<sup>3</sup>.

Содержание токсичных компонентов, г/м<sup>3</sup>: пентаоксида фосфора – 0.01, общего фтора – 0.01, диоксида серы – 0.01, пыли – 0.02.

Эффективность улавливания токсичных компонентов, %: пентаоксида фосфора – 90, общего фтора – 92.3, диоксида серы – 95, пыли – 90.

Содержание компонентов в отработанном растворе, г/л: пыли – 14.2, натрий сульфат – 16.4, натрий сульфит – 14.5, натрий фторид – 14.6, натрий кремнефторид – 12.5, натрий фосфат – 14.8.

Кроме аспирационных газов, отсасываемых от узла слива шлака, в фосфорном производстве производится отсос газов от желобов и разливочных машин слива феррофосфора, а также люков электрофильтров. Отсос этих газов производится кратковременно. Наибольшее количество токсичных компонентов содержится в газах, отсасываемых от желобов слива феррофосфора, представлены в таблице 1.

Таблица 1.

**Параметры аспирационных газов**

	Желоба	Разливочные машины	Люки электрофильтров
Объём, м <sup>3</sup> /ч	100000	100000	100000
Температура, °C	60÷80	50÷60	40÷50
Влагосодержание, г/м <sup>3</sup>	20	20	20
Содержание токсичных компонентов, г/м <sup>3</sup>			
Пыли	0.2	0.1	0.2
Диоксида серы	0.4	0.2	0.1
Триоксида серы	0.03	0.02	0.01
Общего фтора	0.35	0.2	0.1
Пентаоксида фосфора	0.5	0.25	0.4

Слив шлака и феррофосфора из печей производится не одновременно, поэтому целесообразным, представляется возможность, пенные аппараты, предназначенные для очистки газов узла слива шлака, использовать для очистки вышеуказанных газов. Однако, производительность пенных аппаратов составляет 100000м<sup>3</sup>/ч, поэтому все газы пропустить

через них не представляется возможным. Отсос газов от люков электрофильтров и узла слива феррофосфора производится также одновременно, а отсос от желобов и разливочных машин феррофосфора ведётся почти одновременно. Исходя из вышеизложенного, наиболее целесообразным является направлять на очистку, в момент слива феррофосфора, газы, отсасываемые от желобов. Так как они содержат наибольшее количество токсичных компонентов. В этот период отсос газов от узла слива шлака не производится, выделение вредных веществ из шлака после его слива практически не происходит. По завершению слива феррофосфора система очистки переключается на отсос и очистку газов узла слива шлака.

Газы, отсасываемые от разливочных машин, без очистки выбрасываются в атмосферу.

Поскольку отсос газов от люков электрофильтров по времени совпадают с отсосом газов от узла слива шлака и феррофосфора, их также направляют на очистку в пенные аппараты.

Технологические параметры работы пенных аппаратов аналогичны как для очистки газов узла слива шлака.

Содержание токсичных компонентов в газах на выброс в атмосферу, отсасываемых от желобов, г/м<sup>3</sup>: пыли – 0.02, диоксида серы – 0.02, общего фтора – 0.027, пентаоксида фосфора – 0.05.

Содержание токсичных компонентов в газах на выбросе в атмосферу, отсасываемых от люков электрофильтров, г/м<sup>3</sup>: пыли – 0.02, диоксида серы – 0.005, общего фтора – 0.008, пентаоксида фосфора – 0.04.

**Источники финансирования. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-61-00096. The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 22-61-00096**

#### БИБЛИОГРАФИЯ

1. Пучков А. Ю., Лобанева Е. И., Култыгин О. П. Алгоритм прогнозирования параметров системы переработки отходов апатит-нефелиновых руд // Прикладная информатика. 2022. Т. 17. № 1. С. 55–68.
2. Бобков В.И., Дли М.И. Цифровизированный инжиниринг энергоресурсоэффективной экологически безопасной химико-энерготехнологической системы производства фосфора // Математические методы в технологиях и технике. 2021. № 8. С. 111-114.
3. Орехов В.А., Бобков В.И., Быков А.А. Исследование особенностей высокотемпературных режимов обжига окомкованного рудного сырья, обогащенного свободным углеродом // Успехи современного естествознания. 2023. №11. С. 174-179.
4. Zhu, X., Ji, Y. A digital twin-driven method for online quality control in process industry // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2022. 119(5-6), pp. 3045-3064.
5. Бобков В.И., Орехов В.А. Особенности методики определения теплофизических свойств фосфоритового агломерата // Современные наукоёмкие технологии. 2022. № 10-1. С. 59-63.
6. Borisov V., Bulygina O., Vereikina E. The use of coevolutionary algorithms for optimizing the operating regimes of the roasting conveyor machine. // Journal of Applied Informatics. 2023. vol.18, no.3, pp.52-60. <https://doi.org/10.37791/2687-0649-2023-18-3-52-60>
7. Пучков А.Ю., Дли М.И., Прокимнов Н.Н., Шутова Д.Ю. Многоуровневые алгоритмы оценки и принятия решений по оптимальному управлению комплексной системой переработки мелкодисперсного рудного сырья // Прикладная информатика. 2022. Т. 17. № 6. С. 102–121. <https://doi.org/10.37791/2687-0649-2022-17-6-102-121>
8. Дли М.И., Пучков А.Ю., Прокимнов Н.Н., Окунев Б.В. Нечеткологическая модель многостадийной химико-энерготехнологической системы переработки мелкодисперсного рудного сырья // Прикладная информатика. 2023. Т.18. №3. С. 92–104. <https://doi.org/10.37791/2687-0649-2023-18-3-92-104>.
9. Пучков А.Ю., Прокимнов Н.Н., Рысина Е.И., Шутова Д.Ю. Нейрорегулятор комплексной технологической системы переработки рудных отходов // Прикладная информатика. 2023. Т. 18. № 5. С. 91–105. <https://doi.org/10.37791/2687-0649-2023-18-5-91-105>

10. Li, J., An, H.-F., Liu, W.-X., Yang, A.-M., Chu, M.-S. Effect of basicity on metallurgical properties of magnesium fluxed pellets // *Journal of Iron and Steel Research International*. 2020. 27(3). pp. 239-247.

11. Wang, S., Guo, Y., Zheng, F., Chen, F., Yang, L. Improvement of roasting and metallurgical properties of fluorine-bearing iron concentrate pellets // *Powder Technology*. 2020. 376, pp. 126-135.

12. Nayak, D., Ray, N., Dash, N., (...), Pati, S., De, P.S. Induration aspects of low-grade ilmenite pellets: Optimization of oxidation parameters and characterization for direct reduction application // *Powder Technology*. 2021. 380. pp. 408-420.

13. Орехов В.А., Бобков В.И. Анализ теплофизических свойств мультикомпонентных печных газов в энерготехнологических системах термической подготовки и переработки фосфатного рудного сырья // *Энергобезопасность и энергосбережение*. 2023. № 2. С. 50 – 54.

14. Разборская С.К., Полянский П.С., Виссарионова Е.А., Попов В.Г. Технологические направления утилизации и обезвреживания органических отходов различного происхождения // *Вода: химия и экология*. 2023. №6. С. 22-29.

15. Tian, H., Pan, J., Zhu, D., Wang, D., Xue, Y. Utilization of Ground Sinter Feed for Oxidized Pellet Production and Its Effect on Pellet Consolidation and Metallurgical Properties // *Minerals, Metals and Materials Series. 11th International Symposium on High-Temperature Metallurgical Processing*. 2020. pp. 857-866

16. Дли М.И., Черновалова М.В., Соколов А.М., Моргунова Э.В. Нечеткая динамическая онтологическая модель для поддержки принятия решений по управлению энергоемкими системами на основе прецедентов // *Прикладная информатика*. 2023. Т. 18. № 5. С. 59–76.

17. Валеев С.И., Старовойтова Е.В., Сулумханова Х.Л. Новые методы анализа загрязнений в окружающей среде: современные технологии и оборудование // *Вода: химия и экология*. 2023. №11. С. 84-93.

\*\*\*\*\*

#### ANALYSIS OF THE GAS PURIFICATION SYSTEM FROM THE COOLING ZONE OF THE SINTERING MACHINE FOR SINTERING PHOSPHORITE ORE FINES

**Nezamaev S.V., Bykov A.A., Bobkov V.I.**

The presented study discusses the issues of cleaning gas emissions formed in the process cooling zone of the sintering machine during the sintering of ore phosphate material. Technical solutions for gas purification of agglomerate cooling process are given, taking into account the process of moisture condensation from gases inside exhausters. It has been established that the spraying of foam apparatus should be carried out with a 3% solution of caustic soda, which is continuously supplied to the circulation tank. Process parameters of foam units, cyclones, spray traps functioning were revealed.

The sequence of stages of dry and wet cleaning, gases formed in the technological zone of cooling the agglomeration machine, and consisting of two parallel foam apparatus, has been scientifically substantiated. And the trapped dust in the cyclones should be returned to the agglomeration process. A meaningful statement of the analysis problem, technological features of aspiration air purification in phosphorus production is presented, which differs by taking into account the inlet dust content of the charge preparation and agglomeration compartments and the average median diameter of suspended particles, which allows using dust chambers in the first purification stage. The wet single-stage purification of phosphorus production gases in foam devices is scientifically justified, taking into account the experience of similar installations and the physical and technical properties of gas and dust. It has been found that a foam apparatus for purifying aspiration air should have a highly developed gas-liquid contact surface, unlike the apparatus recommended for purifying gases from sintering and cooling processes of a phosphorite agglomerate. Hardware engineering is proposed for the redistribution of gas-air flows of a complex system for cleaning aspiration air of phosphorus production.

**Keywords:** gas emissions, cleaning, environmental safety, chemical technology, agglomerate, chemical and energy technology process.

---

Сведения об авторах:

**Незамаев Сергей Владимирович**

Соискатель,

Российский химико–технологический университет им. Д.И. Менделеева,

Москва, Россия

**E-mail:**[nezamayevs@mail.ru](mailto:nezamayevs@mail.ru)

**Быков Александр Александрович**

Кандидат педагогических наук, доцент,

Филиал ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ» в

г.Смоленске, Россия

**E-mail:**[alex1by@mail.ru](mailto:alex1by@mail.ru)

**Бобков Владимир Иванович**

Доктор технических наук, доцент,

Филиал ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ» в

г.Смоленске, Россия

**E-mail:**[vovabobkoff@mail.ru](mailto:vovabobkoff@mail.ru)

УДК 54

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ГРУНТОВЫХ И ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА НИЗИННОГО ТОРФЯНИКА

Сысуйев Владислав Васильевич

*В целях обоснования «решений основанных на природе» (Nature-Based Solutions, NBS) исследованы механизмы регулирования низинными торфяниками состава стоковых вод. При фильтрации через хорошо разложившиеся торфа грунтовых вод с повышенным содержанием компонентов происходит их трансформация. Основными процессами являются: сорбция-десорбция органическими и органоминеральными комплексами торфов; взаимодействие с водами и минеральными взвесями поверхностного стока; биогеохимическое вовлечением компонентов в процессы торфообразования. В результате формируется ландшафтно-геохимический барьер с пространственной дифференциацией химического состава торфов – содержание Ca, Mg, S, Fe и Mn фиксируют зону разгрузки грунтовых вод; содержание элементов силикатных минералов Si, Al, Ti, Na, K монотонно уменьшается по мере удаления от края болота. Ни по одному из элементов не достигнуто состояние насыщения ионообменных групп в торфе. Соотношение содержаний компонентов в водах до и после барьера, составляет для концентрирующихся элементов  $S_{Al} \sim 12 \div 10$ ,  $S_{Ca} \sim 8 \div 4$ ,  $S_{Fe} \sim 6 \div 4$ ,  $S_{Mn} \sim 4 \div 3$ ,  $S_S \sim 2 \div 1,5$ ; для не концентрирующихся элементов  $S_{Cl, K, Na} \sim 1,5 \div 0,8$ ,  $S_{Si} \sim 1 \div 0,3$ .*

**Ключевые слова:** низинное болото, водный сток, геохимический барьер

Цели Рамсарской конвенции подписанной РФ: «сохранение и разумное использовании всех водно-болотных угодий, как вклад в достижение устойчивого развития» выдвинуты в ответ на повсеместное осушение болот для сельскохозяйственного и лесохозяйственного использования [9]. Так в Европе осушена почти половина торфяников (46%) от общей площади в 593 727 км<sup>2</sup> [24]. Причем, площадь, на которую влияет дренаж, существенно больше. Осушение приводит к снижению способности регулирования водных ресурсов и контроля наводнений, выносу веществ и растворенных соединений в дренажные воды, к потере биоразнообразия и высоты торфяника, к выбросу CO<sub>2</sub> [16]. Проблемы с антропогенной деградацией возникают прежде всего в низинных эвтрофных торфяниках пригодных для сельского хозяйства. В связи с этим с 1980-х годов важным вопросом стало управление торфяниками в Германии, Ирландии, Нидерландах, Финляндии и Канаде [21]. Важным инструментом стало повторное увлажнение торфяников в целях восстановления растительности и биоразнообразия. Было показано, что повторное увлажнение снижает выбросы CO<sub>2</sub>, поскольку предотвращается разложение торфа. Однако повторное увлажнение происходит без учета стратиграфии торфов и отдельного питания, без учета процессов смешения грунтовых и поверхностных вод, без учета климатической и биогеографической обстановки и т.п. В настоящее время неизвестно в какой степени повторное увлажнение может вернуть болота в их первоначальное состояние, поскольку осушение изменяет торфа сильно уменьшая гидравлическую проводимость. Пока имеются лишь скудные свидетельства того, что повторное увлажнение может привести к образованию нового торфа [20]. Осложняет ситуацию отсутствие математических моделей, адекватно описывающих механизмы формирования низинных торфов, которые существенным образом отличаются от изученных механизмов формирования верховых торфяников. Накопление торфа обязано неполному разложению органических остатков в анаэробной среде. В отличие от верховых болот, где рост торфа основан на прирастании мхов Sphagnum [21], образование низинного торфа в болотах происходит по другому механизму: кроме отпада и опада растений существенная роль принадлежит корням и корневищам осок, трав и древесных

растений, которые прорастают в уже существующей почвенной матрице. В результате низинный торф образуется из материала разного времени и требует других подходов к описанию динамики прирастания и определению возраста [21].

Новые варианты землепользования на торфяниках выдвинуты инициативами Европейской Комиссии [23], в рамках которых для очистки сельскохозяйственных и коммунально-бытовых сточных вод предлагаются мероприятия, основанные на природных процессах (Nature-Based Solutions – NBS). В обзоре технологических подходов [22] единственными NBS для очистки сточных вод селитебных территорий приводились именно водно-болотные угодья. Создаваемые водно-болотные угодья используют естественные процессы очистки сточных вод при их взаимодействии с болотной растительностью, бактериями и субстратами в более контролируемой среде. Впоследствии для этих целей стали предлагаться «зеленые стены» и «зеленые крыши», которые рассматриваются как адаптация водно-болотных угодий, построенных на основе потока вод через пористую среду с растительным покровом, где вода протекает либо вертикально, либо горизонтально. Подобные локальные системы и некоторые их гидроэкологические параметры функционирования приведены в обзоре [15]. Однако при недостатке данных о механизмах и емкости очистки, о том, что происходит с растениями и средой, в которой происходит фильтрация, невозможно объективно оценить эффективность подобных локальных NBS решений.

Природными аналогами таких систем являются низинные болота. В ландшафтах с гумидным и семигумидным климатом и расчлененным рельефом низинные болота обычно формируются на выходах относительно минерализованных грунтовых вод. Расположение этих болот в ложбинах рельефа, у подножий склонов, в поймах водотоков и т.п., способствует поступлению на их поверхность также значительного количества вод делювиального и ручейкового стока. Минералого-геохимические свойства торфяных отложений формируются при разложения высокозольной травяно-древесной растительности при взаимодействии с фильтрующимися через их толщу грунтовыми водами и поверхностным стоком, приносящим минеральные взвеси во время паводков [5, 24]. Низинные торфа характеризуются высокой степенью разложения (>35%), относительно высокой объемной массой (0,15-0,21 г/см<sup>3</sup>), высокой влагоемкостью (до 600-800%), высокой зольностью (6-50%), слабокислым или нейтральным pH, низкой гидролитической кислотностью (12-20 мг-экв/100г торфа), высокой емкостью поглощения катионов (200-300 мг-экв/100г торфа) [4]. Торфа способны прочно удерживать ряд химических элементов в виде комплексов, но возможности не безграничны. Прямыми методами ультрафильтрации и диализа болотных и таежных речных вод установлена миграция водорастворимых и коллоидных фракций органоминеральных комплексов Fe и Al, контролирующих перенос большой группы микроэлементов [19].

Таким образом *низинные торфа могут отражать водообмен грунтовых и поверхностных вод, сорбционно-десорбционные взаимодействия торфов с грунтовыми водами, процессы разложения-образования минеральных фаз, роль биогеохимического круговорота элементов, эффективность и устойчивость процессов очистки фильтратов.* Однако вопросам экологического значения очистки сточных вод при фильтрации в торфах низинных болот уделяется явно недостаточное внимание в литературе.

Целью работы является выявление механизмов формирования пространственного распределения химического состава торфов низинного болота под воздействием фильтрации сквозь них грунтовых вод и водообмена с поверхностными водами с учетом биогеохимических процессов торфонакопления.

#### **ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ**

Исследованное низинное болото «Ольховое» находится в южно-таежной зоне в пределах Осташковской конечно-моренной гряды Валдайской возвышенности на территории Национального парка «Валдайский». Физико-географические условия этого района детально изучены [12, 14].

**Краткая ландшафтная характеристика** Болото состоит из основного массива площадью около 90000 м<sup>2</sup> и трех отвершков, которые начинаются у склонов (8° –10°) моренной гряды, ограничивающей болотный массив с юга и являющейся источником минерального питания торфомассива. Превышение гряды над поверхностью болота составляет 10-15 м. Гряда сложена



валунными карбонатными среднесуглинистыми конечно-моренными отложениями вепсовского ледникового яруса ( $gl/Q_{III}^4$ ) Валдайского оледенения [10]. Конечная морена подстилается флювиогляциальными песками ( $fg/Q_{III}^4$ ). С поверхности суглинки перекрыты слоем маломощных покровных супесей. На приуроченных к вершинам и склонам холмов дерново-палево-подзолистых почвах произрастают высоко продуктивные ельники кисличниковые и разнотравно-кустарничковые, запасы древостоя которых в отдельных местообитаниях достигают  $800 \text{ м}^3/\text{га}$  [11]. Эвтрофный характер болота обусловлен грунтовым и склоновым типами водного питания. Поверхность болота покрыта зарослями таволги (*Spiraea salicifolia*) и папоротника (*Athyrium filix femina*), по вымочкам растут рдест и вахта трехлистная. В древесном ярусе преобладает ольха серая (*Alnus incana*) высотой до 15 м. Отвершки имеют монотонное строение травяно-древесного торфа мощностью около 1,0 м со степенью разложения 45-55%. Верхний подстилочный горизонт мощностью 3-5 см, состоит из опада и мха, переплетенных корнями. Наиболее глубокие горизонты основной залежи (глубже 1,8 м в точках 3 и 10 и глубже 2,5 м в точке 9) сложены менее разложившимися (<20%) сфагновыми торфами. Радиоуглеродная датировка верхнего слоя сфагновых торфов, взятых в точке 9, показала возраст  $7470 \pm 250$  лет (МГУ-496), т.е. начало атлантического климатического оптимума.

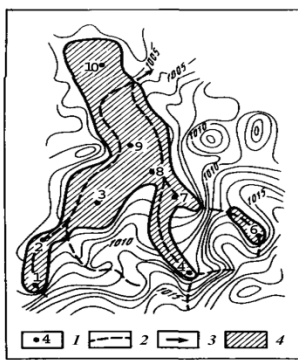


Рисунок 1. Схема исследованного низинного болота. 1 – точки отбора проб торфа и болотных вод; 2 – русла временных ручьев на поверхности болота; 3 – дренающий ручей; 4 – тело торфомассива

С наступлением атлантического климатического оптимума вид торфа резко изменился – это низинный торф травяно-древесного состава 45-50% степени разложения. Природные процессы в дальнейшем коренным образом не менялись – на это указывает накопление довольно однородной толщи низинного торфа мощностью около 2 м в центральной части и 1,5-1,0 м на периферии основного массива. Возраст торфа на глубине 1,20-1,60 м по данным радиоуглеродной датировки,  $4420 \pm 20$  лет (МГУ-495).

Для выявления процессов формирования низинного болота применена комплексная методика ландшафтно-геохимических исследований [7]. В характерных частях болота (Рисунок 1) были заложены опорные точки с отбором проб торфа, болотных вод и основных торфообразующих растений. В точках №№ 8, 9, 10 устанавливали скважины из полиэтиленовых труб для определения химического состава вод.

**Особенность методики определения химического состава** заключалась в раздельном определении валового состава органической и минеральной компонент торфов. Образцы торфа и растений озолялись в муфеле при температуре строго ниже  $450^\circ \text{C}$ . Растворение полученной золы проводили в 5%-ной  $\text{HCl}$ , минеральные примеси отделялись. Для учета влияния растворимости минеральных примесей в 5%-ной  $\text{HCl}$  вносили поправку в результаты зольного анализа. Таким образом, состав 5%-ного солянокислого раствора золы отражает содержание минеральных элементов органического вещества торфа, поступивших с торфообразующими растениями, а также сорбированных, растворенных и коллоидных соединений из болотных вод. Параллельно классическим методом по Кноппу в золе определялось содержание  $\text{CO}_2$  карбонатов. Содержание элементов рассчитывалось в окисной и элементной формах на абсолютно сухую «чистую» (безпримесную и безкарбонатную) навеску золы. Навеска

минеральных примесей торфа подвергалась обработке горячим раствором 5% КОН для отделения аморфного  $\text{SiO}_2$ , который количественно определялся в фильтрате и добавлялся к его содержанию в органической компоненте. Валовой состав минеральных примесей проводился по методике силикатного анализа при сплавлении навески с карбонатом натрия [1]. Определение элементов проводилось классическими и атомно-абсорбционными методами.

В болотных водах  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  определяли на ионном хроматографе,  $\text{HCO}_3^-$  титриметрически,  $\text{C}_{\text{орг}}$  – бихроматным методом, общее содержание кремния, алюминия, железа, и марганца – атомно-абсорбционными методами. Анализы выполнены в лабораториях кафедр географии почв и геохимии ландшафтов и физической географии, и ландшафтоведения географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова. Интерпретация данных основана на расчетах содержания элементов/окислов на абсолютно сухое беспримесное органическое вещество торфа (за исключением оговоренных случаев).

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Воды поверхностного стока с окружающих холмов несут большое (для лесных водотоков) количество взвешенного материала, что легко устанавливается в руслах ручейков в тальвеге болота. Размер зерен достигает 1-2 мм и больше; минеральный состав их преимущественно кварцевый с примесью полевых шпатов. Очевидно и присутствие илистых взвесей. Стоковые воды на выположенной поверхности торфяников резко уменьшают скорость течения и взвеси выпадают на тело торфяника – болото является своего рода отстойниками. Содержание минеральных примесей резко уменьшается в торфах по мере удаления от склонов: «сырая» зольность 60-75% в торфах головы отвершков, 55-60% в устье отвершков, и 30-35% в центре массива (Таблица 1). Такое распределение характерно для поверхностных и средних горизонтов торфяной залежи. В глубоких слоях сфагнового торфа количество минеральных примесей 25-35% и пространственно не контрастно.

#### Минеральные примеси как источник поступления элементов в торф

На Рисунок 2 приведен график зависимости состава золы органического вещества торфа от количества минеральных примесей («сырой» золы), нерастворимых в 5%-ной  $\text{HCl}$ .

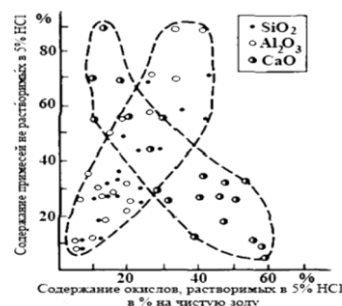


Рисунок 2. Зависимость химического состава золы органического вещества (в % на чистую, беспримесную бескарбонатную золу) от содержания минеральных примесей в торфах (% «сырой» золы)

На графике видно, что по мере увеличения минеральных примесей растет зольность органического вещества низинных торфов и увеличивается в составе золы относительное содержание кремния и алюминия, в то время как содержание кальция, магния и серы в той же пропорции уменьшается, а содержание железа остается примерно постоянным. В результате в низинных торфах с количеством примеси до 35% от веса «сырой» золы преобладающим элементом является Ca; в торфах с количеством примесей от 35 до 55% содержание CaO,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  примерно одинаково и составляет по 25-35% от веса золы; в низинных торфах с количеством примесей более 55% преобладающими элементами в золе являются  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , содержание CaO уменьшается до 10-15%. В связи с этим классическое подразделение торфов на нормально зольные и высокозольные [6] получает генетическое содержание. Нормально зольные низинные торфа с содержанием примесей менее 35% получают минеральное питание преимущественно в растворенном виде. Минеральное питание осуществляется водами

поверхностного и главным образом грунтового стока, основные компоненты которых Ca, Mg, S, Na, а при наличии на водосборе восстановительных глеевых условий – Fe.

Для выяснения роли процессов растворения минеральных частиц в условиях низинного болота проанализируем валовой состав минеральных примесей, и состав золы торфов. Для примера взято два разреза – в точках 4 и 10, контрастных по условиям питания и количеству примесей (Таблица 1, 2).

Таблица 1.

**Зольность и состав (в % окислов) органического вещества торфов**

Точка отбора проб	Глубина отбора, см	% сырой золы	% чистой золы	в % на «чистую» золу органического вещества				
				SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO
10	6-30	30,10	5,27	33,00	11,14	7,03	25,18	3,74
10	30-80	32,43	5,73	14,38	19,49	7,75	47,37	3,10,
10	80-160	33,78	4,05	16,72	10,77	6,00	53,45	3,95
10	160-280	68,19	7,61	28,78	7,50	11,0	38,46	4,38
4	6-30	71,05	32,70	43,24	26,27	8,08	10,24	2,31
4	35-80	69,68	21,25	25,62	32,62	9,47	18,70	3,89

Таблица 2.

**Валовой состав (в % окислов) минеральных примесей торфов.**

Точка отбора проб	Глубина отбора, см	% сырой золы	% чистой золы	в % на прокаленную навеску минеральных примесей				
				SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO
10	6-30	30,10	5,27	82,13	8,94	1,05	1,35	1,24
10	30-80	32,43	5,73	86,34	7,57	0,63	0,77	0,82
10	80-160	33,78	4,05	83,99	7,41	0,88	1,06	0,97
10	160-280	68,19	7,61	84,31	8,04	1,05	1,08	0,54
4	6-30	71,05	32,70	81,12	10,02	1,70	1,05	0,52
4	35-80	69,68	21,25	85,47	7,31	1,23	1,05	0,43

Валовой состав примесей изменяется по вертикальному профилю торфа, но остается близким на одной глубине от поверхности в разных частях торфомассива. Заметно увеличение содержания кремнезема и уменьшение содержания остальных элементов в минеральных примесях вниз по профилю торфа, по-видимому, за счет растворения части полевых шпатов и глинистых минералов, и остаточного накопления кварца. Процессы растворения алюмосиликатов и миграции элементов находят отражение также в пространственном распределении химического состава вод (Таблица 3, 5).

Таблица 3.

**Состав грунтовых вод низинного болота в межень (17.08.2013), мг/л**

Точка отбора проб	pH	C <sub>орг</sub>	HCO <sup>3-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Si <sub>общ</sub>	Fe <sub>общ</sub>	Al <sub>общ</sub>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mn <sub>общ</sub>
4	5,73	29,8	12,8	1,8	25,1	2,16	1,787	0,466	9,6	1,0	1,7	1,5	0,025
7	6,78	52,1	67,1	1,5	27,7	0,80	3,963	0,736	26,4	1,4	2,0	1,8	0,067
8	6,99	78,9	115,9	2,2	40,5	2,24	1,678	0,097	88,8	35,0	1,8	1,9	0,080
9	6,76	74,0	361,3	0,9	21,0	2,16	0,622	0,097	70,4	31,7	2,1	2,7	0,015
10	6,79	81,6	453,8	2,2	25,9	2,96	1,507	0,064	66,4	11,0	1,6	0,9	0,119
Ручей	6,17	47,5	60,5	2,0	20,2	н.д.	0,948	0,233	32,0	4,1	1,5	1,0	0,028

Так в летнюю межень после длительного взаимодействия торфяных вод с минеральной и органической фазами торфов максимальные концентрации Al в водах приурочены к участкам торфа, наиболее обогащенным минеральными примесями (в т. 1 – 0,772 мг/л, в т. 7 – 0,736, в т. 4 – 0,466 мг/л), и уменьшаются по направлению стока. Перераспределение элементов внутри торфа по мере фильтрации отражается соотношением этих элементов в болотных водах

(Таблица 3). В то время как содержание Al в водах по направлению потока к дренирующему ручью в несколько раз уменьшается, содержание Si отчетливо возрастает. В результате величина молекулярного отношения  $SiO_2/Al_2O_3$  в водах изменяется от 2,5-4,5 в отвершках болота до 21-22 в центре массива и до 45-47 вблизи дренирующего ручья. То есть, при растворении минералов наблюдается преимущественный вынос кремнезема с водами, тогда как алюминий закрепляется в органической части торфа. Таким образом, основным источником Si и Al в органической фазе низинных торфов являются процессы растворения привнесенных на поверхность массива минеральных частиц, и их дифференциация в процессе массопереноса. Процессы растворения алюмосиликатов в условиях низинного торфообразования достаточно отчетливы, хотя и заметно менее интенсивны, чем на верховых болотах [17].

#### Биогеохимические процессы поступления элементов в торф

Роль биогеохимических процессов при торфообразовании рассмотрим на примере сопряженного анализа химического состава органического вещества торфа и основных растений-торфообразователей (ольхи серой, таволги вязолистной, и папоротника) в характерной точке массива (Таблица 4).

Таблица 4.

#### Содержание элементов в растениях-торфообразователях и их соотношение к содержанию в низинном торфе (% чистой беспримесной золы, и % в органическом веществе проб растений и торфа)

Объект	Точка отбора проба	Зола, %	Si	Fe	Al	Ca	Mg	K	Na	Mn	P	S
Ольха, листья	4	6,11	0,170	0,059	0,001	1,955	0,377	1,310	0,010	0,040	0,162	0,115
Ольха, ветви	4	1,78	0,020	0,011	0,003	0,675	0,101	0,246	0,020	0,021	0,067	0,040
Ольха, корни, живые	4	8,21	0,103	0,334	0,209	1,137	0,102	0,243	0,182	0,038	0,114	0,089
Ольха, корни, разложившиеся	4	6,75	0,166	0,375	0,081	2,490	0,239	0,023	0,065	0,011	0,065	0,621
Папоротник	4	8,89	1,033	0,068	0,015	1,052	0,551	2,888	0,020	0,036	0,167	0,086
Таволга	4	3,73	0,356	0,042	0,003	0,505	0,369	0,888	0,009	0,088	0,056	0,102
Среднее	-	5,91	0,308	0,148	0,052	1,302	0,290	0,933	0,051	0,039	0,105	0,176
Торф 5-50 см	4	32,7	6,609	1,848	4,547	2,393	0,456	0,385	0,109	0,096	0,408	0,576
Торф/растение*	-	5,53	<b>21,46</b>	<b>21,49</b>	<b>87,44</b>	1,84	1,57	<b>0,41</b>	2,14	2,48	3,88	3,28

\*Примечание. Жирным шрифтом показаны значения существенно больше, а курсивом – меньше среднего значения соотношения

Средний состав органического вещества торфообразователей (строка «среднее») рассчитан из предположения о примерно равном их весовом соотношении при преобразовании в торф. В принципе возможен расчет в соответствии с весовым вкладом каждого органического компонента и баланса прихода-расхода элементов [19]. Такой подход, корректный для верховых болот, выходит за рамки работы. В нашем случае принята простая оценка источников поступления элементов в торф – считаем, что минеральные примеси (или содержание Ti) своеобразный маркер процессов. Соотношение средней зольности растений к зольности торфа (строка «торф/растение») составляет 5,5 - можно считать, что содержание чистой золы увеличилось в 5,5 раз при преобразовании среднего «опада» растений в торф. Сравнение с другими элементами показывает, что эти отношения для Si, Fe составляют 21,5, а для Al - даже 87,4. Такое отличие соотношений элементов и зольностей (на порядок) указывает на принос и разложения элементов минеральных взвесей.

Напротив, величина отношений содержаний торф/растения для Ca, Mg (1,8 и 1,6), а также Na, Mn, P, S (2,1; 2,5; 3,9 и 3,3), намного ниже соотношения зольностей, что может

свидетельствовать о биогеохимическом накопления элементов в торфе. Особенно низкое соотношение для К (0,4) подчеркивает его интенсивное биологическое поглощение.

### Пространственное распределение элементов в торфянике

Источники минерального питания отчетливо выявляются при изображении распределения минеральных компонентов по профилю низинного болота, проведенному через точки 4, 8, 9, 10 (Рисунок 3). Распределение компонентов на профилях, проведенных через два других южных отвершка, аналогично.

С количеством минеральных примесей тесно коррелирует зольность органического вещества низинных торфов и содержание в нем Si, Al, Ti, Na и K – элементов, поступающих главным образом с поверхностным стоком и накапливающихся на поверхности болота под действием механического барьера (Рисунок 3).

Ведущим фактором распределения содержания кальция и сопутствующих элементов в низинных торфах являются грунтовые воды - изолинии содержания Ca в золе торфов отчетливо фиксируют зону разгрузки грунтовых вод и путь их фильтрации внутри торфомассива (Рисунок 3). Ареал максимального содержания Ca сдвигается от средних горизонтов в точке 8 к поверхностному слою торфа в точке 9 в соответствии со схемой фильтрации грунтового потока, проходящего вдоль скрытой слоистости торфа с постепенным подъемом в зону торфогенного слоя и очеса, где коэффициенты фильтрации выше [2]. Причиной выклинивания потока грунтовых вод в районе точки 8 служит "литологическое окно" внутри моренных суглинков на глубине 3-10 м [10]. Эти результаты подтверждаются химическим составом торфяных вод. Максимальное содержание  $\text{Ca}^{2+}$  (88 мг/л) в межвенных водах, наблюдается именно в точке 8 – предполагаемом месте выклинивания грунтовых вод (Таблица 3). По мере удаления от зоны выклинивания грунтовых вод концентрация  $\text{Ca}^{2+}$  уменьшается в сторону дренирующего ручья. Воды торфов, находящиеся вне подпитывания грунтовыми водами, содержат в 4-8 раз меньше  $\text{Ca}^{2+}$ . Столь значительные различия подтверждают разгрузку грунтовых вод вблизи точки 8.

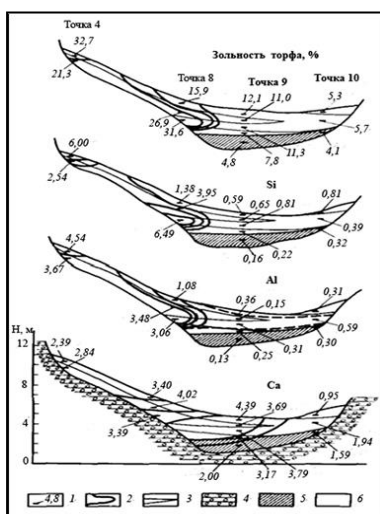


Рисунок 3. Схема распределения минеральных компонентов по вертикальному профилю торфов низинного болота.

- 1 – содержание компонентов, % на сухое органическое вещество торфа;
- 2 – изолинии содержания компонентов;
- 3 – стратиграфические границы торфа;
- 4 – моренные суглинки;
- 5 – сфагновые торфа слабо разложившиеся;
- 6 – древесные и травяно-древесные торфа

Показательна и величина отношения Ca/Mg, которая в зоне выклинивания грунтовых вод составляет 2,0-2,5 из-за большой доли доломитовой составляющей в карбонатах моренных отложений. Там, где существенно влияние поверхностного стока, это отношение значительно выше и составляет 10 и более, характеризую соотношение этих элементов в опаде, подстилке и почвах. В период половодий отмечается разбавление вод торфяника, причем, чем ближе точка

к фронту питания, тем интенсивнее разбавление. Так, в точке 8 содержание  $\text{Ca}^{2+}$  к 10.X1 уменьшилось почти в 4 раза, в точке 9 посредине болота – в 2 раза, а в точке 10 – всего в 1,5 раза (Таблица 5).

Таблица 5.

**Динамика характерных компонентов химического состава грунтовых вод низинного болота в осеннее половодье 2013 года, мг/л**

Место отбора проб	Al <sub>общ</sub>					Ca <sup>2+</sup>				
	Скважины, разрезы				Ручьи	Скважины, разрезы				Ручьи
	17.08*	11.09	10.10	11.11		10.11	17.08	11.09	10.10	
Точка 1	0,772	-	-	-	0,624	17,6	-	-	-	9,6
Точка 8, скв.11	0,097	0,084	0,114	-	-	88,8	42,0	23,2	-	-
Точка 9, скв.18	0,097	0,214	0,238	-	-	70,4	43,2	35,2	-	-
Точка 10, скв.15	0,064	0,341	0,346	0,233	0,365	66,4	55,2	41,6	32,0	20,0
Ручей "Таежный"	-	-	-	0,317	0,656	-	-	-	26,4	17,6

\*Примечание. В строке показаны даты отбора проб воды из скважин, разрезов и ручьев

В результате к середине осени наблюдалось выравнивание, а поздней осенью – даже инверсия распределения концентраций кальция в водах: в зоне разгрузки грунтовых вод она была ниже, чем в центре болота и тем более на его периферии. Это обусловлено активным водообменом между водами паводкового осеннего стока, проходящего транзитом по поверхности болота, и грунтовыми водами, высачивающимися в тело торфяника с расходами меньшими на порядки. Содержание  $\text{Ca}^{2+}$  в водах поверхностного стока, поступающих из южных отвершков, по мере протекания по основному массиву торфяника увеличивается от 9,6 мг/л (что близко к среднему содержанию в водах поверхностного стока в лесу – 9,2 мг/л) до 20,0 мг/л, т.е. при формировании химического состава стоковых вод в периоды половодий происходит вынос Ca из торфяника. По этим данным нельзя судить о накоплении или обеднении торфов кальцием, поскольку невозможно оценить его поступление с грунтовым стоком. Важно отметить, что ни в одной точке торфяника концентрация кальция не достигла состояния насыщения ионообменных групп в торфе. Максимальное содержание Ca в торфах исследованного болота составляет 4,02-4,39%. Предельное содержание Ca в нормально зольных торфах без признаков минерализации по литературным данным составляет около 5% [6]. Расчеты карбонатно-кальциевого равновесия для грунтовых вод в нескольких километрах от объекта наших исследований на водосборе Усадье, с аналогичными гидрогеохимическими условиями, выявили недосыщенность по кальцию и кремнезему [3]. В потоке от области питания до разгрузки подземных вод с изменением щелочно-кислотных условий наблюдается уменьшение безразмерных индексов насыщения для кальцита от -3.05 до -0.17, для силикатов от -0.49 до -0.12. Отрицательные значения индекса в грунтовых водах показывают недосыщенность по отношению к основным породообразующим минералам. При фильтрации в торфе воды становятся еще более недосыщенными и агрессивными, вследствие уменьшения pH до 5.7–6.9 и присутствия большого количества органических кислот ( $C_{орг} = 30-80$  мг/л) на исследованном болоте. Поэтому, ожидать карбонатную минерализацию на исследованном нами низинном торфянике маловероятно.

В процессе торфообразования нарушаются соотношения Si и Al, свойственные алюмосиликатным минералам, являющимся основными источниками этих элементов. Наблюдается резкое уменьшение молекулярных отношений  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  в нижележащих горизонтах по сравнению с поверхностным горизонтом торфа. В верхних горизонтах величина отношения около 3 или даже более. Такое отношение характерно для илистой фракции окружающих почв, развитых на моренных суглинках с каолинит-гидрофлюидным составом глин. В нижних же горизонтах величина молекулярного отношения редко превышает 2. То есть, при разложении алюмосиликатов в верхнем горизонте торфяника наблюдается преимущественный вынос кремнезема с водами, тогда как алюминий закрепляется в органической части торфа. Это согласуется с соотношением этих элементов в болотных водах в период летней межени (Таблица 3). В то время как содержание Al в водах по направлению потока к дренирующему ручью в

несколько раз уменьшается, содержание Si отчетливо возрастает. В результате величина молекулярного отношения  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  в водах изменяется от 2,5-4,5 в отвершках болота до 21-22 в центре массива и до 45-47 вблизи дренирующего ручья. Процессы фракционирования Si и Al, по-видимому, имеют физико-химическую основу. В работе [13], проанализировавших вымороженное водорастворимое органическое вещество вод переходного болота в Тверской области, показано, что с менее дисперсной коллоидной фракцией размером  $>60\text{Å}$ , составляющей 70-75% органического вещества, связаны Fe, Al, Ca, Mg. Более дисперсная фракция размером  $<60\text{Å}$  – ионно-растворимая фракция органического вещества, связана только с кремнеземом. Поэтому при фильтрации вод через пористую массу торфа менее диспергированная коллоидная фракция органического вещества может в значительной мере задерживается, а вместе с ней аккумулируются в торфянике Fe, Al, Ca, Mg. Кремнезем, связанный с ионно-растворимой фракцией органического вещества, более подвижен.

Определение контрастности геохимического барьера проведено в период межени при установлении равновесие вод грунтового стока с торфами. Контрастность барьера, рассчитанная как соотношение содержаний компонентов в водах до и после барьера [7], составляет для концентрирующихся элементов  $S_{\text{Al}} \sim 12-10$ ,  $S_{\text{Ca}} \sim 8-4$ ,  $S_{\text{Fe}} \sim 6-4$ ,  $S_{\text{Mn}} \sim 4-3$ ,  $S_{\text{S}} \sim 2-1,5$ ; для слабо концентрирующихся элементов  $S_{\text{Cl, K, Na}} \sim 1,5-0,8$ , для не концентрирующихся  $S_{\text{Si}} \sim 1-0,3$  (Таблица 3).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Химический состав торфов низинного болота и дренирующих вод обусловлен пространственно-временным взаимодействием процессов поверхностного и грунтового стока со специфическими процессами торфообразования, разложения минеральных примесей и сорбционно-десорбционными особенностями торфов.

Для Si, Al, Ti, Na, K – элементов, поступающих преимущественно с поверхностным стоком и накапливающихся благодаря действию механического барьера в результате растворения минеральных примесей и сорбции торфами, характерно монотонное уменьшение содержания по мере удаления от склонов моренной гряды.

Для Ca, Mg, S, Fe и Mn ведущим фактором распределения содержания в низинных торфах является миграция с грунтовыми водами. Под действием фильтрации и сорбции их содержание в торфах отчетливо фиксируют зону разгрузки грунтовых вод. Комплексный барьер за время формирования в голоцене недосыщен по всем элементам и ожидать минерализацию на исследованном низинном болоте маловероятно.

Контрастность исследованного ландшафтно-геохимического барьера, рассчитанная как соотношение содержаний компонентов в водах до и после барьера, составляет для концентрирующихся элементов  $S_{\text{Al}} \sim 12-10$ ,  $S_{\text{Ca}} \sim 8-4$ ,  $S_{\text{Fe}} \sim 6-4$ ,  $S_{\text{Mn}} \sim 4-3$ ,  $S_{\text{S}} \sim 2-1,5$ ; для слабо концентрирующихся элементов  $S_{\text{Cl, K, Na}} \sim 1,5-0,8$ , для не концентрирующихся  $S_{\text{Si}} \sim 1-0,3$ .

В условиях гумидного климата низинное болото эффективно поглощало химические вещества, мигрирующие как в растворенном, так и во взвешенном состоянии в течение всего голоцена. Причем ни по одному из элементов не достигнуто состояние насыщения ионообменных групп в торфе. Это свидетельствует о высоких водоочистных способностях низинных торфомассивов.

### БИБЛИОГРАФИЯ

1. Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во Московского университета, 1970, 487 с.
2. Бондаренко Н.Ф., Коваленко Н.П. Водно-физические свойства торфяников. Л.: Гидрометеиздат, 1979, 160 с
3. Злобина В.Л., Медовар Ю.А., Юшманов И.О. Трансформация состава и свойств подземных вод при изменении окружающей среды. М.: Мир науки, 2017. 191 с.
4. Ефимов В.Н. Торфяные почвы. М.: Россельхозиздат, 1980, 120 с.
5. Ковалев В.А. Болотные минералого-геохимические системы. Минск: Наука и техника, 1985. 326 с.
6. Никонов М.Н. Происхождение золы в торфах. ДАН СССР 105 (2), 1955, 309-312 с.
7. Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафтов. М.: «Астрейя–2000», 1999, 768 с.

8. Руководство по Рамсарской конвенции: Справочник по осуществлению Конвенции о водно-болотных угодьях (Рамсар, Иран, 1971 г.), 4-ое издание. Гланд, Швейцария: Секретариат Рамсарской конвенции, 2006, 50 с.
9. Савичев О.Г. Геохимические показатели болотных вод в таежной зоне Западной Сибири. *Известия РАН. Серия географическая* (4), 2015, 47-57 с.
10. Скакальский Б.Г. Гидрогеологические и гидрохимические особенности стока с логов зоны избыточного увлажнения. *Тр. ГГИ* 102, 1963, 241–253 с.
11. Сысуев В.В., Бондарь Ю.Н., Чумаченко С.И. Моделирование структуры ландшафтов и динамики древостоев для планирования устойчивого лесопользования. *Вестник Моск. ун-та. Серия 5, География* (6), 2010, 39-49.
12. Труды национального парка «Валдайский». 1. СПб.: ФГУ «Национальный парк «Валдайский», 2010, 430 с.
13. Фотиев А.В., Фотиева В.Н. Связь органического вещества с минеральным в болотных водах. *Биология внутренних вод. Информ. бюл.* 1974 (21), 15-23 с.
14. Экология и продуктивность лесов Нечерноземья (на примере Валдая). М.: Изд-во Московского университета, 1980, 243 с.
15. Voano F., Caruso A., Costamagna E., et al. A review of nature-based solutions for greywater treatment: Applications, hydraulic design, and environmental benefits. *Science of the Total Environment* 711 (2020) 134731, 26 p.
16. Bonn A., Allott T., Evans M., et al. Peatland Restoration and Ecosystem Services: Science, Policy and Practice; Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2016
17. Dugmore, A.J., Newton, A.J., Sugden, D.E., Larsen, G. Geochemical stability of fine-grained silicic Holocene tephra in Iceland and Scotland. *Quaternary Science* (7), 1992, 173-183.
18. Ilina S.M., Lapitskiy S.A., Alekhin Y.V., et al. Speciation, size fractionation and transport of trace elements in the continuum soil water – mire - humic lake - river - large oligotrophic lake of a subarctic watershed. *Aquatic Geochemistry, Kluwer Academic Publishers* 22 (1), 2016, 65–95.
19. Frolking S., Roulet N.T., Tuittila E., et al. (2010) A new model of Holocene peatland net primary production, decomposition, water balance, and peat accumulation. *Earth Syst. Dynam.* 1, 1–21, / [www.earth-syst-dynam.net/1/1/2010/](http://www.earth-syst-dynam.net/1/1/2010/)
20. Günther, A.; Huth, V.; Jurasinski, G.; Glatzel, S. The effect of biomass harvesting on greenhouse gas emissions from a rewetted temperate fen. *GCB Bioenergy* 2015, 7, 1092–1106.
21. Jurasinski G, Ahmad S, Anadon-Rosell A, et al. From understanding to sustainable use of peatlands: the WETSCAPES approach. *Soil Syst* 2020 (4), 4-14.
22. Li, F., Wichmann, K., Otterpohl, R. Review of the technological approaches for grey water treatment and reuses. *Sci. Total Environ.* 407 (11), 2009, 3439–3449.
23. Maes J., Jacobs S. Nature-Based Solutions for Europe’s Sustainable Development. *Conservation Letters*, January/February 2017, 10 (1), 121–124
24. Malawska M., Wiłkomirski B. (2004) Geochemistry and geochemical differentiation on major elements in selected peat bog profiles (south-east Poland). *Soil Science and Plant Nutrition* 50(6), 925-930.
25. Pokrovsky O.S., Dupre B., Schott J. Fe-Al-organic colloids control of trace elements in peat soil solutions: results of ultrafiltration and dialysis. *Aquatic Geochemistry, Kluwer Academic Publishers* 11, 2005, 241–278.
26. Tanneberger, F.; Tegetmeyer, C.; Busse, S.; et al. The peatland map of Europe. *Mires Peat* 2017, 19, 1–17.

\*\*\*\*\*

#### INTERACTION OF GROUND AND SURFACE WATERS IN THE FORMING OF CHEMICAL COMPOSITION OF PEATLAND

**Sysuev V. V.**

In order to justify Nature-Based Solutions (NBS), the mechanisms of regulation of runoff water composition by lowland peatlands have been investigated. During filtration of groundwater with



increased content of components through well-decomposed peats, its transformation takes place. The main processes are: sorption-desorption by organic and organomineral complexes of peats; interaction with waters and mineral suspensions of surface runoff; biogeochemical involvement of components in peat formation processes. As a result, a landscape-geochemical barrier with spatial differentiation of peat chemical composition is formed - the content of Ca, Mg, S, Fe and Mn fix the zone of groundwater unloading; the content of silicate mineral elements Si, Al, Ti, Na, K monotonically decreases with distance from the bog edge. The saturation state of ion-exchange groups in peat has not been reached for any of the elements. The ratio of component contents in water before and after the barrier is for concentrating elements  $S_{Al} \sim 12 \div 10$ ,  $S_{Ca} \sim 8 \div 4$ ,  $S_{Fe} \sim 6 \div 4$ ,  $S_{Mn} \sim 4 \div 3$ ,  $S_S \sim 2 \div 1,5$ ; for nonconcentrating elements  $S_{Cl, K, Na} \sim 1,5 \div 0,8$ ,  $S_{Si} \sim 1 \div 0,3$ .

---

**Keywords:** lowland peatland, water runoff, geochemical barrier

---

#### Сведения об авторах:

**Сысуев Владислав Васильевич**

Профессор, д. геогр. наук, профессор географического факультета,  
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

E-mail: [v.v.syss@mail.ru](mailto:v.v.syss@mail.ru)

УДК 544.723.21:504.064.45

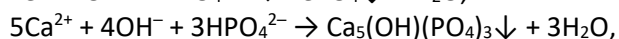
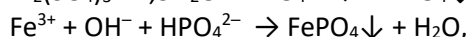
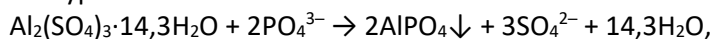
## АДСОРБЦИОННАЯ ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД ОТ ФОСФАТОВ

Фоменко Александра Ивановна

*Представлены результаты исследования адсорбционной очистки водных растворов от фосфатов с использованием в качестве адсорбента топливных зол, образующихся при сжигании твердого топлива (отходов переработки древесины, каменного угля) и взятого в качестве образца сравнения природного минерала шунгита Зажогинского месторождения. Экспериментально определены степень извлечения фосфат-ионов из водных растворов на представленных адсорбентах, площадь удельной поверхности, адсорбционная емкость. Исследована зависимость степени извлечения фосфат-ионов от продолжительности контакта раствора с адсорбентами и концентрации соли в исходном растворе. Установлено, что исследованные адсорбенты обладают адсорбционными свойствами по отношению к фосфатам. Приведена сравнительная оценка эффективности исследованных адсорбентов по извлечению фосфат-ионов из водных растворов. Показано, что в отношении фосфат-ионов зола древесная по сравнению с природным шунгитом и золой каменноугольной является более эффективным адсорбентом.*

**Ключевые слова:** адсорбция, зола топлива, природный минерал шунгит, фосфат-ионы, адсорбционная активность, площадь удельной поверхности.

Загрязнение гидросферы соединениями фосфора, главным образом в форме фосфатов, как одного из основных источников эвтрофикации, не позволяет рассчитывать на достаточность процессов самоочищения. Их избыток в поверхностных водах возникает в основном вследствие прямых разгрузок поверхностного стока ливневых и талых вод. На очистных сооружениях коммунально-бытовых и производственных сточных вод промышленных предприятий для удаления фосфора и других биогенных элементов традиционно используются технологии биологической очистки. Концентрация фосфора на входе в очистные сооружения коммунальных сточных вод обычно находится на уровне 8,0 – 12,5 мг/дм<sup>3</sup>, на выходе не должна превышать 1 мг/дм<sup>3</sup> [1]. Как известно, биологическая очистка не всегда обеспечивает необходимое качество получаемой очищенной воды в соответствии с требованиями установленных нормативов по остаточному содержанию фосфатов [1], [5]. Повышение степени очистки биологически очищенных сточных вод достигается введением в технологическую схему стадии доочистки в основном химическим осаждением фосфатов с использованием в качестве коагулянтов солей алюминия и железа, а также извести [3], [4], [8]. Суммарный процесс удаления отрицательно заряженных фосфат-ионов из очищаемых сточных вод происходит вследствие протекания реакций по уравнениям:



с образованием малорастворимых солей фосфатов алюминия или железа и гидроксиапатитов кальция.

Однако эти способы доочистки имеют ограниченное применение, что обусловлено расходом реагентов и образованием осадков высокой влажности, утилизация которых затруднена. Кроме того, дозировка коагулянта зависит как от остаточной концентрации фосфатов в биологически очищенных сточных водах, так и от их поступающего на доочистку расхода. Для учета нестабильной нагрузки на очистную станцию процесс доочистки биологически очищенных сточных вод методом удаления фосфора химическим осаждением коагулянтами требует отдельной системы непрерывного контроля колебания по эффективности

работы дозирующего блока. На очистных сооружениях небольшой производительности, что характерно для малочисленных населенных пунктов, применение коагулянтов ограничено их высокой стоимостью и малой доступностью, а также дополнительными капиталовложениями.

Из обзора литературных источников известно, что для упрощения и удешевления удаления фосфатов на стадии доочистки биологически очищенных коммунально-бытовых и производственных сточных вод все большее применение находят фильтрационно-сорбционные технологии с использованием в качестве загрузки в фильтрах различной конструкции доступных в регионе потребления сорбционных материалов природного и техногенного происхождения. Сорбционный метод позволяет удалять загрязнения, в том числе фосфаты, с высокой эффективностью, достигая низких остаточных концентраций. Выбор адсорбента определяется его доступностью в конкретном регионе, а также требованиями к получаемой в результате очистки воды и ее последующим целевым использованием. Для очистки сточных вод от фосфатов наибольшее распространение получили глинистые минералы, кремнеземы, кальций- и магнийсодержащие материалы [6], [10], образующие с фосфатами малорастворимые соединения. Большие возможности решить проблему доочистки сточных вод от фосфатов можно практически с минимальными затратами, используя материалы техногенного сырья, доступного в регионе производства и потребления адсорбента. Из обзора литературных источников известно, что высокой адсорбционной емкостью по отношению к фосфатам обладают шлаки сталеплавильных производств [9], а также топливные золошлаковые отходы [2], [12], [15], обладающие уникальными технологическими свойствами, позволяющими эффективно использовать их в процессе очистки сточных вод.

Целью настоящей работы являлось проведение сравнительного анализа адсорбционных свойств по отношению к фосфатам доступного для многих регионов техногенного материала – топливных зол, и взятого в качестве образца сравнения природного минерала шунгита, который используется в качестве фильтрующего материала в промышленном водоснабжении для обработки водопроводной воды.

Выбор топливных зол в качестве адсорбента для извлечения фосфатов из сточных вод обусловлен тем, что по гранулометрическому и химическому составу они сочетают свойства применяемых в качестве фильтрующих и адсорбционных природных минеральных материалов. Основа химического состава топливных зол – оксиды кремния, алюминия, кальция, магния, железа, натрия и калия в различном соотношении в зависимости от природы исходного топлива. В основной своей массе топливные золы представлены кремнеземсодержащими составляющими с повышенным содержанием соединений кальция и магния по сравнению с составом природных кремнеземов. Данные материалы ранее [13], [14] были апробированы в лабораторных условиях в качестве адсорбента ионов железа из водных растворов. Природный минерал шунгит характеризуется высокой адсорбционной емкостью по отношению ко многим неорганическим и органическим веществам, технологичностью, механической прочностью, малой истираемостью и обладает каталитической и бактерицидной активностью. Эти качества позволяют использовать шунгит в качестве эффективного материала адсорбционного фильтра в водоподготовке и водоочистке, а также для очистки сточных вод. Его адсорбционные свойства изучены в работах [7], [11], [16] и других исследователей.

#### **Экспериментальная часть**

В работе в качестве адсорбента были использованы образцы природного минерала шунгита месторождения Зажогоино (Карелия) и образцы топливных зол - образцы золы каменноугольной (алюмосиликатных зольных микросфер золы уноса), образующейся при высокотемпературном сжигании каменных углей и считающейся отходом тепловых электростанций, и образцы циклонной золы котельной, работающей на древесном топливе.

Подготовка к эксперименту взятых в качестве адсорбента образцов топливных зол и природного минерала шунгита после его измельчения включала рассев с использованием стандартного набора сит по классам крупности ситовым методом. Для исследования использовали фракции с размером зерен 0,25-0,5 мм.

Подготовленные порошки материалов одинакового класса крупности были исследованы по величине площади удельной поверхности по стандартной методике методом адсорбции

метиленового голубого. Площадь удельной поверхности порошков  $S_{уд}$ , м<sup>2</sup>/г, определена по формуле

$$S_{уд} = \frac{V \cdot C \cdot N \cdot A_m}{m \cdot M},$$

где  $V$  – объем раствора метиленового голубого, израсходованный на титрование, см<sup>3</sup>;  $C$  – концентрация раствора метиленового голубого, мг/см<sup>3</sup>;  $N$  – постоянная Авогадро;  $A_m$  – посадочная площадь, занимаемая одной молекулой адсорбированного метиленового голубого, м<sup>2</sup>;  $m$  – масса навески материала, г;  $M$  – молярная масса метиленового голубого, г/моль.

В водных суспензиях материалов, приготовленных на дистиллированной воде при соотношении твердой (Т) и жидкой (Ж) фаз 1:100, измеряли величину рН. Измерение рН суспензии проводили с использованием иономера И-130М.

Изучение адсорбционных свойств материалов по отношению к фосфат-ионам проводили в статическом режиме при температуре 25 °С в заданном интервале концентраций модельных растворов, имитирующих биологически очищенные сточные воды. Модельные растворы готовили по навеске дигидроортофосфата калия  $KH_2PO_4$  с повышенными относительно реальных биологически очищенных сточных вод концентрациями примеси методом разбавления дистиллированной водой. Процесс адсорбции проводили путем смешивания адсорбента с исследуемым водным раствором при соотношении Т:Ж фаз 1:100, выдерживая в течение заданного времени, отделения раствора фильтрованием через бумажный фильтр «синяя лента». Концентрацию фосфат-ионов до и после адсорбции устанавливали с использованием фотометрического метода анализа на фотоколориметре КФК-2МП по стандартной методике. Оптическую плотность растворов измеряли относительно раствора сравнения, не содержащего фосфатов, при длине волны  $\lambda = 670$  нм с использованием кюветы с толщиной поглощающего свет слоя 50 мм. Эффективность извлечения фосфат-ионов из раствора в каждом конкретном опыте оценивали путем сравнения значения исходной концентрации определяемого иона в растворе с его остаточной концентрацией после контакта раствора с адсорбентом по результатам трех измерений.

По разности концентраций начальной и остаточной в данный момент времени  $t$  рассчитывали степень извлечения фосфат-ионов из раствора  $\alpha$ , %, по формуле

$$\alpha = \frac{(C_0 - C_t)}{C_0} \cdot 100,$$

где  $C_0$  – начальная концентрации фосфат-ионов в растворе, мг/дм<sup>3</sup>;  $C_t$  – остаточная в данный момент времени  $t$  концентрация фосфат-ионов в растворе, мг/дм<sup>3</sup>.

В условиях установившегося равновесия в системе рассчитывали равновесную адсорбционную емкость сорбента по формуле

$$A = \frac{(C_0 - C_{равн}) \cdot V}{m_{сорбента}},$$

где  $C_{равн}$  – равновесная (остаточная) концентрация фосфат-ионов в растворе, мг/дм<sup>3</sup>;  $V$  – объем исследуемого раствора, дм<sup>3</sup>;  $m_{сорбента}$  – масса навески адсорбента, г;  $A$  – адсорбционная емкость адсорбента, мг/г.

#### Результаты исследования и их обсуждение

Площадь удельной поверхности исследованных в эксперименте образцов топливных зол и природного минерала шунгита, вычисленная по величине объема раствора метиленового голубого, израсходованного на титрование суспензии порошков до появления окрашенного голубого ореола вокруг пятна капли суспензии на фильтре «синяя лента», составила для образцов золы каменноугольной 1,8 м<sup>2</sup>/г, золы древесной 3,84 м<sup>2</sup>/г, природного минерала шунгита 2,28 м<sup>2</sup>/г.

Измеренные значения величины рН исходных суспензий материалов, выдержанных в контакте с дистиллированной водой в течение 90 мин, при соотношении Т:Ж фаз 1:100 составили

для золы древесной 13,2-13,4 ед. рН, золы каменноугольной 7,1-7,3 ед. рН, природного минерала шунгита 3,6-3,9 ед. рН.

Степень извлечения фосфат-ионов из раствора  $\alpha$ , %, и изучение равновесия адсорбции проводили в интервале концентраций определяемого иона 1,0-25,0 мг/дм<sup>3</sup>. Из кинетического эксперимента определено, что более высокая скорость адсорбции фосфат-ионов наблюдается в интервале первых минут контакта раствора с золой топлива, как древесного, так и каменноугольного, и в течение 90 мин достаточна для установления равновесия в системе. Дальнейшее увеличение продолжительности контакта раствора с золой топлива не приводит к существенному изменению концентрации определяемых ионов в растворе. Значимого изменения концентрации фосфат-ионов в таком интервале продолжительности контакта раствора с зернами природного минерала шунгита не наблюдалось. Продолжительность адсорбции, необходимую для установления адсорбционного равновесия между извлекаемыми фосфат-ионами и зернами природного минерала шунгита, выдерживали в течение 24 ч.

В условиях установившегося равновесия в системе в исследованном интервале концентраций определяемого иона остаточное содержание фосфат-ионов в очищаемом растворе в зависимости от исходной концентрации в анализируемом диапазоне и вида адсорбента показано на Рисунке 1.

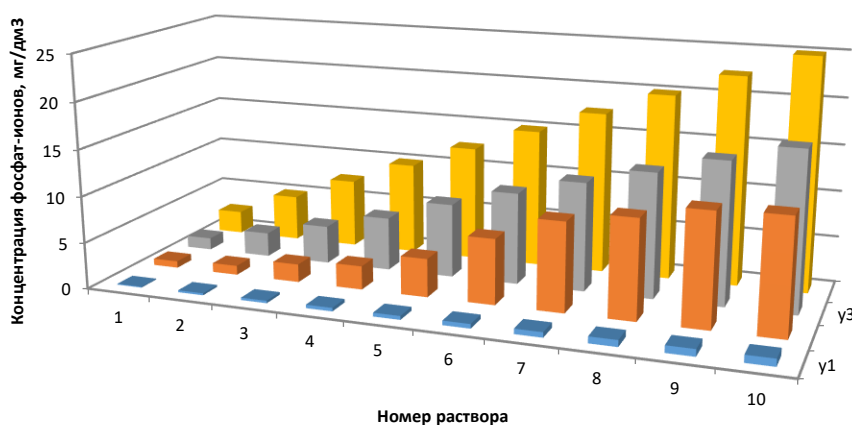


Рисунок 1. Остаточное содержание фосфат-ионов в очищаемых растворах в зависимости от исходной концентрации  $\alpha$  и вида адсорбента:

■  $y_1$  – зола древесная; ■  $y_2$  – природный минерал шунгит; ■  $y_3$  – зола каменноугольная

Для исследованных образцов материалов содержание фосфат-ионов в растворе в рассматриваемом диапазоне исходных концентраций в результате адсорбции золой древесной снижается в 28,25-31,25 раз, тогда как для золы каменноугольной этот показатель определялся в пределах 1,46-1,92 раз. В опытах с природным минералом шунгитом снижение концентрации фосфат-ионов в исследованном диапазоне исходных концентраций определяется значениями в пределах до 2,03-3,93 раз.

Степень извлечения фосфат-ионов из растворов при использовании золы древесной составила 95,7-96,8 %, золы каменноугольной достигала от 31,6% до 48 %, для природного минерала шунгита определялась в пределах от 50,7% до 74,5% (рисунок 2).

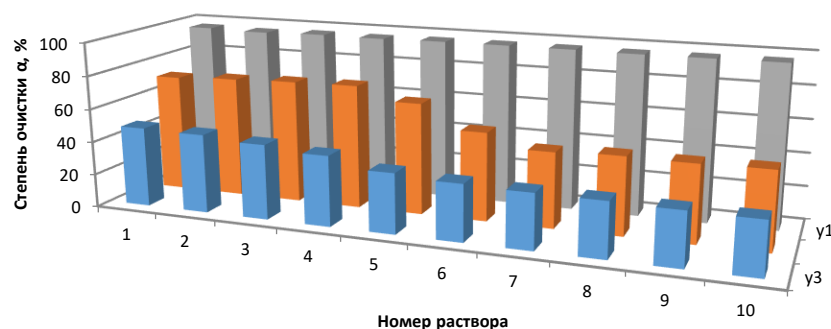


Рисунок 2. Изменение степени извлечения фосфат-ионов в зависимости от вида адсорбента, исходной концентрации и продолжительности адсорбции:

■  $y_1$  – зола древесная, 1,5 ч; ■  $y_2$  – природный шунгит, 24 ч; ■  $y_3$  – зола каменноугольная, 1,5 ч

По этим показателям, имеющим практическое значение для оценки эффективности извлечения примеси из очищаемого раствора, можно сделать вывод, что зола древесная обладает значительно более высокой адсорбционной способностью по отношению к фосфат-ионам по сравнению с природным минералом шунгитом и золой каменноугольной.

Параметры изотерм рассчитывали в рамках известных моделей Ленгмюра и Фрейндлиха, представленных в линейной форме уравнениями:

$$\frac{C_{равн}}{A} = \frac{1}{A_{max}} \frac{1}{k} + \frac{1}{A_{max}} C_{равн},$$

$$\lg A = \lg K + \frac{1}{n} \lg C_{равн},$$

где  $A_{max}$  – предельная адсорбционная емкость, мг/г;  $k$  – константа адсорбционного равновесия;  $K$  – величина адсорбции при равновесной концентрации адсорбтива, равной 1 моль/дм<sup>3</sup>;  $1/n$  – показатель степени приближения изотермы к прямой.

Изотермы сорбции фосфат-ионов из водного раствора, линейаризованные в координатах уравнения Ленгмюра и логарифмической формы уравнения Фрейндлиха характеризуются высоким коэффициентом корреляции  $R^2$  (таблица 1), что дает возможность описания процесса адсорбции фосфат-ионов с использованием этих видов математической обработки применительно к образцам исследованных адсорбентов.

Таблица 1.

**Параметры изотерм адсорбции фосфат-ионов, рассчитанные в рамках моделей Ленгмюра и Фрейндлиха**

Наименование образца	Модель Ленгмюра			Модель Фрейндлиха		
	$A_{max}$ , мг/г	$k$	$R^2$	$1/n$	$K$	$R^2$
зола древесная	2,649	14,925	0,9878	0,938	2,970	0,9873
зола каменноугольная	0,104	11,905	0,9947	0,667	0,115	0,9802
шунгит природный	1,276	0,333	0,8905	0,480	0,339	0,8084

Сравнительный анализ полученных в условиях эксперимента значений адсорбционных характеристик топливных зол и природного минерала шунгита по отношению к фосфатам позволяет сделать вывод о том, что зола древесная является более эффективным адсорбентом. Адсорбционная емкость исследованных образцов золы древесной, средние значения достигаемой степени извлечения фосфат-ионов из водных растворов при одновременном обеспечении их нормативного сброса не уступают аналогичным показателям для природного минерала шунгита, а также известных технологий [4], [5], [9], рекомендованных для глубокой

очистки сточных вод от фосфатов. Полученные данные позволяют сделать вывод о возможности использования золы древесной на очистных станциях для доочистки как промышленных, так и коммунальных биологически очищенных сточных вод. Низкая стоимость золы делает рентабельным ее использование для очистки от фосфатов в широком интервале концентраций, в том числе малоконцентрированных поверхностных сточных вод. Отработанный адсорбционный материал представляется возможным утилизировать путем использования в качестве насыщенного фосфатами компонента почвогрунтов в зеленом хозяйстве и других технических целей.

#### БИБЛИОГРАФИЯ

1. Анисимов Д.В. Удаление фосфора из сточных вод // Экология производства. 2012. №5. С. 84-87.
2. Варданян М.А. Изучение возможностей использования золошлаковых отходов в процессе очистки сточных вод // Вестник гражданских инженеров. 2006. № 4. С. 65-67.
3. Веляев Ю.О., Майоров Д.В., Матвеев В.А. Исследования эффективности применения алюмосиликатного коагулянта на основе нефелина // Водоснабжение и санитарная техника. 2013. № 3. Ч.1. С. 32-37.
4. Гетманцев С.В., Нечаев И.А., Гандурина Л.В. Очистка производственных сточных вод коагулянтами и флокулянтами. М.: Изд-во АСВ, 2008. 272 с.
5. Крючихин Е.М., Николаев А.Н., Жильникова Н.А. Очистка сточных вод от биогенных элементов // Водоочистка. 2008. №5. С. 42-43.
6. Мильвит Н.В., Шашкова И.Л., Ратько А.И., Вечер В.А. Сорбционные свойства карбонатсодержащих трепелов // Журнал прикладной химии. 2007. Т. 80. № 11. С. 1819 –1825.
7. Мосин О.В. Новый природный минерал шунгит в водоподготовке // Сантехника. 2012. №3. С. 26–36.
8. Пат. РФ 2496722 (опубл.2013). Способ очистки сточной воды от фосфатов.
9. Сапон Е.Г., Марцуль В.Н. Использование сталеплавильного шлака в качестве сорбционного материала для очистки сточных вод от фосфатов // Природные ресурсы. 2015. № 1. С. 117–123.
10. Свиридов А.В., Ганебных Е.В., Елизаров В.А. Алюмосиликатные сорбенты в технологиях очистки воды // Экология и промышленность России. 2009. № 11. С. 28–30.
11. Скоробогатов Г.А., Гончаров Г.Н., Ашмарова Ю.А. Ионнообменные и адсорбционные свойства Карельских шунгитов, контактирующих с водой // Экологическая химия. 2012. № 21(1). С. 10–16.
12. Федорова Н.В., Шафорост Д.А., Кривобок Е.А. О возможности использования золошлаковых отходов угольных электростанций Ростовской области в качестве углеродсодержащих сорбентов // Экология промышленного производства. 2016. № 1. С. 20-24.
13. Фоменко А.И. Характеристика микросфер золы уноса для их использования в качестве сорбента / Сорбционные и хроматографические процессы. 2019. Т. 19. № 6. С. 696-702. DOI: 10.17308/sorpchrom.2019.19/2231.
14. Фоменко А.И. Адсорбция катионов железа из водных растворов минеральными сорбентами // Вода: химия и экология, 2023. № 10. С. 22-26. DOI: 10.58551/20728158-2023-7-10-2212.
15. Шишелова Т.И., Самусева М.Н., Шеньман Б.М. Использование ЗШО в качестве сорбента для очистки сточных вод // Современные наукоемкие технологии. – 2008. – №5. – С. 20-22.
16. Efremova S.V. Water Treatment with a Shungite Sorbent and Biosorbents on Its Base // Russian Journal of Applied Chemistry. 2006. V. 79. N. 3. P. 397 – 402.

\*\*\*\*\*

## ADSORPTION TREATMENT OF WASTEWATER FROM PHOSPHATES

Fomenko A.I.

The results of a study of the adsorption purification of aqueous solutions from phosphates using fuel ash formed during the combustion of solid fuels (waste from wood processing, coal) and the natural mineral shungite from the Zazhoginsky deposit as an adsorbent are presented. The degree of extraction of phosphate ions from aqueous solutions on the presented adsorbents, the specific surface area, and the adsorption capacity were experimentally determined. The dependence of the degree of phosphate ion extraction on the duration of contact of the solution with adsorbents and the salt concentration in the initial solution is investigated. It has been established that the studied adsorbents have adsorption properties with respect to phosphates. A comparative assessment of the effectiveness of the studied adsorbents for the extraction of phosphate ions from aqueous solutions is given. It has been shown that in relation to phosphate ions, wood ash is a more effective adsorbent compared with natural shungite and coal ash.

**Keywords:** adsorption, fuel ash, natural mineral shungite, phosphate ions, adsorption activity, specific surface area.

---

## Сведения об авторах:

**Фоменко Александра Ивановна**

Доктор технических наук, профессор,  
Вологодский государственный университет,  
г. Вологда

E-mail: [fomenko1212@inbox.ru](mailto:fomenko1212@inbox.ru)



# ПРОЧИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ХИМИЧЕСКИХ НАУК

---

УДК 662.88:662.65.001.57.

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КАТАЛИТИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ПРОЦЕССЫ КОНВЕРСИИ ПРИ СЖИГАНИИ ГАЗООБРАЗНОГО ТОПЛИВА

Зайтов Руслан Ильдарович

*Данная статья освещает значимость каталитических систем в процессах конверсии при сжигании газообразного топлива и их влияние на экологическую эффективность и экономическую выгоду. Обсуждаются основные преимущества применения каталитических систем, такие как повышение эффективности сгорания, снижение выбросов вредных веществ, уменьшение потребления топлива и повышение надежности оборудования. Подчеркивается важность дальнейшего развития и внедрения инновационных каталитических технологий для достижения более экологически чистой и устойчивой энергетической системы.*

**Ключевые слова:** конверсия, сжигание газообразного топлива, выбросы, эффективность, экология, экономия, технологии, инновации.

**Введение.** В современном мире, характеризующемся постоянным ростом энергопотребления и все более нарастающей проблемой экологического загрязнения, поиск эффективных и экологически чистых методов производства энергии становится все более актуальным. В этом контексте использование каталитических систем в процессе сжигания газообразного топлива привлекает все большее внимание исследователей, инженеров и промышленных предприятий.

Каталитические системы представляют собой совокупность катализаторов и реакционных сред, способных ускорять химические реакции без изменения самих катализаторов. Применение таких систем в процессе сжигания газообразного топлива обещает улучшение процесса конверсии, снижение выбросов загрязняющих веществ и повышение энергетической эффективности [2, с. 78].

В данной статье будет рассмотрена оценка влияния каталитических систем на процессы конверсии при сжигании газообразного топлива. Будет освещен комплексный подход к оценке эффективности каталитических систем, а также рассмотрены их преимущества и ограничения. Результаты такой оценки имеют важное значение как для оптимизации процессов производства энергии, так и для сокращения негативного воздействия на окружающую среду.

Основные принципы сжигания газообразного топлива:

1. **Идеальное горение:** Важным аспектом при сжигании газообразного топлива является достижение стехиометрического соотношения между топливом и кислородом в смеси. Это соотношение обеспечивает оптимальное условие для полного сгорания топлива, когда весь кислород из воздуха реагирует с топливом, исключая неполное сгорание или избыток кислорода. Идеальное горение при стехиометрическом соотношении обеспечивает максимальную выработку энергии и минимизирует образование вредных выбросов, таких как углеродные оксиды и углеводороды. Контроль стехиометрического соотношения является ключевым для эффективного использования газообразного топлива и соблюдения экологических стандартов.

2. **Сжигание и адиабатическая температура:** При сжигании газообразного топлива происходит выделение тепла, что приводит к повышению температуры смеси газа и воздуха. Адиабатическая температура - это температура, которая достигается в результате сжигания топлива без теплообмена с окружающей средой. Концепция адиабатической температуры важна при оценке процесса сжигания газообразного топлива, поскольку она определяет

максимально возможную температуру, достигаемую в процессе сгорания без учета теплообмена с окружающей средой. Это понятие помогает инженерам и дизайнерам камер сгорания оптимизировать параметры процесса, такие как расход топлива, распределение воздуха и конструктивные особенности, для обеспечения максимальной эффективности и безопасности.

Кроме того, контроль адиабатической температуры позволяет предотвратить нежелательное явление, такое как образование термических окислов и накопление высоких концентраций оксидов азота (NOx), что является вредным для окружающей среды и здоровья человека. Таким образом, понимание и управление адиабатической температурой является ключевым аспектом в разработке и эксплуатации систем сжигания газообразного топлива с минимальными негативными экологическими последствиями [1, с. 24].

**3. Температурные зоны сгорания:** Внутри камеры сгорания газообразного топлива обычно можно выделить несколько температурных зон:

- *Зона зажигания:* Это область, где происходит инициирование горения топлива. В этой зоне температура достаточно высока для запуска процесса сгорания. От качественного зажигания зависит эффективность всего процесса сжигания.
- *Зона горения:* После инициирования горения в зоне зажигания оно распространяется на всю камеру сгорания, обеспечивая непрерывное выделение тепла. В этой зоне температура достаточно высока для полного окисления топлива и образования продуктов сгорания.
- *Зона выхода продуктов сгорания:* Это последняя область в камере сгорания, где происходит охлаждение выхлопных газов и вывод продуктов сгорания из системы. В этой зоне температура снижается благодаря теплообмену с окружающей средой и специальными системами охлаждения.

Контроль температурных зон важен для эффективного управления процессом сжигания, чтобы минимизировать неполное сгорание, предотвратить образование нежелательных соединений, таких как оксиды азота и углеродные отложения, а также обеспечить безопасность и долговечность оборудования.

**4. Скорость сжигания:** Скорость сжигания газообразного топлива определяется рядом факторов, таких как концентрация кислорода в смеси, температура, давление, скорость потока топлива и характеристики камеры сгорания. Оптимальная скорость сжигания обеспечивает полное сгорание топлива и минимизацию образования вредных продуктов сгорания. Это особенно важно для установок, работающих на газообразном топливе, таких как энергетические установки, где эффективность сгорания напрямую влияет на общую производительность и экологическую безопасность системы. Контроль скорости сжигания может осуществляться различными методами, включая регулирование подачи топлива, регулирование потока кислорода и использование каталитических систем, которые способствуют более эффективному протеканию процессов конверсии.

**5. Контроль неполного сгорания:** Образование оксидов азота является серьезной проблемой при сжигании газообразного топлива. NOx являются главными загрязнителями атмосферы, способными вызывать кислотные дожди, формировать озон в нижней атмосфере и наносить вред здоровью человека. Поэтому контроль и снижение уровня NOx в выбросах является важной задачей при разработке систем сжигания газа.

Эффективные методы снижения образования NOx включают в себя использование каталитических систем, таких как системы селективной каталитической редукации (SCR) и системы низкотемпературного окисления (LTO), а также оптимизацию процесса сжигания и применение технологий рециркуляции отработанных газов [6, с. 184].

Применение каталитических систем в процессе сжигания газообразного топлива может значительно повысить эффективность сжигания, снизить выбросы вредных веществ и улучшить общую экологическую стойкость системы. Каталитические системы могут способствовать более полному сгоранию топлива и улучшению качества выхлопных газов.

Спектроскопия - это метод анализа, основанный на измерении взаимодействия света с веществом. Она позволяет изучать структуру и свойства вещества на основе электромагнитного спектра, который они поглощают или испускают. В контексте оценки влияния каталитических систем на процессы конверсии при сжигании газообразного топлива, спектроскопия является

мощным инструментом для анализа химических составов катализаторов, промежуточных и конечных продуктов реакций, а также механизмов, лежащих в их основе.

Например, Инфракрасная спектроскопия. Инфракрасная спектроскопия (IR) основана на изучении взаимодействия молекул с инфракрасным излучением. Принцип её работы заключается в измерении поглощения инфракрасного излучения веществом. Оно происходит за счёт изменения дипольного момента молекулы при переходе между колебательными и вращательными уровнями энергии.

Формально, интенсивность инфракрасного поглощения, которое обычно представлено в виде спектра, может быть выражено через преобразование Фурье от автокорреляционной функции колебаний дипольного момента молекулы. Формула для этого преобразования выглядит следующим образом:

$$\delta = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\omega t} R(t) dt$$

где:

- $\delta$  - спектральная плотность энергии
- $\omega$  - частота
- $R(t)$  - автокорреляционная функция колебаний дипольного момента

После анализа спектра инфракрасного поглощения и сопоставления с данными базы спектров, можно сделать выводы о химической природе вещества, его структуре и молекулярной конфигурации.

Инфракрасная спектроскопия позволяет идентифицировать функциональные группы в органических соединениях и изучать характер межмолекулярных взаимодействий. Таким образом, она является мощным инструментом анализа для определения состава катализаторов, промежуточных и конечных продуктов реакций при конверсии газообразного топлива.

Далее идет рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия.

Принцип работы рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (XPS) основан на явлении фотоэлектрического эффекта, при котором электроны выходят из материала под воздействием рентгеновского излучения определенной энергии. Процесс рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (XPS) можно описать с помощью нескольких основных математических формул. Вот некоторые из них:

#### 1. Энергия фотоэлектронов (E):

• Энергия фотоэлектронов определяется разностью между энергией фотона рентгеновского излучения ( $h\nu$ ) и энергией связи электрона ( $E_b$ ), которая может быть выражена следующей формулой:

#### 2. Глубина анализа (d):

• Глубина анализа определяется длиной пробега фотоэлектронов в материале и может быть оценена с использованием формулы пробега (R):

#### 3. Формула пробега (R):

• Формула пробега описывает, как расстояние, пройденное фотоэлектроном в материале, зависит от его энергии и свойств материала. Она может быть представлена различными моделями, например, моделью Кноффа:

Где:

- R - пробег фотоэлектрона,
- E - энергия фотоэлектрона,
- a, b - константы, зависящие от свойств материала.

Таким образом, рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия предоставляет информацию о химическом составе, структуре и электронной конфигурации поверхностных слоев материала, что позволяет проводить анализ поверхностных свойств катализаторов и оценивать их влияние на процессы конверсии газообразного топлива [7, с. 88].

Использование математических моделей в оценке влияния каталитических систем на процессы конверсии при сжигании газообразного топлива играет ключевую роль в предсказании результатов, оптимизации процессов и понимании механизмов реакций. Вот несколько подходов к математическому моделированию в этом контексте:

1. **Кинетическое моделирование:** Этот метод основан на разработке кинетических моделей, которые описывают скорость химических реакций в системе. Кинетические модели включают в себя механизмы реакций и степени их активации, что позволяет предсказывать скорости образования продуктов и распределение компонентов в реакционной смеси. Для оценки каталитических систем кинетические модели учитывают активность и селективность катализатора, а также его влияние на протекание реакций. Общее уравнение скорости химической реакции может быть представлено в форме:

$$v = k \cdot [A]^m \cdot [B]^n$$

где:

- $v$  - скорость реакции,
- $k$  - константа скорости,
- $[A]$  и  $[B]$  - концентрации реагентов,
- $m$  и  $n$  - порядки реакции по соответствующим реагентам.

2. **Компьютерное моделирование:** С использованием компьютерных программ и специализированных программных средств можно создавать детальные численные модели процессов конверсии газообразного топлива. Эти модели учитывают массо-тепловые переносы, химические реакции, а также гидродинамические и термодинамические параметры системы. Компьютерное моделирование позволяет анализировать влияние различных факторов, таких как температура, давление, скорость потока и характеристики каталитических систем.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0$$

Где:

- $\rho$  - плотность газовой смеси,
- $t$  - время,
- $\mathbf{u}$  - вектор скорости,
- $\nabla \cdot \nabla$  - дивергенция.

Уравнение сохранения импульса:

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \rho \mathbf{g}$$

Где:

- $p$  - давление,
- $\boldsymbol{\tau}$  - тензор напряжений,
- $\mathbf{g}$  - ускорение свободного падения.

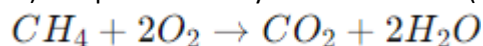
Уравнение переноса массы компонентов:

$$\frac{\partial(\rho Y_k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho Y_k \mathbf{u}) = \nabla \cdot (\rho D_k \nabla Y_k) + R_k$$

Где:

- $Y_k$  - молярная доля компонента  $k$ ,
- $D_k$  - коэффициент диффузии,
- $R_k$  - скорость реакции.

3. **Оптимизация процессов:** Математические модели могут быть использованы для оптимизации параметров процесса сжигания газообразного топлива с учетом каталитических систем. Это позволяет оптимизировать конструкцию реакционной системы, выбирать оптимальные условия работы катализатора и максимизировать выходы продуктов с учетом требований качества и эффективности. Рассмотрим простейшую химическую реакцию сгорания метана ( $\text{CH}_4$ ) на кислороде ( $\text{O}_2$ ) с образованием углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ) и воды ( $\text{H}_2\text{O}$ ):



Для описания скорости этой реакции можно использовать закон скорости, например, модель Аррениуса:

$$r = k \cdot [CH_4]^\alpha \cdot [O_2]^\beta$$

**4. Предсказание экспериментальных данных:** Математические модели могут быть использованы для предсказания результатов экспериментов и испытаний с каталитическими системами, что позволяет сократить время и затраты на проведение реальных испытаний. Это особенно полезно при проектировании новых катализаторов или оптимизации существующих [5, с. 29].

$$\frac{dC_i}{dt} = \sum_j \nu_{ij} r_j$$

где  $C_i$  - концентрация  $i$ -го компонента реакции,  $\nu_{ij}$  - стехиометрический коэффициент реакции  $i$ -го компонента в  $j$ -й реакции,  $r_j$  - скорость  $j$ -й реакции.

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + \nabla \cdot (C_i \mathbf{u}) = R_i$$

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p (\mathbf{u} \cdot \nabla) T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q$$

Использование математических моделей в оценке влияния каталитических систем на процессы конверсии при сжигании газообразного топлива помогает не только понять физико-химические механизмы реакций, но и создать инструменты для прогнозирования и управления этими процессами в промышленных и экспериментальных условиях.

Экспериментальные исследования играют ключевую роль в оценке влияния каталитических систем на процессы конверсии при сжигании газообразного топлива. Эти исследования проводятся на различных уровнях, начиная от лабораторных испытаний до пилотных исследований на промышленных установках. Вот подробное описание каждого этапа:

#### 1. Лабораторные испытания:

- **Подготовка образцов:** В лабораторных условиях готовятся каталитические системы и газообразное топливо, которые будут использоваться в эксперименте. Образцы катализаторов могут быть синтезированы или использованы коммерчески доступные. Если необходимо изготовить катализаторы, их синтез может включать различные методы, такие как осаждение, импрегнация, сол-гель процессы и др. Это может включать смешивание и обработку химических компонентов с последующей термической обработкой для получения требуемой структуры катализатора.

Газообразное топливо, которое будет использоваться в реакциях, должно быть чистым и хорошо определенным. Это может потребовать его синтеза или закупки на рынке. Важно обеспечить стабильность состава газа для повторяемости экспериментов [10, с. 92].

Перед использованием катализаторов в реакциях они обычно проходят характеризацию для оценки их физико-химических свойств. Это может включать измерение поверхностной площади, пористости, химического состава, кристаллической структуры и т.д.

- **Модельные реакции:** Для оценки эффективности каталитических систем выбираются модельные реакции, которые отражают типичные процессы конверсии газообразного топлива. Например, окисление углеводородов или восстановление оксидов азота.

**Окисление углеводородов:** Это одна из основных реакций, которая происходит при сжигании газообразных углеводородных топлив. Модельные реакции могут включать окисление метана ( $CH_4$ ) или других углеводородов, таких как пропан ( $C_3H_8$ ) или бутан ( $C_4H_{10}$ ), с использованием кислорода из воздуха.

**Восстановление оксидов азота ( $NO_x$ ):** В процессе сжигания газообразного топлива, особенно при высоких температурах, оксиды азота ( $NO_x$ ) могут образовываться в результате реакции азота в воздухе с кислородом. Модельные реакции включают восстановление  $NO_x$  до менее вредных соединений, таких как азот ( $N_2$ ) или аммиак ( $NH_3$ ), с использованием водорода ( $H_2$ ) или других соединений.

**Окисление оксида углерода ( $CO$ ):** Реакция окисления  $CO$  до  $CO_2$  является важным этапом при сжигании газообразных топлив. Модельные реакции этого процесса могут использоваться для оценки эффективности катализаторов, ускоряющих эту реакцию.

*Процессы деструкции и синтеза:* Кроме того, модельные реакции могут включать в себя процессы деструкции или синтеза более сложных углеводородных соединений, которые могут образовываться в процессе сжигания топлива или в результате побочных реакций.

Эти модельные реакции представляют собой упрощенную версию реальных процессов, которые могут происходить при сжигании газообразного топлива, и используются для оценки эффективности каталитических систем в управлении этими процессами [4, с. 170].

- **Измерение параметров:** В процессе реакции проводятся измерения различных параметров, таких как температура, давление, состав газовой фазы и т.д. Эти данные помогают оценить скорость реакции и выбор продуктов.

## 2. Пилотные исследования:

- **Масштабирование:** На этом этапе эксперименты проводятся на пилотных установках или масштабируемых моделях промышленных установок. Это позволяет оценить поведение каталитических систем в условиях, более близких к реальным.

- **Учет условий эксплуатации:** При пилотных исследованиях учитываются различные факторы, такие как температура, давление, скорость потока газа и концентрация катализатора. Это позволяет получить более точные данные о реакции.

- **Оценка стабильности и долговечности:** Проводятся длительные тесты, чтобы оценить стабильность и долговечность каталитических систем в реальных условиях эксплуатации. Это важно для определения потенциальной эффективности каталитических систем в промышленности.

Экспериментальные исследования позволяют получить конкретные данные о влиянии каталитических систем на процессы конверсии при сжигании газообразного топлива и являются основой для разработки эффективных каталитических технологий.

**Заключение.** В заключении следует подчеркнуть важность каталитических систем в сжигании газообразного топлива и их положительное влияние на окружающую среду, энергетическую эффективность и устойчивость процессов конверсии. Каталитические системы представляют собой ключевой элемент в современных технологиях, направленных на снижение выбросов вредных веществ и оптимизацию процессов энергопроизводства.

Благодаря применению каталитических систем достигается более чистая и эффективная конверсия газообразного топлива, что способствует сокращению негативного воздействия на окружающую среду и улучшению качества воздуха. Кроме того, улучшение энергетической эффективности и снижение потребления топлива способствуют экономии ресурсов и снижению операционных затрат для предприятий и потребителей.

Важно продолжать исследования и разработки в области каталитических технологий с целью улучшения их эффективности, снижения стоимости и расширения области их применения. Это позволит обеспечить более стабильное и экологически чистое энергетическое будущее для нашего общества.

## БИБЛИОГРАФИЯ

1. Базаров, В. Г., Кудрявцев, В. В. (2015). Использование катализаторов в системах очистки отработавших газов. Вестник Томского государственного университета. Химия, (3), 9-16.

2. Воробьев, В. И., Колокольцев, В. Н. (2018). Каталитическое сжигание газообразных топлив. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия: Естественные науки, (1), 59-73.

3. Гущин, А. Е., Малиновский, Г. М., Лыков, А. В. (2016). Оценка влияния каталитического сжигания природного газа на состав выхлопных газов. Журнал инженерных наук, 14(1), 36-40.

4. Дорошенко, А. Ю., Шихман, Н. Б. (2017). Разработка каталитических систем для очистки выбросов сжигания природного газа. Химическая промышленность сегодня, (7), 24-29.

5. Карпов, В. Г., Павлова, Е. В. (2019). Каталитические системы для снижения выбросов токсичных веществ при сжигании газообразного топлива. Экологическая безопасность и рациональное использование природных ресурсов, (1), 32-40.

6. Кузьменко, Е. П., Пугачев, В. М. (2018). Каталитическое сжигание природного газа: особенности технологии и перспективы применения. Нефть и газ: энергетика, экономика, экология, (4), 76-82.

7. Морозов, А. Н., Зимовец, Е. Н. (2017). Каталитическое сжигание газообразных топлив в системах очистки отработавших газов. Химия и технология топлив и масел, (5), 32-38.

8. Попов, А. Г., Старцева, О. В. (2016). Каталитические системы для снижения выбросов при сжигании газообразного топлива: состояние и перспективы развития. Экология и промышленность России, (5), 36-42.

9. Смирнов, В. В., Миронов, А. П. (2018). Роль каталитических систем в сокращении выбросов при сжигании газообразного топлива на предприятиях химической промышленности. Химическая технология, (3), 44-50.

10. Тарасов, А. А., Шатров, А. А. (2017). Каталитические системы в очистке отработавших газов сжигания газообразного топлива. Научные труды Международной научно-практической конференции "Экологическая безопасность и рациональное природопользование", (2), 110-116.

\*\*\*\*\*

#### ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF CATALYTIC SYSTEMS ON CONVERSION PROCESSES WHEN COMBUSTION OF GASEOUS FUEL

**Zaitov R.I.**

This article discusses the significance of catalytic systems in conversion processes during the combustion of gaseous fuels and their impact on ecological efficiency and economic benefits. The main advantages of applying catalytic systems are discussed, such as increased combustion efficiency, reduced emissions of harmful substances, decreased fuel consumption, and enhanced equipment reliability. The importance of further development and implementation of innovative catalytic technologies to achieve a cleaner and more sustainable energy system is emphasized.

**Keywords:** conversion, combustion of gaseous fuels, emissions, efficiency, ecology, economy, technology, innovation.

---

#### Сведения об авторах:

**Зайтов Руслан Ильдарович,**

ФГБОУ ВО "Казанский Государственный энергетический университет"

Кафедра: "Энергообеспечение предприятий, строительство зданий и сооружений"

Аспирант,

г.Казань

E-mail: [zaitov\\_ruslan@rambler.ru](mailto:zaitov_ruslan@rambler.ru)



## ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Статья, направляемая в журнал «ВОДА: ХИМИЯ И ЭКОЛОГИЯ», предоставляется в электронном виде в текстовом редакторе Microsoft Word по e-mail: [VAK-info@yandex.ru](mailto:VAK-info@yandex.ru)

Файл с текстом статьи должен иметь расширение \*.doc или \*.docx. Разметка страницы: поля со всех сторон 2 см, ориентация книжная, формат А4. Текст набирается шрифтом Times New Roman, размер (кегель) 14, абзацный отступ 1,25 см, межстрочный интервал полуторный с использованием автоматической расстановки переносов. Аннотация (от 100 до 150 слов); ключевые слова на русском языке (5–8 слов). Название статьи, аннотация, ключевые слова, сведения об авторах должны быть переведены на английский язык.

Исключить громоздкие цифровые и формульные таблицы, а также рисунки, более, чем на 0,5 страницы. Все таблицы и рисунки должны быть в тексте, подписаны, ссылки на них по тексту обязательны.

Список использованной литературы составляется по алфавиту в конце статьи в соответствии с ГОСТ. Ссылки на литературу в тексте отмечаются арабскими цифрами в квадратных скобках.

В статье должны быть указаны следующие сведения о каждом авторе: фамилия, имя, отчество (полностью); место работы и должность; ученая степень; домашний адрес (если необходимо почтовый экземпляр); контактный телефон; адрес электронной почты. Название ВУЗов полностью, без сокращений.

### Таким образом, файл должен содержать:

- ✓ индекс УДК
- ✓ аннотацию – 100–150 слов
- ✓ ключевые слова (не более 5–8 на русском и английском языках)
- ✓ название
- ✓ основной текст статьи
- ✓ список литературы

Основной текст рукописи экспериментальной статьи рекомендуется излагать в следующей последовательности:

– **введение** с четким и кратким изложением состояния рассматриваемого вопроса и анализом литературных данных, постановкой цели и задач данного исследования;

– **экспериментальная часть** (применяемые аппаратура, материалы, химические реактивы и методика проведения эксперимента в кратком изложении);

– **результаты** проведенных исследований и их обсуждение;

Все статьи проверяются на ПЛАГИАТ. Процент авторского текста должен составлять не менее 75%. Цитирования не более 25%.

Все поступающие в редакцию материалы должны быть проверены на наличие заимствований из открытых источников (попросту – плагиат), проверка выполняется с помощью системы AntiPlagiat.ru.

### Контактные лица:

**Ответственный редактор:** Жанна Сергеевна, тел., +7951 528 22 82

E-mail: [VAK-info@yandex.ru](mailto:VAK-info@yandex.ru)

---

**Учредитель журнала:** Мельников Игорь Олегович, кандидат химических наук

**Издатель:** Общество с ограниченной ответственностью  
«Издательство "Манускрипт» (ОГРН 1226100004679)

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор),

Свидетельство серия серия ПИ № ФС 77 – 31640 10.04.2008,

**Адрес редакции:** 127473, Москва г., 3-й Самотечный пер., д. 23, кв. 48

Тел. +7 951 528 22 82 **E-mail:** [VAK-info@yandex.ru](mailto:VAK-info@yandex.ru)

Отпечатано в типографии ООО «Издательство «Манускрипт», ОГРН 1226100004679),

**Адрес типографии:** 344114, РОСТОВСКАЯ ОБЛАСТЬ, Г.О. ГОРОД РОСТОВ-НА-ДОНУ,  
Г. РОСТОВ-НА-ДОНУ, УЛ БОРЯНА, Д. 20, 24

Подписано в печать 15.03.2024. Выход в свет 20.03. 2024г.

Тираж 250 экз. Заказ № 14-11/ РС–24. Цена свободная

