



## Реагентная очистка бытовых сточных вод от ионов аммония в условиях арктической децентрализации поселений

А. М. Фугаева ✉, Е. И. Вялкова

Тюменский индустриальный университет, ул. Володарского, 38, Тюмень, 625000, Российская Федерация

✉ [nastyafugaeva@mail.ru](mailto:nastyafugaeva@mail.ru)

**Аннотация.** Децентрализованные арктические поселки повсеместно оборудуются современными системами водоснабжения, но при этом все чаще сталкиваются с проблемой сбора и очистки бытовых сточных вод. В исследовании рассматривались методы физико-химической обработки бытовых сточных вод, схожих по составу со стоками малых северных населенных пунктов, с целью замены этапа биологической очистки, малоэффективной в отношении органических веществ. В лабораторных условиях была проведена очистка образцов сточных вод нормальной (18–22 °С) и экстремальной (3–6 °С) температур по разным технологическим схемам. В результате авторами предложена наиболее эффективная технологическая схема очистки бытовых сточных вод удаленных арктических поселений, которая предусматривает следующие этапы: преаэрацию, отстаивание взвеси с коагуляцией и флокуляцией, химическое окисление и осаждение струвита, механическое и сорбционное фильтрование. Выяснилось, что данная технология мало зависит от температуры воды и пригодна для бытовых сточных вод с температурой от 3 до 22 °С. Использование данной схемы позволило на 96.5 % снизить концентрацию ионов аммония, на 98 % – взвешенных веществ, на 91 % – ХПК. Предложенная схема очистки бытовых сточных вод позволит упростить эксплуатацию станций в сложных арктических условиях, а также сделает возможной их работу в автоматическом режиме.

**Ключевые слова:** арктические поселения, бытовые сточные воды, ионы аммония, станция физико-химической очистки

**Для цитирования:** Фугаева А. М., Вялкова Е. И. Реагентная очистка бытовых сточных вод от ионов аммония в условиях арктической децентрализации поселений. *Архитектура, строительство, транспорт*. 2025;5(1):67–80. <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2025-1-67-80> EDN: QMMCR

## Reagent-based treatment of domestic wastewater for ammonium removal in decentralized Arctic settlements

Anastasiia M. Fugaeva ✉, Elena I. Vialkova

Industrial University of Tyumen, 38 Volodarskogo St., Tyumen, 625000, Russian Federation

✉ [nastyafugaeva@mail.ru](mailto:nastyafugaeva@mail.ru)

**Abstract.** Decentralized Arctic settlements are equipped with modern water supply systems, yet they increasingly face the challenge of collecting and treating domestic wastewater. The study examined physical and chemical methods for treating domestic wastewater, similar in composition to wastewater from small northern settlements, with the goal of replacing the often inefficient biological treatment step, especially for organic substances. Wastewater samples at normal (18–22 °C) and extreme (3–6 °C) temperatures were

treated in the laboratory using various technological schemes. As a result, the authors propose the most effective technological scheme for treating domestic wastewater in remote Arctic settlements, which includes the following stages: pre-aeration, sedimentation with coagulation and flocculation, chemical oxidation and struvite precipitation, and mechanical and sorption filtration. It was found that this technology is largely independent of water temperature and suitable for domestic wastewater with temperatures ranging from 3 to 22 °C. The implementation of this scheme reduced the concentration of ammonium ions by 96.5 %, suspended solids by 98 %, and chemical oxygen demand by 91 %. The proposed wastewater treatment scheme will simplify the operation of treatment plants in challenging Arctic conditions and enable their operation in automatic mode.

**Keywords:** Arctic settlements, domestic wastewater, ammonium ions, physical and chemical treatment station

**For citation:** Fugaeva A. M., Vialkova E. I. Reagent-based treatment of domestic wastewater for ammonium removal in decentralized Arctic settlements. *Architecture, Construction, Transport*. 2025;5(1):67–80. (In Russ.) <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2025-1-67-80>



## 1. Введение / Introduction

Арктическая зона России охватывает 9 регионов (четыре из них входят в состав РФ целиком) площадью 4.8 млн км<sup>2</sup> (28 % территории страны), где проживает 2.6 млн человек – больше половины населения мировой Арктики<sup>1</sup>. В последнее десятилетие Правительство РФ уделяет большое внимание сохранению и восстановлению окружающей среды арктической зоны, где происходят климатические изменения, а также ставит задачи не только по развитию данного региона, но и по устранению негативных последствий активной антропогенной нагрузки и повышению адаптации жизнедеятельности местной флоры и фауны. При этом отмечается низкий уровень доступности качественных социальных услуг и благоустроенного жилья в населенных пунктах, расположенных в отдаленных местностях. Развитие инфраструктуры небольших северных поселений входит в стратегическую программу освоения Российской Арктики<sup>2</sup>.

Благоустройство селитебных территорий сопряжено с прокладкой современных централизованных систем водоснабжения и водоотведения. Следовательно, встает вопрос об утилизации бытовых сточных вод, объем которых существенно возрастает при увеличении нормы водопотребления. Проблемы сбора, отведения, эффективной очистки и выпуска сточных вод в водные объекты рыбохозяйственного значения остаются актуальными для арктических территории как нашей страны, так и всего мира.

Для вновь проектируемых сетей бытовой канализации в небольших поселках характерны наземный или надземный способы прокладки труб, а также большое количество промежуточных насосных станций подкачки. Последнее обстоятельство определяет высокую неравномерность поступления сточных вод на очистку. В холодный период года исходная температура бытовых сточных вод (БСВ) с 16–18 °C может снизиться до 5–7 °C. Привозные стоки от выгребов и септиков в данный период вообще имеют температуру 2–4 °C. Если БСВ не подогревать (а это повышает коммунальное

<sup>1</sup> Российская Федерация. Арктический совет. URL: <https://arctic-council-russia.ru/useful/?ysclid=lg4r3edy6s26890718> (дата обращения: 10.10.2024)

<sup>2</sup> Указ Президента Российской Федерации от 26.10.2020 г. № 645 «О Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года». URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/45972> (дата обращения: 10.10.2024)

энергопотребление), то традиционные сооружения биологической очистки резко снижают свою эффективность (до 70 % и ниже) по удалению из сточных вод органических веществ из-за ингибирующего влияния низких температур [1]. В результате очистная станция не достигает нормативов качества БСВ по таким показателям, как ХПК, БПК, соединениям азота и фосфора. Особенно плохо поддаются извлечению из сточных вод ионы аммония (ИА), высокая концентрация которых вызывает активную эвтрофикацию водных объектов.

Концентрация ИА в водах природных источников варьирует в интервале от 10 до 200 мкг/дм<sup>3</sup> в пересчете на азот. Основными источниками поступления ИА в реки, озера и водохранилища являются неочищенные или плохо очищенные БСВ населенных пунктов, сточные воды коровников, свинарников и птицеферм, талые и дождевые стоки с сельскохозяйственных полей (при использовании азотных удобрений), а также сточные воды специфических предприятий. С хозяйственно-бытовыми сточными водами в канализационные системы ежесуточно поступает до 10 г аммонийного азота в расчете на одного жителя [2]. Предельно допустимая концентрация ИА в воде водоемов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования (ПДК<sub>в</sub>) установлена в размере 1.5 мг/дм<sup>3</sup> (в пересчете на азот 1.2 мг/дм<sup>3</sup>)<sup>3</sup>, а для водоемов рыбохозяйственного значения – 0.5 мг/дм<sup>3</sup> (в пересчете на азот 0.4 мг/дм<sup>3</sup>)<sup>4</sup>. Согласно Постановлению Правительства РФ № 1430, допустимая концентрация азота аммонийного для водоемов категории Б и В равна 8 мг/дм<sup>3</sup> для малых очистных сооружений<sup>5</sup>. Токсичность аммония, проявляемая в водной среде по отношению к микроорганизмам, возрастает с повышением pH [3]. Повышенная концентрация ионов аммония может быть использована в качестве индикаторного показателя, отражающего ухудшение санитарного состояния водного объекта, процесс загрязнения поверхностных и подземных вод в первую очередь бытовыми и сельскохозяйственными стоками.

Одним из наиболее перспективных методов очистки сточных вод от ИА является осаждение аммония в виде нерастворимого гексагидрата магний-аммоний-фосфата, или струвита  $\text{NH}_4\text{MgPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (МАФ). Этот метод обеспечивает высокую степень очистки и позволяет вторично использовать аммиак, поскольку струвит является ценным продуктом и может применяться в качестве удобрения [4]. Для изучения процесса очистки сточных вод авторы проанализировали осаждение МАФ гидрофосфатом натрия, гидроксидом натрия и хлористым магнием. Выяснилось, что максимальная степень очистки сточных вод от ИА достигается при pH = 8.5–10 и незначительном превышении количества осадителей (на 5 %). Оптимальным режимом осаждения МАФ является прямая мгновенная подача реагентов, при этом сначала в сточные воды добавляются растворы  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$  и NaOH, а затем в раствор  $\text{MgCl}_2$  [4]. Кроме того, установлено [5], что в основном МАФ образуется при соотношении концентраций ионов  $[\text{Ca}^{2+}]:[\text{Mg}^{2+}]$  в сточных водах менее 0.25:1.

<sup>3</sup> Постановление Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 28.01.2021 года № 2 Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания». URL: <https://docs.cntd.ru/document/573500115> (дата обращения: 10.10.2024)

<sup>4</sup> Приказ Министерства сельского хозяйства Российской Федерации от 13.12.2016 № 552 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения». URL: <https://docs.cntd.ru/document/420389120> (дата обращения: 10.10.2024)

<sup>5</sup> Постановление Правительства Российской Федерации от 15.09.2020 г. № 1430 «Об утверждении технологических показателей наилучших доступных технологий в сфере очистки сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений или городских округов». URL: <https://docs.cntd.ru/document/565798086> (дата обращения: 10.10.2024)

В статье малазийских авторов [6] для окисления органики БСВ используются процесс Фентона и химическое осаждение аммония. Определено, что при оптимальных условиях осаждения струвита (молярные соотношения:  $Mg^{2+}/NH_4^+ = 1$  и  $PO_4^{3-}/NH_4^+ = 1$  при  $pH = 8.2 \pm 0.1$ ) концентрация ИА снизилась до  $41 \pm 7.1$  мг/дм<sup>3</sup> с первоначальных  $298 \pm 41$  мг/дм<sup>3</sup> (эффективность удаления 78.8 %).

Согласно исследованиям [1, 7], сточные воды в сети канализации небольших северных поселений имеют весьма низкие температуры (от +6 до +15 °С) из-за охлаждения в промежуточных насосных станциях и усреднителях без подогрева. Для таких БСВ характерна высокая концентрация загрязнений (например, по взвешенным веществам – 300–5 400 мг/дм<sup>3</sup>, БПК<sub>5</sub> – 200–1 500 мг/дм<sup>3</sup>, ХПК – 600–11 000 мг/дм<sup>3</sup>, ионам аммония – 80–200 мг/дм<sup>3</sup>) по причине низких суточных норм водопотребления в зимнее время (50–120 л на одного жителя).

Принимая во внимание специфические северные условия и требования нормативных документов<sup>6</sup>, в подобных районах возможна замена этапа биологической очистки на химическую или физико-химическую на очистных сооружениях системы водоотведения. Согласно [8], установки физико-химической очистки предпочтительней устраивать для небольших населенных пунктов, отличающихся большой неравномерностью поступления сточных вод, низкой температурой и концентрацией загрязняющих веществ. В этом случае сооружения будут работать стабильнее, независимо от графика подачи стоков, перепада температур и изменения внешних условий.

За последние несколько десятилетий в России накоплен недостаточно большой опыт внедрения станций физико-химической очистки (СФХО) [3, 9–12] для обработки БСВ (например, в Красноярском крае, где было внедрено более 30 станций), где главными этапами являются реагентная обработка и фильтрование. Но при реализации таких технологических схем СФХО нормативы по удалению ИА и снижению ХПК в очищаемой воде так и не были достигнуты.

В зарубежной практике также имеются методы решения данных проблем. Например, в Канаде разработан биоэлектрохимический анаэробный реактор, позволяющий при любых температурах достигать высокой степени очистки стоков и получать при этом биогаз [13]. В Гренландии и Дании предварительная коагуляция полиалюминий хлоридом позволяла снизить количество взвешенных веществ на 73 %, фосфатов – на 28 % [14, 15]. В штате Аляска (США) предлагают внедрить схему очистки, включающую физико-химическое окисление в присутствии пероксида водорода, что снижает ХПК до 0.7 мг/дм<sup>3</sup> [16, 17].

В последнее время за рубежом набирают популярность технологии интенсивного окисления, которые эффективно удаляют загрязнители из сточных вод, а также обеззараживают, что позволяет осуществлять сброс сточных вод в соответствии с действующим законодательством [18].

Примером использования химического метода является окисление азота реагентами, содержащими активный хлор. Активный хлор окисляет находящиеся в сточных водах соединения аммония, аммиака и органические вещества, содержащие аминогруппы до моно- и дихлораминов, а также до треххлористого азота. В статье [19] описан метод окисления ионов аммония гипохлоритом натрия для определения оптимальных условий его проведения в отсутствие и присутствии органических соединений. В проведенных сериях экспериментов максимальная степень удаления ионов аммония составила в отсутствие органических соединений 98 % (минимальная остаточная концентрация – 0.5 мг/дм<sup>3</sup>) [17].

При использовании технологических схем СФХО для очистки БСВ от ИА в качестве предварительного этапа практически всегда применяется осаждение в сочетании с коагуляцией и флоку-

<sup>6</sup> СП 32.13330.2018 Канализация. Наружные сети и сооружения: Актуализированная редакция СНиП 2.04.03-85 (с Изменением № 1, 2, 3). URL: <https://docs.cntd.ru/document/554820821> (дата обращения: 10.10.2024)

ляцией. Авторы статьи [20] предлагают схему обработки, включающую первичное осаждение, что приводит к получению верхней надосадочной жидкости и нижнего твердого осадка. Затем вода обрабатывается методом электрохимической очистки, что позволяет получать техническую воду, пригодную для использования в сельском хозяйстве и туалетах (для работы смывных бачков). Получаемый осадок может быть подвергнут биоразложению или физическому воздействию (например, микроволновой обработке). Кроме того, эти методы обеспечивают удовлетворительное удаление БПК (> 85 %), ХПК (81–91 %) и патогенных микроорганизмов, а также разложение тяжелых металлов и микрозагрязнителей.

В Испании оптимизация процессов коагуляции и флокуляции на городских очистных сооружениях привела к использованию 25 мг/дм<sup>3</sup> хлорида железа (FeCl<sub>3</sub>) в сочетании с 25 мг/дм<sup>3</sup> флокулянта, состоящего из кремния (SiO<sub>2</sub> – 3 %), алюминия (Al<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> – 64.5 %) и солей железа (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 32.5 %), в процессе быстрого смешивания в течение 1 мин при 200 об/мин и медленного перемешивания в течение 30 мин при 30 об/мин с последующим заключительным 30-минутным процессом оседания. Численные и статистические результаты оптимизации процесса достигли 91.5, 59.1 и 95.2 % эффективности удаления мутности, ХПК и взвешенных веществ соответственно. Эти показатели позволяют судить об эффективности улучшенного процесса коагуляции/флокуляции в качестве предварительной обработки для более высокой скорости восстановления NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (чуть более 570 мг/дм<sup>3</sup>) и уменьшения размеров или замещения других мембранных процессов благодаря высокой величине удаления взвешенных веществ [21].

Итальянские исследователи [22] считают, что весьма перспективным и эффективным способом является адсорбция ИА природным цеолитом, предварительно обработанным хлоридом натрия. Он способен извлекать ионы аммония и удерживать их в своих порах как сорбент. Эффективность цеолита по отношению к ИА зависит от природного состава минерала и способа его модификации.

Таким образом, для очистки БСВ могут применяться следующие основные физико-химические методы удаления ионов аммония и других видов загрязнений: предварительное осаждение с коагулированием, химическое окисление органики, химическое осаждение аммония, фильтрование и сорбция. Эти способы не являются специфичными для какого-либо региона и могут использоваться по всему миру, в том числе в северных климатических условиях и децентрализованных арктических поселениях. Однако с помощью существующих технологий удастся очистить взвешенные вещества, нитриты, нитраты и фосфаты.

Основная проблема, которая не решена предложенными ранее в научном сообществе схемами, это удаление ионов аммония и снижение ХПК до установленных норм, поэтому вопрос обработки фекальных сточных вод остается актуальным. Особенно для арктических поселений с малыми расходами стоков, где стандартные методы очистки не работоспособны.

Научная новизна. В исследовании предложен проект уникальной технологической схемы канализационных очистных сооружений (КОС) с заменой биологического метода на физико-химический метод обработки коммунальных сточных вод, который возможно применять в Арктической зоне.

Цель исследования заключалась в разработке эффективной технологической схемы СФХО для БСВ, схожих по качеству с коммунальными стоками арктических поселков, от ионов аммония и других видов загрязнений до установленных норм. Так как сточные воды поселков Арктической зоны и частной жилой застройки города Тюмени схожи по температурным условиям, объемам стоков и концентрациям различных загрязнений, что подтверждает представленный эксперимент и данные, полученные в исследовании [1], в качестве объекта исследования принята вода из септиков, расположенных в неканализованном районе Тюмени.

Предметом исследования было влияние реагентных методов очистки сточных вод на изменения показателей качества воды (в том числе концентрации ИА) на отдельных этапах моделирования.

При этом изменялись технологические условия, а именно – температура воды, время контакта, дозы реагентов и другие параметры.

## 2. Материалы и методы / Materials and methods

В лаборатории кафедры инженерных систем и сооружений Тюменского индустриального университета был поставлен эксперимент по лабораторному моделированию процессов физико-химической очистки БСВ от органических веществ, в том числе от ИА.

Авторы предложили следующий порядок технологических процессов очистки бытовых сточных вод, выбранный на основе опубликованных результатов [4, 9] с учетом особенностей децентрализованных поселений:

- 1) предварительная аэрация (обработка сжатым воздухом в течение 20 минут);
- 2) коагуляция с использованием «Аква-Аурат-30» (АА) в сочетании с флокуляцией полиакриламидом (ПАА);
- 3) гравитационное отстаивание взвешенных веществ (ВВ) и продуктов реакции;
- 4) химическое окисление органических веществ с использованием раствора перманганата калия  $KMnO_4$ ;
- 5) механическая фильтрация через слой кварцевого песка (размер гранул от 0.5 до 1.7 мм);
- 6) химическое осаждение ионов аммония с помощью раствора гидрофосфата натрия  $Na_2HPO_4$  и раствора хлорида магния  $MgCl_2$  при pH = 9–10 и получение осадка – струвита;
- 7) сорбционная фильтрация через слой гранулированного активированного угля (размер гранул от 1 до 3 мм).

Эксперимент производился по плану, представленному в таблице 1, с разбивкой на этапы очистки сточных вод. По результатам измерения контрольных показателей выбирался лучший вариант технологии очистки, определялись оптимальные параметры и сравнивалась эффективность очистки воды в нормальных (при  $T = 18–22\text{ }^{\circ}C$ ) и в экстремальных (при  $T = 3–6\text{ }^{\circ}C$ ) температурных условиях.

Таблица 1. План эксперимента по физико-химической очистке хозяйственно-фекальных стоков  
Table 1. Experimental plan for physical and chemical treatment of domestic sewage

Наименование процесса	Код	Технология
<i>1. Коагулирование сточных вод</i>		
Коагуляция + флокуляция + отстаивание при $T = 18–22\text{ }^{\circ}C$	А	Вода должна иметь $T = 20 \pm 2\text{ }^{\circ}C$ , затем добавляются коагулянт (АА дозой 70 мг/дм <sup>3</sup> ) и флокулянт (ПАА дозой 1 мг/дм <sup>3</sup> ), смешиваются быстро в течение 1 мин со скоростью 2–3 об/сек, затем скорость понижается до 0.5 об/сек и проба медленно перемешивается еще 20 мин; далее смесь отстаивается 60 мин
Коагуляция + флокуляция + отстаивание при $T = 3–6\text{ }^{\circ}C$	Б	Вода охлаждается до $T = 4 \pm 1\text{ }^{\circ}C$ , затем добавляется коагулянт (АА – 70 мг/дм <sup>3</sup> ) и флокулянт (ПАА – 1 мг/дм <sup>3</sup> ), смешивается быстро 1 мин, затем перемешивается медленно 20 мин и отстаивается 60 мин
Преаэрация + коагуляция + флокуляция + отстаивание при $T = 18–22\text{ }^{\circ}C$	В	Вода должна быть $T = 20 \pm 2\text{ }^{\circ}C$ . Вода аэрируется в течение 20 мин сжатым воздухом, затем добавляется коагулянт (АА – 70 мг/дм <sup>3</sup> ) и флокулянт (ПАА – 1 мг/дм <sup>3</sup> ), смешивается быстро 1 мин, затем медленно 20 мин; смесь отстаивается 60 мин
Преаэрация + коагуляция + флокуляция + отстаивание при $T = 3–6\text{ }^{\circ}C$	Г	Вода охлаждается до $T = 4 \pm 1\text{ }^{\circ}C$ , затем аэрируется в течение 20 мин сжатым воздухом, добавляется коагулянт (АА – 70 мг/дм <sup>3</sup> ) и флокулянт (ПАА – 1 мг/дм <sup>3</sup> ); проба смешивается быстро 1 мин, затем медленно 20 мин; смесь отстаивается 60 мин
Окисление + преаэрация + коагуляция + флокуляция + отстаивание при $T = 18–22\text{ }^{\circ}C$	Д	Вода должна быть $T = 20 \pm 2\text{ }^{\circ}C$ . В пробу добавляется раствор окислителя $KMnO_4$ дозой 10 мг/дм <sup>3</sup> . Вода аэрируется в течение 20 мин сжатым воздухом, затем добавляется коагулянт (АА – 70 мг/дм <sup>3</sup> ) и флокулянт (ПАА – 1 мг/дм <sup>3</sup> ), проба смешивается быстро 1 мин, затем медленно 20 мин; смесь отстаивается 60 мин

Наименование процесса	Код	Технология
Окисление + преаэрация + коагуляция + флокуляция + отстаивание при $T = 3-6\text{ }^{\circ}\text{C}$	Е	Вода охлаждается до $T = 4 \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . В пробу добавляется раствор окислителя $\text{KMnO}_4$ дозой $10\text{ мг/дм}^3$ . Вода аэрируется в течение 20 мин сжатым воздухом, затем добавляется коагулянт (АА – $70\text{ мг/дм}^3$ ) и флокулянт (ПАА – $1\text{ мг/дм}^3$ ), проба смешивается быстро 1 мин, затем медленно 20 мин; смесь отстаивается 60 мин
<i>2. Химическое окисление очищенной воды в процессе коагуляции</i>		
Химическое окисление + механическое фильтрование через песок при $T = 18-22\text{ }^{\circ}\text{C}$	Ж	Предварительно очищенная вода должна иметь $T = 20 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Добавляется раствор $\text{KMnO}_4$ дозой $10\text{ мг/дм}^3$ , смешивается быстро 1 мин и еще медленно 20 мин; смесь фильтруется через предварительно промытый слой песка
Химическое окисление + механическое фильтрование через песок при $T = 3-6\text{ }^{\circ}\text{C}$	З	Вода охлаждается до $T = 5 \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Добавляется раствор $\text{KMnO}_4$ дозой $10\text{ мг/дм}^3$ , смешивается быстро 1 мин и еще медленно 20 мин; смесь фильтруется через предварительно промытый слой песка
Химическое окисление + барботаж воздухом + механическое фильтрование через песок при $T = 18-22\text{ }^{\circ}\text{C}$	И	Предварительно очищенная вода должна иметь $T = 20 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Добавляется раствор $\text{KMnO}_4$ дозой $10\text{ мг/дм}^3$ , смешивается быстро 1 мин и барботируется сжатым воздухом 20 мин; смесь фильтруется через предварительно промытый слой песка
Химическое окисление + барботаж воздухом + механическое фильтрование через песок при $T = 3-6\text{ }^{\circ}\text{C}$	К	Вода охлаждается до температуры $T = 5 \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Добавляется раствор $\text{KMnO}_4$ дозой $10\text{ мг/дм}^3$ , смешивается быстро 1 мин и барботируется сжатым воздухом 20 мин; смесь фильтруется через предварительно промытый слой песка
<i>3. Химическое осаждение ионов аммония в воде после химического окисления</i>		
Химическое осаждение аммония + сорбционное фильтрование через уголь при $T = 18-22\text{ }^{\circ}\text{C}$	Л	Вода должна быть $T = 20 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Вводится гидрофосфат натрия $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ и хлорид магния $\text{MgCl}_2$ . Полученный раствор перемешивается в течение 1 мин, затем подщелачивается 10%-м раствором $\text{NaOH}$ до $\text{pH} = 9$ . Далее мешают 5 мин и отстаивают 60 мин. Затем отстой фильтруют через слой предварительно промытого активированного угля
Химическое осаждение аммония + сорбционное фильтрование через уголь при $T = 3-6\text{ }^{\circ}\text{C}$	М	Вода охлаждается до $T = 5 \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Вводится гидрофосфат натрия $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ и хлорид магния $\text{MgCl}_2$ . Полученный раствор перемешивается в течение 1 мин, затем подщелачивается 10%-м раствором $\text{NaOH}$ до $\text{pH} = 9$ . Далее мешают 5 мин и отстаивают 60 мин. Затем отстой фильтруют через слой предварительно промытого активированного угля
Химическое осаждение аммония + сорбционное фильтрование через уголь + вторичная коагуляция при $T = 18-22\text{ }^{\circ}\text{C}$	Н	Вода должна быть $T = 20 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Вводится гидрофосфат натрия $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ и хлорид магния $\text{MgCl}_2$ . Полученный раствор перемешивается в течение 1 мин, затем подщелачивается 10%-м раствором $\text{NaOH}$ до $\text{pH} = 9$ . Далее мешают медленно 10 мин, добавляют АА дозой $30\text{ мг/дм}^3$ и отстаивают 60 мин. Затем фильтрация через уголь
Химическое осаждение аммония + сорбционное фильтрование через уголь + вторичная коагуляция при $T = 3-6\text{ }^{\circ}\text{C}$	О	Вода охлаждается до $T = 5 \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Вводится гидрофосфат натрия $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ и хлорид магния $\text{MgCl}_2$ . Полученный раствор перемешивается в течение 1 мин, затем подщелачивается 10%-м раствором $\text{NaOH}$ до $\text{pH} = 9$ . Далее мешают медленно 10 мин, добавляют АА дозой $30\text{ мг/дм}^3$ и отстаивают 60 мин. Затем фильтрация через уголь

Особенность эксперимента заключалась в том, что данное исследование проводилось в течение трех недель, при этом каждую неделю использовались свежие сточные воды, поэтому есть некоторые различия в исходных показателях сточных вод, не превышающие 10 %. Эффективность того или иного этапа очистки оценивалась по следующим характерным показателям: pH; концентрация ВВ, ХПК, ИА, нитритов, нитратов, фосфатов, хлоридов и сульфатов; дополнительно измерялись мутность, цветность и объем выпавшего осадка. Определение численных значений показателей производилось согласно действующим методикам анализа жидкости ПНД Ф.

### 3. Результаты и обсуждение / Results and discussion

На первом этапе экспериментального моделирования была изучена эффективность предварительного окисления, преаэрации и коагуляции сточных вод для двух температурных режимов

Таблица 2. Результаты первого этапа эксперимента  
Table 2. Results of the first stage of the experiment

Наименование показателя	Вход	Коды процессов					
		А	Б	В	Г	Д	Е
рН	7.14	6.79	6.87	7.30	7.26	7.42	7.29
Взвешенные вещества, мг/дм <sup>3</sup>	440	315	270	255	230	269	261
ХПК, мг/дм <sup>3</sup>	490	350	300	284	256	300	290
Аммония-ион, мг/дм <sup>3</sup>	82.45	28.95	48.44	88.22	61.34	84.74	86.19
Нитрит-ион, мг/дм <sup>3</sup>	0.28	Менее 0.1	Менее 0.1	0.18	0.25	0.30	0.33
Нитрат-ион, мг/дм <sup>3</sup>	1.42	1.37	5.96	2.51	1.22	3.06	2.89
Фосфат-ион, мг/дм <sup>3</sup>	19.42	1.7	1.11	4.48	0.98	4.4	2.2
Хлориды, мг/дм <sup>3</sup>	100.5	171.3	170.8	171.9	178.7	166.2	171.3
Сульфаты, мг/дм <sup>3</sup>	19.35	13.2	13.26	14.28	18.37	15.85	16.87
Объем осадка, дм <sup>3</sup>	–	0.025	0.029	0.031	0.032	0.029	0.030

(нормального и экстремального). Качество исходной сточной воды (на входе) и результаты первого этапа для процессов А–Е, согласно кодировке в таблице 1, представлены в таблице 2.

На первом этапе была поставлена задача максимально снизить содержание ВВ и ХПК. Как показал эксперимент, предварительное окисление в сочетании с первичной коагуляцией не дали должного результата, поэтому для дальнейшего исследования была принята следующая последовательность: преаэрация + коагуляция + флокуляция + отстаивание (это процессы В и Г, в результате которых получен наилучший эффект по ХПК).

Вторым этапом эксперимента исследована эффективность химического окисления предварительно очищенных проб воды (после аэрации, коагуляции/флокуляции и осаждения). Реагентная обработка проводилась согласно детальному описанию процессов Ж–К в таблице 1. Исходное качество воды и результаты второго этапа моделирования представлены в таблице 3.

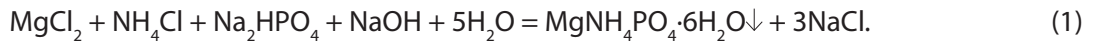
Таблица 3. Результаты второго этапа эксперимента  
Table 3. Results of the second stage of the experiment

Наименование показателя	Исходное качество сточных вод		Коды процессов					
	После процесса А	После процесса Б	В	Г	Ж	З	И	К
рН	7.05	7.15	6.88	6.86	7.27	7.32	7.98	7.71
Взвешенные вещества, мг/дм <sup>3</sup>	160	300	104	172	59	109	51	82
ХПК, мг/ дм <sup>3</sup>	390	452	250	259	141	164	126	123
Ион аммония, мг/ дм <sup>3</sup>	29.4	28.6	35.6	36.4	19	21	18.2	17.2
Мутность, мг/ дм <sup>3</sup>	89.78	78.42	4.47	7.71	2.44	2.2	1.57	2.32
Цветность, град	360.78	350.76	54.5	62.98	45.65	41.71	31.61	35.27

Варианты с химическим окислением при барботаже сжатым воздухом (процессы И и К) дают наилучшие значения концентрации ИА (сокращение в 1.6–1.7 раза), ВВ (в 3.6–5.8 раза), ХПК (почти в 3.7 раза), при этом наблюдается существенное снижение цветности и мутности (на 90–98 %). Показатель среды рН находится в допустимых пределах во всех опытах (6.5–8.5). Но при этом требуемые значения качества до сих пор не были достигнуты. На основании полученных данных к дальнейшему эксперименту приняты варианты И и К, согласно кодировке в таблице 1.



Третьим этапом было рассмотрено химическое осаждение ИА путем добавления в воду реагентов, содержащих фосфат-ионы (гидрофосфат натрия) и ионы магния (хлорид магния), с последующим осаждением МАФ, или струвита, в щелочной среде по следующему механизму [4]:



Учитывая, что для получения струвита  $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  реагенты подаются в молярном соотношении  $\text{Mg}:\text{NH}_4:\text{PO}_4 = 1:1:1$ , вычислено количество реагентов (на 1  $\text{дм}^3$  сточных вод):

$$\frac{m_{\text{ха}}}{M_{\text{ха}}} = \frac{X1}{M_{\text{хм}}} \rightarrow \frac{0.191}{53} = \frac{X1}{95} \rightarrow X1 = 0.342 \text{ (г.)}; \quad (2)$$

$$\frac{m_{\text{ха}}}{M_{\text{ха}}} = \frac{X2}{M_{\text{зфн}}} \rightarrow \frac{0.191}{53} = \frac{X2}{142} \rightarrow X2 = 0.512 \text{ (г.)}, \quad (3)$$

где  $m_{\text{ха}}$  – масса хлорида аммония;

$M_{\text{ха}}$  – молярная масса хлорида аммония;

$M_{\text{хм}}$  – молярная масса хлорида магния;

$M_{\text{зфн}}$  – молярная масса гидрофосфата натрия;

$X1$  – масса хлорида магния;

$X2$  – масса гидрофосфата натрия.

Для интенсификации осаждения производили подщелачивание 10%-м раствором гидроксида натрия NaOH. После перемешивания в течение 1 мин и 60-минутного отстаивания получался осадок белого цвета – струвит, который представляет из себя удобрение для почвы (рис. 1). В завершение, с целью удаления остаточных загрязнений пробы воды, были профильтрованы через слой гранулированного активированного угля. Исходные данные (вход) и лучшие результаты по всем этапам моделирования для разных процессов представлены в таблице 4.

Вторичная коагуляция повысила эффект осаждения аммония, но при этом увеличила содержание ХПК и цветности. На следующем этапе работ планируется подбор коагулянтов для вторичной обработки воды и контроль дополнительных показателей с учетом выхода вторичных загрязнений, который происходит в результате применения реагентов.

Проводилось сравнение влияния температуры на очистку сточных вод от загрязнений для теплой ( $T = 18\text{--}22 \text{ }^\circ\text{C}$ ) и холодной ( $T = 3\text{--}6 \text{ }^\circ\text{C}$ ) воды. Результаты показывают, что при изначально не-

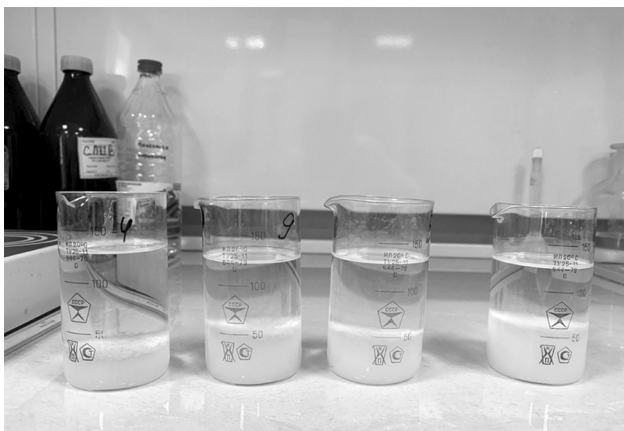


Рис. 1. Химическое осаждение ионов аммония  
Fig. 1. Chemical precipitation of ammonium ions

сколько разных концентрациях показателей качества исходной воды концентрации на выходе приблизительно равны. Изменение температуры воды в нормальных и экстремальных условиях мало влияет на конечный результат.

Концентрация взвешенных веществ в воде снизилась на 98 %. После механического фильтрования (этапы И и К) предложенная схема одинаково эффективна независимо от качества исходной воды. При практической реализации это может отразиться только на сроке службы загрузки фильтров и количестве циклов промывок загрузки. Концентрация ХПК снижается более чем в 10 раз, при этом общая эффективность уда-

Таблица 4. Результаты эксперимента по всем этапам очистки  
Table 4. Results of the experiment across all treatment stages

Показатель	Теплая вода T = 18–22 °C (нормальные условия)					Холодная вода T = 3–6 °C (экстремальные условия)				
	Вход	Код процесса				Вход	Код процесса			
		В	И	Л	Н		Г	К	М	О
pH	6.78	6.92	7.95	9.05	9.13	7.01	6.83	7.77	9	9.25
ВВ, мг/дм <sup>3</sup>	190	70	16	5	2	160	30	17	4	3
ХПК, мг/дм <sup>3</sup>	850	445	395	57.4	77.5	956	435	391	75.5	86.3
Аммоний-ион, мг/дм <sup>3</sup>	58	64.2	60.1	5.48	2.36	63.27	66.2	70.3	2.7	2.2
Нитрит-ионы, мг/дм <sup>3</sup>	0.2	–	–	0.2	0.2	0.2	–	–	0.2	0.2
Нитрат-ионы мг/дм <sup>3</sup>	1.1	–	–	0.48	0.82	1	–	–	0.96	0.87
Мутность, мг/дм <sup>3</sup>	94.02	25.87	2.73	1.74	0	92.22	8.47	3.19	0.93	0
Цветность, град	370	170	51	11.2	0.75	373	84	56	7.8	2.3
Хлориды, мг/дм <sup>3</sup>	87.86	–	–	2173	3735	88.49	–	–	3766	3918
Сульфаты, мг/дм <sup>3</sup>	19.69	–	–	160.1	117.36	29.6	–	–	139	94.72
Фосфаты, мг/дм <sup>3</sup>	20.05	–	–	0.88	0.25	17.87	–	–	0.25	0.25

ления химически окисляемых органических веществ составляет 91 %. После коагуляции и осаждения (этапы А и Б) вода становится примерно одинаковой по качеству независимо от расхождений в показателях на входе. Это говорит о том, что предложенная схема коагуляции и флокуляции весьма эффективна при значительном превышении среднего значения концентрации ХПК, что обычно наблюдается при поступлении бытовых сточных вод. Некоторый рост ХПК (на 10–20 мг/дм<sup>3</sup>) после вторичной коагуляции (этапы очистки Н и О) очевидно связан с поступлением в воду органических молекул флокулянта ПАА. Экспериментальные данные показали, что дополнительная коагуляция после химического осаждения ионов аммония вносит в воду вторичное загрязнение. На основании этого было решено в дальнейшем отказаться от этапов вторичной коагуляции.

Рис. 2 представляет графики изменения содержания ионов аммония после каждого этапа очистки. Общий достигаемый эффект для ионов аммония составил 96.5 %. Рост аммония на стадиях

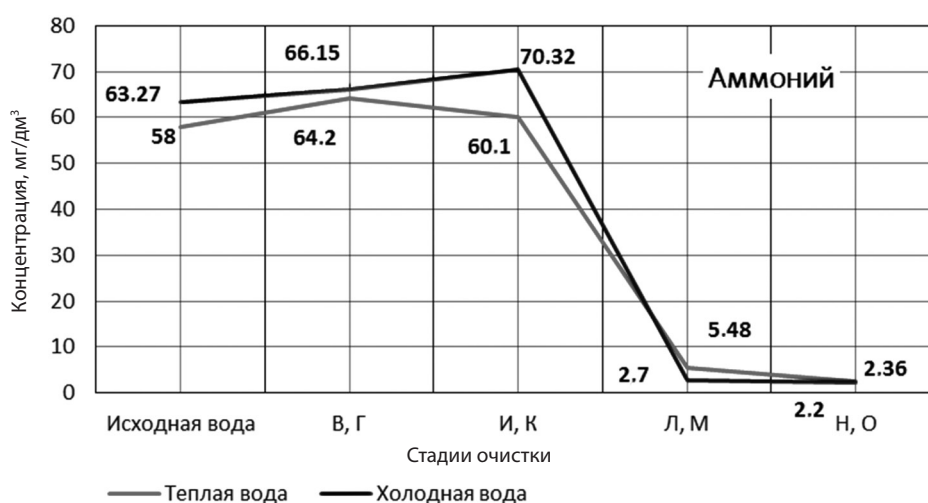


Рис. 2. Изменение концентрации ионов аммония на этапах очистки для теплой (18–22 °C) и холодной (3–6 °C) воды

Fig. 2. Change in ammonium ion concentration at treatment stages for warm (18–22 °C) and cold (3–6 °C) water

очистки В, Г, И и К связан со снижением влияния других видов загрязнений, которые присутствуют в сточных водах и удаляются в процессе коагуляции, флокуляции и отстаивания. Очевидно, что основное удаление ионов аммония происходит на стадии химического осаждения.

Общая схема процессов очистки БСВ, предложенная на основе лабораторного моделирования физико-химических процессов и выбора лучших вариантов, представлена на рис. 3. Данная схема вполне может послужить основой для проектирования СФХО бытовых сточных вод небольших населенных пунктов. Последовательность выбранных процессов следующая: преаэрация – коагуляция – отстаивание – окисление – фильтрование через песок – химическое осаждение аммония (получение струвита) – фильтрование через активированный уголь.

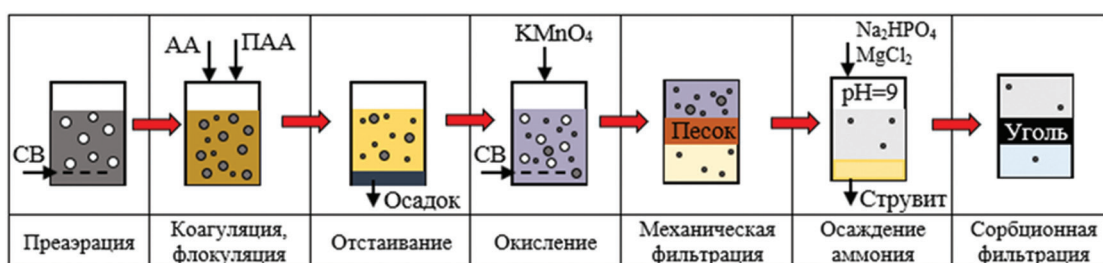


Рис. 3. Технологическая схема СФХО (СВ – сжатый воздух, АА – «Аква-Аурат-30», ПАА – полиакриламид)

Fig. 3. Process flow diagram of the physical and chemical treatment system (СВ – compressed air, АА – «Aqua-Aurat-30», ПАА – polyacrylamide)

При практической реализации данной схемы в завершение необходимо добавить обеззараживание и стабилизацию рН (на последних этапах наблюдалось повышение рН до 9–9.25; это может быть связано со спецификой угольной загрузки). Также необходимы сооружения для сбора, обработки и утилизации осадков. При этом осадки на разных ступенях очистки имеют разный состав и свойства: осадок после коагуляции является отходом и подлежит дополнительной специальной обработке; осадок после химического осаждения аммония представляет собой готовое удобрение для сельскохозяйственных нужд – струвит. Общий объем обезвоженного осадка будет составлять не более 0.5 % от производительности станции очистки.

#### 4. Заключение / Conclusions

Предложенная технологическая схема очистки БСВ, включающая в себя преаэрацию, отстаивание взвеси с коагуляцией и флокуляцией, химическое окисление и осаждение струвита, а также механическое и сорбционное фильтрование, показала высокую эффективность удаления ионов аммония (на 96.5 %), взвешенных веществ (на 98 %) и ХПК (на 91 %) (кодировки процессов В, И, Л и Г, К, М для теплой и холодной сточной воды соответственно). В результате научной работы удалось добиться показателей качества БСВ, разрешенной правительством Российской Федерации согласно Постановлению от 15.09.2020 г. № 1430, для сброса в водный объект категории В малыми и сверхмалыми очистными сооружениями (ВВ не более 15 мг/дм<sup>3</sup>, ХПК – 80, азот аммонийный – 8). Выяснилось, что данная технология мало зависит от температуры воды и пригодна для бытовых сточных вод с температурой от 3 до 22 °С. Этот факт позволяет применять разработанную технологическую схему для СФХО децентрализованных систем канализации в отдаленных арктических поселениях. В данном случае отсутствует биохимическая очистка, что существенно упрощает эксплуатацию станции и делает возможной ее работу в автоматическом режиме.

В результате химического осаждения ионов аммония получается новый продукт – струвит, который служит удобрением для сельхозугодий. Однако добавление в воду большого количества реагентов (хлорида магния и гидрофосфата натрия) ведет ко вторичному загрязнению сточных вод

и требует контроля таких веществ, как магний, натрий, хлориды и сульфаты. В дальнейшем стоит задача по определению оптимальных доз коагулянтов и реагентов, дающих минимальное вторичное загрязнение обрабатываемой воды.



**Вклад авторов.** Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

**Author contributions.** All authors contributed equally to preparing the publication.

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

**Conflict of interest.** The authors declare no relevant conflict of interest.

#### Список литературы

1. Вялкова Е. И., Максимова С. В., Землянова М. В., Воротникова А. В., Максимов Л. И. *Водоотведение объектов инфраструктуры нефтегазовых месторождений Западной Сибири*. Тюмень: Тюменский индустриальный университет; 2017. 175 с.
2. Руфова А. А., Татарнинова А. В. Антропогенное влияние на гидрохимическое и гидробиологическое состояние поверхностных вод северных городов (на примере г. Якутска). *Современные проблемы науки и образования*. 2015;(4):503. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=20468>.
3. Фугаева А. М., Воронов А. А., Вялкова Е. И. Очистка бытовых сточных вод малых населенных пунктов. В сб.: *Современные проблемы земельно-имущественных отношений, урбанизации территории и формирования комфортной городской среды: сборник докладов Международной научно-практической конференции, Тюмень, 2023*. Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2023. С. 443–450. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=55923907>.
4. Lobanov S. A., Poilov V. Z. Treatment of wastewater to remove ammonium ions by precipitation. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2006;79(9):1473–1477. <https://doi.org/10.1134/S1070427206090151>
5. Mitani Y., Sakai Y., Mishina F., Ishiduka S. Struvite recovery from wastewater having low phosphate concentration. *Journal of Water and Environment Technology*. 2003;1(1):13–18. <https://doi.org/10.2965/jwet.2003.13>
6. Sea Y. F., Chua A. S. M., Ngho G. Ch., Rabuni M. F. Integrated struvite precipitation and fenton oxidation for nutrient recovery and refractory organic removal in palm oil mill effluent. *Water*. 2024;16(13):1788. <https://doi.org/10.3390/w16131788>
7. Glushchenko E., Vialkova E., Sidorenko O., Fugaeva A. Physical-chemical wastewater treatment in Arctic conditions. *E3S Web of Conferences*. 2020;157:02014. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202015702014>
8. Hendriksen K., Hoffmann B. Greenlandic water and sanitation systems – identifying system constellation and challenges. *Environmental Science and Pollution Research*. 2018;25(33):32964–32974. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9556-6>
9. Мочалов И. П. *Очистка и обеззараживание сточных вод малых населенных мест (в условиях Крайнего Севера)*. 2-е изд., доп. и перераб. Москва: ДАР/ВОДГЕО; 2016. 466 с.
10. Зверева С. М., Бартова Л. В. Развитие технологии очистки сточных вод малых населенных пунктов. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура*. 2017;8(2):64–74. <https://doi.org/10.15593/2224-9826/2017.2.06>
11. Гришин Б. М., Кошев А. Н., Ласьков Н. Н., Бикунова М. В. Удаление соединений азота из сточных вод с применением окислителей. *Региональная архитектура и строительство*. 2013;(2):91–97.
12. Андреев С. Ю., Исаева А. М., Кочергин А. С. *Разработка и исследование комбинированной технологии очистки сточных вод малых населенных пунктов*. Пенза: Пензенский государственный университет архитектуры и строительства; 2015. 120 с.
13. Ragush C., Schmidt J., Krkošek W. H., Gagnon G. A., Hansen L. T., Jamieson R. Performance of municipal waste stabilization ponds in the Canadian Arctic. *Ecological Engineering*. 2015;83(12):413–421. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.07.008>
14. Koivunen J., Heinonen-Tanski H. Peracetic acid (PAA) disinfection of primary, secondary and tertiary treated municipal wastewaters. *Water Research*. 2005;39(18):4445–4453 <https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.08.016>
15. Chhetri R. K., Klupsch E., Andersen H. R., Jensen P. E. Treatment of Arctic wastewater by chemical coagulation, UV and peracetic acid disinfection. *Environmental Science and Pollution Research*. 2018;25:32851–32859. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8585-5>
16. Wu T., Englehardt J. D., Guo T., Gassie L. W., Dotson A. D. Applicability of energy-positive net-zero water management in Alaska: technology status and case study. *Environmental Science and Pollution Research*. 2018;25:33025–33037. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0743-2>

17. Вялкова Е. И., Глущенко Е. С., Велижанина Т. С., Осипова Е. Ю. Анализ физико-химических методов очистки бытовых сточных вод северных населенных пунктов. *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2020;22(1):152–163. <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2020-22-1-152-163>
18. Lado Ribeiro A. R., Rodriguez-Chueca J., Giannakis S. Urban and industrial wastewater disinfection and decontamination by advanced oxidation processes (AOPs): Current issues and future trends. *Water*. 2021;13(4):560. <http://dx.doi.org/10.3390/w13040560>
19. Небукина И. А., Смирнова Н. Н., Рвачев И. С. Влияние органических соединений на эффективность удаления ионов аммония из сточных вод методом окисления. *Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского*. 2015;(2):28–33. <https://doi.org/10.17277/voprosy.2015.02.pp.028-033>
20. Anusuyadevi P. R., Kumar D. Ja. P., Omkaara Jyothi A. D. H. V., Patwardhan N. S., Janani V., Mol A. Towards viable eco-friendly local treatment of blackwater in sparsely populated regions. *Water*. 2023;15(3):542. <https://doi.org/10.3390/w15030542>
21. Barros A., Vecino X., Reig M., Cortina J. L. Coagulation and flocculation optimization process applied to the sidestream of an urban wastewater treatment plant. *Water*. 2022;14(24):4024. <https://doi.org/10.3390/w14244024>
22. Muscarella S. M., Laudicina V. A., Badalucco L., Conte P., Mannina G. Ammonium recovery from synthetic wastewaters by using zeolitic mixtures: a desorption batch-study. *Water*. 2023;15(19):3479. <https://doi.org/10.3390/w15193479>

### References

1. Vialkova E. I., Maksimova S. V., Zemlyanova M. V., Vorotnikova A. V., Maksimov L. I. *Drainage of infrastructure facilities of oil and gas fields in Western Siberia*. Tyumen: Industrial University of Tyumen; 2017. (In Russ.)
2. Rufova A. A., Tatarinova A. V. Anthropogenous influence on the hydrochemical and hydrobiological condition of the surface water of the northern cities (on the example of Yakutsk). *Modern problems of science and education*. 2015;(4):503. (In Russ.) URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=20468>.
3. Fugaeva A. M., Voronov A. A., Vialkova E. I. Purification of domestic wastewater from small settlements. In: *Sovremennyye problemy zemel'no-imushchestvennykh otnosheniy, urbanizatsii territorii i formirovaniya komfortnoy gorodskoy sredy: sbornik dokladov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Tyumen, 2023 = Modern problems of land and property relations, urbanization of the territory and the formation of a comfortable urban environment: Collection of reports of the International Scientific and Practical Conference, Tyumen, 2023*. Tyumen: Industrial University of Tyumen; 2023. P. 443–450. (In Russ.) URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=55923907>.
4. Lobanov S. A., Poilov V. Z. Treatment of wastewater to remove ammonium ions by precipitation. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2006;79(9):1473–1477. <https://doi.org/10.1134/S1070427206090151>
5. Mitani Y., Sakai Y., Mishina F., Ishiduka S. Struvite recovery from wastewater having low phosphate concentration. *Journal of Water and Environment Technology*. 2003;1(1):13–18. <https://doi.org/10.2965/jwet.2003.13>
6. Sea Y. F., Chua A. S. M., Ngoh G. Ch., Rabuni M. F. Integrated struvite precipitation and fenton oxidation for nutrient recovery and refractory organic removal in palm oil mill effluent. *Water*. 2024;16(13):1788. <https://doi.org/10.3390/w16131788>
7. Glushchenko E., Vialkova E., Sidorenko O., Fugaeva A. Physical-chemical wastewater treatment in Arctic conditions. *E3S Web of Conferences*. 2020;157:02014. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202015702014>
8. Hendriksen K., Hoffmann B. Greenlandic water and sanitation systems – identifying system constellation and challenges. *Environmental Science and Pollution Research*. 2018;25(33):32964–32974. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9556-6>
9. Mochalov I. P. *Wastewater treatment and disinfection for small settlements (in the Far North)*. 2<sup>nd</sup> edition, revised. Moscow: DAR/VODGEO; 2016. (In Russ.)
10. Zvereva S. M., Bartova L. V. Developing wastewater treatment technologies for small agglomerations. *Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Construction and Architecture*. 2017;8(2):64–74. <https://doi.org/10.15593/2224-9826/2017.2.06>
11. Grishin B. M., Koshev A. N., Laskov N. N., Bikunova M. V. Azot compounds removal out of sewage using oxidizers. *Regional Architecture and Engineering*. 2013;(2):91–97. (In Russ.)
12. Andreev S. Yu., Isaeva A. M., Kochergin A. S. *Development and investigation of combined wastewater treatment technology for small settlements*. Penza: Penza State University of Architecture and Construction; 2015. (In Russ.)
13. Ragush C., Schmidt J., Krkošek W. H., Gagnon G. A., Hansen L. T., Jamieson R. Performance of municipal waste stabilization ponds in the Canadian Arctic. *Ecological Engineering*. 2015;83(12):413–421. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.07.008>
14. Koivunen J., Heinonen-Tanski H. Peracetic acid (PAA) disinfection of primary, secondary and tertiary treated municipal wastewaters. *Water Research*. 2005;39(18):4445–4453 <https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.08.016>

15. Chhetri R. K., Klupsch E., Andersen H. R., Jensen P. E. Treatment of Arctic wastewater by chemical coagulation, UV and peracetic acid disinfection. *Environmental Science and Pollution Research*. 2018;25:32851–32859. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8585-5>
16. Wu T., Englehardt J. D., Guo T., Gassie L. W., Dotson A. D. Applicability of energy-positive net-zero water management in Alaska: technology status and case study. *Environmental Science and Pollution Research*. 2018;25:33025–33037. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0743-2>
17. Vialkova E. I., Glushchenko E. S., Velizhanina T. S., Osipova E. Y. Analysis of physicochemical wastewater treatment in Arctic zones. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Journal of Construction and Architecture*. 2020;22(1):152–163. (In Russ.) <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2020-22-1-152-163>
18. Lado Ribeiro A. R., Rodríguez-Chueca J., Giannakis S. Urban and industrial wastewater disinfection and decontamination by advanced oxidation processes (AOPs): Current issues and future trends. *Water*. 2021;13(4):560. <http://dx.doi.org/10.3390/w13040560>
19. Nebukina I. A., Smirnova N. N., Rvachev I. S. The effect of organic compounds on removal efficiency of ammonium ions from wastewater by oxidation method. *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im. V. I. Vernadskogo*. 2015;(2):28–33. <https://doi.org/10.17277/voprosy.2015.02.pp.028-033>
20. Anusuyadevi P. R., Kumar D. Ja. P., Omkaara Jyothi A. D. H. V., Patwardhan N. S., Janani V., Mol A. Towards viable eco-friendly local treatment of blackwater in sparsely populated regions. *Water*. 2023;15(3):542. <https://doi.org/10.3390/w15030542>
21. Barros A., Vecino X., Reig M., Cortina J. L. Coagulation and flocculation optimization process applied to the sidestream of an urban wastewater treatment plant. *Water*. 2022;14(24):4024. <https://doi.org/10.3390/w14244024>
22. Muscarella S. M., Laudicina V. A., Badalucco L., Conte P., Mannina G. Ammonium recovery from synthetic wastewaters by using zeolitic mixtures: a desorption batch-study. *Water*. 2023;15(19):3479. <https://doi.org/10.3390/w15193479>



#### Информация об авторах

**Фугаева Анастасия Михайловна**, ассистент кафедры инженерных систем и сооружений, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация, [nastyafugaeva@mail.ru](mailto:nastyafugaeva@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-7097-1775>

**Вялкова Елена Игоревна**, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры инженерных систем и сооружений, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация, [vyalkova-e@yandex.ru](mailto:vyalkova-e@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0003-2232-1107>

#### Information about the authors

**Anastasiia M. Fugaeva**, Assistant in the Department of Engineering Systems and Structures, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation, [nastyafugaeva@mail.ru](mailto:nastyafugaeva@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-7097-1775>

**Elena I. Vialkova**, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor in the Department of Engineering Systems and Structures, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation, [vyalkova-e@yandex.ru](mailto:vyalkova-e@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0003-2232-1107>

Получена 24 декабря 2024 г., одобрена 17 февраля 2025 г., принята к публикации 06 марта 2025 г.

Received 24 December 2024, Approved 17 February 2025, Accepted for publication 06 March 2025