Статья поступила в редакцию: 25.08.2026
Статья принята к публикации: 31.08.2026
Статья опубликована: 28.10.2026

УДК 628.31:663.4:574

DOI: 10.32743/UniTech.2026.151.10.23557

Экологическая опасность органических веществ, взвешенных частиц, коллоидных соединений, биогенных элементов и моющих средств в сточных водах пивоваренного производства

Мухамедов Кабилджан Гафурович
д-р техн. наук, проф.
Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: mukhamedovanilufarkhon@gmail.com
Насирова Нилуфархон Кабилджановна
канд. хим. наук, доц.
Ташкентский государственный аграрный университет
Республика Узбекистан, г. Ташкент
Ши-Сянь Вячеслав Викторович
соискатель
Ташкентский химико-технологический институт
Республика Узбекистан, г. Ташкент
Мухамедов Жамалиддин Кабилджанович
канд. хим. наук, PhD
Ташкентский химико-технологический институт
Республика Узбекистан, г. Ташкент

Ecological hazard of organic substances, suspended particles, colloidal compounds, biogenic elements and detergents in brewery wastewater

Mukhamedov Kabildjan Gafurovich
doctor of Technical Sciences, Professor
Islam Karimov Tashkent State Technical University
Republic of Uzbekistan, Tashkent
Nasirova Nilufarkhon Kabildjanovna
candidate of Chemical Sciences, Associate Professor
Tashkent State Agrarian University
Republic of Uzbekistan, Tashkent
Shi-Sian Vyacheslav Viktorovich
Applicant Tashkent Institute of Chemical Technology
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Библиографическое описание: Экологическая опасность органических веществ, взвешенных частиц, коллоидных соединений, биогенных элементов и моющих средств в сточных водах пивоваренного производства // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Мухамедов К.Г. [и др.]. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23557

Mukhamedov Jamaliddin Kabildjanovich
Researcher
Tashkent Institute of Chemical Technology
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Аннотация

Целью исследования является оценка экологической опасности основных групп загрязняющих веществ, содержащихся в сточных водах пивоваренного производства, и обоснование последовательной схемы их снижения. Методологической основой работы служил компонентный анализ состава производственных стоков с выделением органических веществ, взвешенных частиц, коллоидных соединений, биогенных элементов, а также остаточных моющих и дезинфицирующих средств. Для каждой группы оценивались источник поступления, физико-химическое состояние, влияние на процессы очистки и потенциальное воздействие на водные объекты. Показано, что высокая органическая нагрузка формируется за счёт остатков солода, сусла, дрожжей, белковых и углеводных соединений и сопровождается ростом ХПК и БПК и риском кислородного дефицита. Взвешенные и коллоидные частицы повышают мутность и затрудняют отстаивание, соединения азота и фосфора создают риск эвтрофикации, а моющие средства могут изменять pH и подавлять активность микроорганизмов биологической очистки. Установлено, что наиболее высокий уровень экологической опасности характерен для органических веществ, коллоидных соединений и биогенных элементов. Практическим результатом исследования является поэтапная схема экологического контроля и очистки, включающая усреднение, механическое отделение примесей, регулирование pH, коагуляцию, флокуляцию, отстаивание, фильтрацию, биологическую очистку и сорбционную доочистку.

Abstract

The aim of the study is to assess the ecological hazard of the main groups of pollutants contained in brewery wastewater and to substantiate a sequential scheme for reducing their impact. The methodological basis was a component analysis of industrial wastewater with identification of organic substances, suspended particles, colloidal compounds, biogenic elements, and residual cleaning and disinfecting agents. For each group, the source of entry, physicochemical state, influence on treatment processes, and potential impact on receiving waters were evaluated. The results show that a high organic load is formed by residues of malt, wort, yeast, proteins, and carbohydrates and is accompanied by increased COD and BOD and a risk of oxygen depletion. Suspended and colloidal particles increase turbidity and complicate sedimentation, nitrogen and phosphorus compounds create a risk of eutrophication, while detergents may alter pH and inhibit microorganisms involved in biological treatment. The highest ecological hazard was attributed to organic substances, colloidal compounds, and biogenic elements. The practical result of the study is a stepwise environmental control and treatment scheme including equalization, mechanical separation, pH adjustment, coagulation, flocculation, sedimentation, filtration, biological treatment, and sorption post-treatment.

Ключевые слова: сточные воды пивоваренного производства, органические вещества, взвешенные частицы, коллоидные соединения, биогенные элементы, моющие средства, экологическая опасность.

Keywords: brewery wastewater, organic substances, suspended particles, colloidal compounds, biogenic elements, detergents, ecological hazard.

Введение

Пивоваренное производство относится к числу водоемких отраслей пищевой промышленности. Вода используется при подготовке сырья, затирании солода, получении сусла, ферментации, охлаждении, мойке технологического оборудования, санитарной обработке емкостей и розливе готовой продукции. В результате образуются производственные сточные воды сложного состава, отличающиеся значительной изменчивостью по расходу, pH и концентрации загрязняющих веществ [6,с.463;11,с.235].

Экологическая опасность сточных вод пивоваренного производства определяется не только высоким содержанием органических веществ, но и присутствием взвешенных частиц, коллоидных соединений, биогенных элементов и остаточных моющих средств. Органические вещества повышают химическое и биохимическое потребление кислорода, взвешенные частицы увеличивают мутность, а азот- и фосфорсодержащие соединения создают предпосылки для эвтрофикации водных объектов [9, с. 1; 10].

Особую проблему представляют сточные воды, формирующиеся после санитарной мойки оборудования. В их составе могут присутствовать щелочные и кислотные моющие средства, поверхностно-активные вещества и дезинфицирующие компоненты. При поступлении таких стоков на биологические очистные сооружения без предварительного регулирования pH возможно угнетение микробного сообщества активного ила и снижение эффективности биологической очистки [4; 7].

В современных условиях для оценки экологической безопасности пивоваренных предприятий необходимо анализировать не отдельный показатель загрязнения, а совокупность факторов, определяющих воздействие сточных вод на природные и искусственные водные системы. К таким факторам относятся ХПК, БПК, содержание взвешенных веществ, мутность, pH, содержание азота и фосфора, а также остаточные концентрации моющих средств [4; 5].

Цель исследования — оценить экологическую опасность органических веществ, взвешенных частиц, коллоидных соединений, биогенных элементов и моющих средств в сточных водах пивоваренного производства и предложить технологическую схему их поэтапного снижения.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи: систематизировать основные источники образования загрязняющих компонентов; определить характер их экологического воздействия; оценить относительный уровень опасности каждой группы загрязнителей; обосновать последовательность технологических стадий, направленных на снижение экологической нагрузки сточных вод.

Материалы и методы

Объектом исследования являются производственные сточные воды пивоваренных предприятий, формирующиеся при переработке солода, ферментации, фильтрации, мойке оборудования, санитарно-дезинфекционной обработке и техническом обслуживании производственных помещений. В отличие от коммунальных стоков, такие воды характеризуются выраженной неравномерностью состава, что обусловлено цикличностью технологических операций и периодичностью санитарной мойки [6, с. 463; 12, с. 4363].

Методологической основой исследования служил компонентный подход, при котором загрязняющие вещества были разделены на пять основных групп: органические вещества; взвешенные частицы; коллоидные соединения; биогенные элементы; моющие и дезинфицирующие средства. Для каждой группы оценивались источник поступления, физико-химическое состояние в воде, влияние на очистные сооружения и потенциальное воздействие на водные объекты.

К органическим веществам отнесены остатки солода, сусла, дрожжей, белковых веществ, углеводов, спиртов и органических кислот. Их экологическая опасность оценивалась через способность повышать ХПК и БПК, а также через риск снижения концентрации растворенного кислорода при биохимическом окислении в природной водной среде [9, с. 1; 11, с. 236].

К взвешенным частицам отнесены остатки сырья, частицы дрожжей, механические примеси и нерастворимые органические фрагменты. Их влияние оценивалось по способности повышать мутность, формировать донные отложения и ухудшать световой режим водной среды. Коллоидные соединения рассматривались как наиболее трудновыделяемая фракция, поскольку они сохраняют дисперсную устойчивость и плохо удаляются при обычном отстаивании [8, с. 475; 12, с. 4365].

Биогенные элементы представлены соединениями азота и фосфора, поступающими с остатками сырья, дрожжевыми клетками и моющими растворами. Их опасность оценивалась с позиции возможного усиления эвтрофикации. Моющие средства анализировались как фактор изменения pH и потенциального токсического воздействия на микробные сообщества биологических очистных сооружений [5; 7].

Для качественной оценки экологической опасности использована градация: низкая, средняя, средне-высокая и высокая. Уровень опасности устанавливался по совокупности признаков: влияние на кислородный режим, способность повышать мутность, устойчивость к механическому удалению, риск эвтрофикации, токсическое воздействие на микроорганизмы и усложнение дальнейшей очистки.

С целью практического обоснования мер снижения экологической опасности разработана поэтапная технологическая схема очистки, включающая сбор и усреднение сточных вод, механическое отделение примесей, регулирование pH, коагуляцию, флокуляцию, отстаивание, фильтрацию, биологическую очистку и сорбционную доочистку. Такой подход соответствует современным представлениям о необходимости сочетания физико-химических и биологических методов при очистке пищевых промышленных стоков [4; 5; 7].

Результаты и обсуждение

Экологически опасные компоненты в сточных водах пивоваренного производства образуются на различных стадиях технологического процесса. При подготовке сырья и переработке солода в сточные воды поступают органические вещества, углеводы и взвешенные частицы. На стадиях ферментации и фильтрации увеличивается содержание остатков дрожжей, белковых соединений и коллоидных частиц. В процессе мойки оборудования и санитарной обработки в состав сточных вод попадают щелочные, кислотные и поверхностно-активные моющие средства.

В результате указанных процессов сточные воды пивоваренного производства характеризуются повышенными значениями ХПК и БПК, высокой мутностью, коллоидной устойчивостью, наличием биогенных элементов и изменчивостью pH. При сбросе таких вод в природные водные объекты без достаточной очистки возможно развитие кислородного дефицита, эвтрофикации, образования донных отложений и нарушения микробиологического равновесия водной среды [10; 11, с. 235].

Органические вещества являются наиболее значимой группой загрязнителей. Их источниками являются остатки солода, сусла, дрожжей, сахаров, белков, спиртов и органических кислот. При биохимическом разложении органики активно расходуется растворенный кислород, что приводит к ухудшению условий существования гидробионтов. Поэтому органическая нагрузка сточных вод пивоваренного производства относится к группе высокой экологической опасности [4; 9, с. 1].

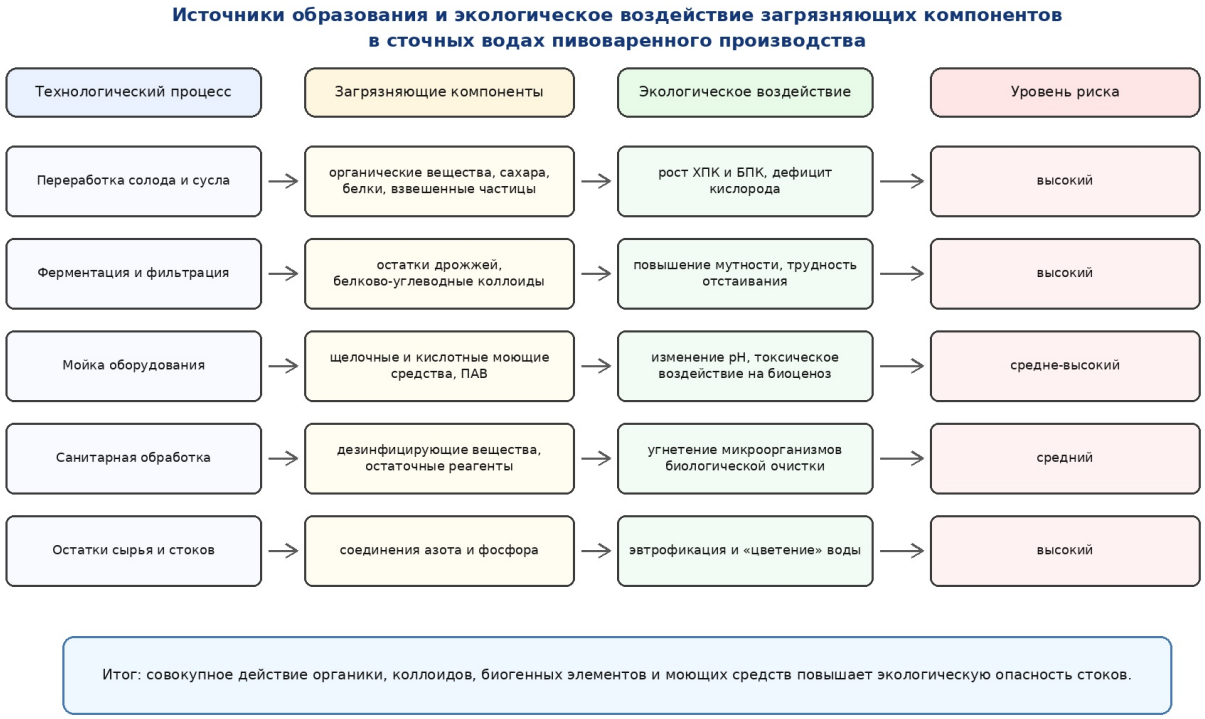


Рисунок 1. Источники образования экологически опасных компонентов в сточных водах пивоваренного производства и направления их воздействия

Как показано на рисунке 1, экологическая опасность сточных вод пивоваренного производства формируется под воздействием нескольких факторов. Органические вещества увеличивают потребление кислорода в воде, взвешенные частицы снижают прозрачность водной среды, а коллоидные соединения не удаляются полностью при обычном механическом отстаивании. Биогенные элементы усиливают процессы эвтрофикации, а остатки моющих средств могут оказывать отрицательное влияние на микроорганизмы, участвующие в биологической очистке.

Взвешенные частицы повышают мутность и создают условия для образования донных отложений. При накоплении органических взвесей в осадке усиливаются анаэробные процессы, сопровождающиеся появлением неприятного запаха и вторичным загрязнением. В условиях природного водоема увеличение мутности также снижает проникновение света в толщу воды и ухудшает условия фотосинтеза водных растений.

Коллоидные соединения представляют особую технологическую проблему. Они образуются за счет белково-углеводных комплексов, тонкодисперсных органических частиц и продуктов распада дрожжевых клеток. Из-за малого размера и электрической устойчивости такие частицы плохо осаждаются без предварительной коагуляции. Поэтому наличие коллоидной фракции повышает экологическую опасность стоков и одновременно усложняет технологию очистки [8, с. 475; 12, с. 4367].

Биогенные элементы, прежде всего соединения азота и фосфора, способны стимулировать развитие водорослей и фитопланктона. При поступлении таких соединений в водные объекты возрастает риск эвтрофикации, сопровождающейся «цветением» воды, накоплением органической биомассы и последующим дефицитом кислорода при ее разложении [4; 10].

Моющие и дезинфицирующие средства поступают в стоки при санитарной обработке оборудования, трубопроводов и емкостей. Их опасность связана с резким изменением pH, присутствием поверхностно-активных веществ и возможным токсическим влиянием на микробные сообщества. При отсутствии предварительного регулирования pH такие стоки могут снизить эффективность биологической очистки, поскольку активный ил чувствителен к резким колебаниям кислотности [7; 3].

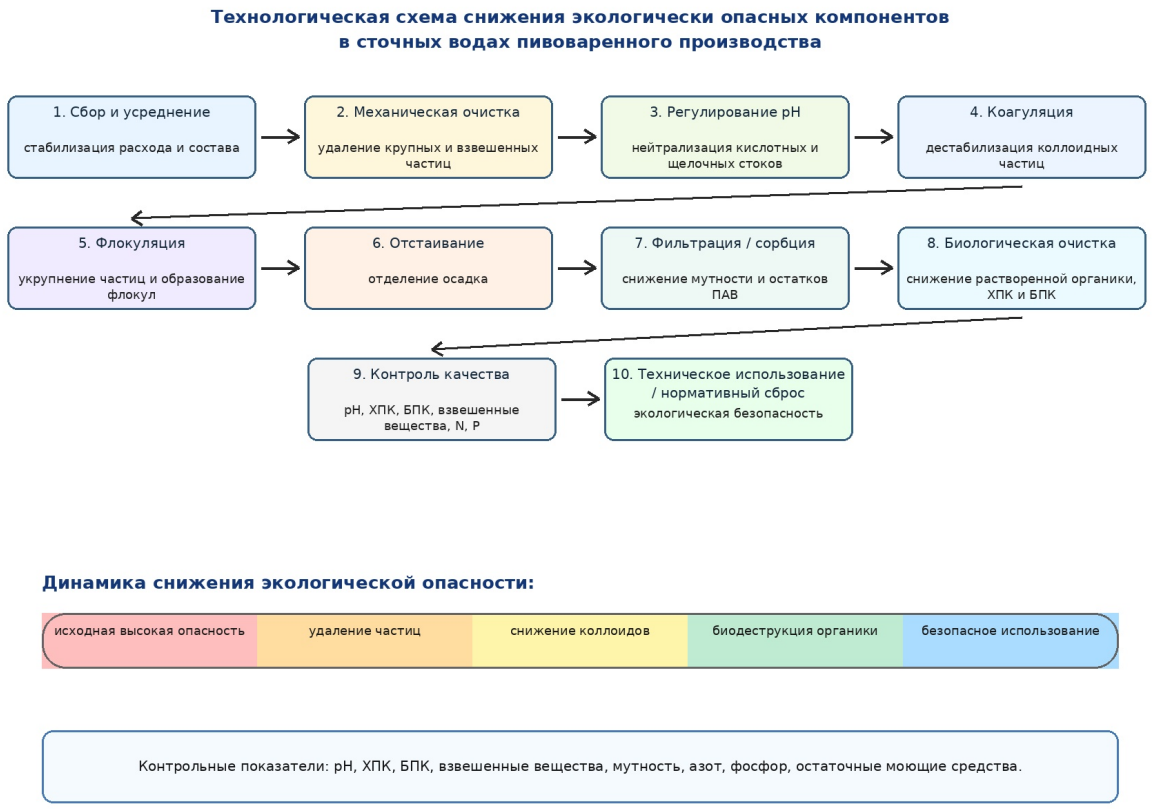


Рисунок 2. Технологическая схема снижения экологически опасных компонентов в сточных водах пивоваренного производства

Представленная технологическая схема позволяет последовательно снижать основные факторы экологической опасности сточных вод пивоваренного производства. На первом этапе сточные воды собираются в специальном резервуаре и подвергаются усреднению. Данный этап уменьшает резкие колебания состава и расхода сточных вод, обеспечивая стабильность последующих процессов очистки.

На стадии механической очистки удаляются крупные частицы, остатки сырья, солода и дрожжей. Этот процесс может осуществляться с использованием решеток, песколовок или механических фильтров. В результате снижается первичная мутность воды и уменьшается механическая нагрузка на последующие стадии очистки.

На этапе регулирования pH кислотная или щелочная реакция среды, вызванная остатками моющих средств, доводится до оптимального значения. Это имеет важное значение для эффективности коагуляции и биологической очистки. При резком отклонении pH снижается действие коагулянтов и подавляется активность микроорганизмов, участвующих в разложении органических веществ.

Коагуляция направлена на дестабилизацию коллоидных и мелкодисперсных частиц. Для этого могут применяться коагулянты на основе солей железа или алюминия. Под действием коагулянтов происходит нейтрализация электрического заряда коллоидных частиц, после чего они способны объединяться в более крупные агрегаты [5; 8, с. 475].

На стадии флокуляции с применением полимерных флокулянтов мелкие агрегаты превращаются в крупные хлопьевидные образования — флокулы. Это ускоряет процесс отстаивания и повышает эффективность удаления взвешенных и коллоидных веществ из сточных вод [12, с. 4364].

В процессе отстаивания сформированные флокулы отделяются в виде осадка. Осадок может содержать органические вещества, остатки дрожжей, гидроксиды коагулянтов и механические примеси. Поэтому сгущение, обезвоживание и безопасная утилизация осадка должны рассматриваться как обязательная часть общей технологической схемы [4; 2, с. 51].

Биологическая очистка обеспечивает разложение растворенных органических веществ с участием микроорганизмов. Данный этап способствует существенному снижению ХПК и БПК. Если после биологической очистки в воде сохраняются остатки моющих средств, окрашенные органические соединения или специфический запах, целесообразно использовать сорбционную доочистку [7; 10].

Таблица 1. Загрязняющие компоненты сточных вод пивоваренного производства и процессы их снижения

Загрязняющий компонент	**Основной источник**	**Экологическая опасность**	**Уровень опасности**	**Процесс снижения**
Органические вещества	солод, сусло, дрожжи, белки, углеводы	рост ХПК и БПК, кислородный дефицит	высокий	биологическая очистка, сорбция
Взвешенные частицы	остатки сырья, механические примеси	мутность, донные отложения	средне-высокий	механическая очистка, отстаивание
Коллоидные соединения	белково-углеводные комплексы	затруднение отстаивания, снижение эффективности очистки	высокий	коагуляция, флокуляция
Биогенные элементы	соединения азота и фосфора	эвтрофикация, «цветение» воды	высокий	биологическая очистка, реагентное осаждение
Моющие средства	щелочные, кислотные и ПАВ-содержащие растворы	изменение pH, токсическое влияние на микроорганизмы	средне-высокий	регулирование pH, сорбция, биологическая очистка

Как видно из таблицы 1, для каждой группы загрязняющих компонентов требуется определенный механизм очистки. Механическая очистка снижает содержание взвешенных частиц, но практически не влияет на растворенные органические вещества и устойчивые коллоидные соединения. Коагуляция и флокуляция эффективно удаляют коллоидные примеси, однако для разложения растворенных органических веществ необходима биологическая очистка. Поэтому для сточных вод пивоваренного производства наиболее рациональной является комбинированная технологическая схема, в которой отдельные стадии взаимно дополняют друг друга.

Заключение

Сточные воды пивоваренного производства относятся к экологически значимым промышленным стокам, поскольку содержат органические вещества, взвешенные частицы, коллоидные соединения, биогенные элементы и остаточные моющие средства. Совокупное действие этих компонентов приводит к повышению ХПК и БПК, увеличению мутности, риску эвтрофикации, изменению pH и нарушению биологической устойчивости очистных сооружений.

Наиболее высокий уровень экологической опасности характерен для органических веществ, коллоидных соединений и биогенных элементов. Органические вещества вызывают расход растворенного кислорода, коллоидные соединения осложняют механическое удаление загрязнений, а азот- и фосфорсодержащие компоненты усиливают процессы эвтрофикации. Взвешенные частицы и моющие средства имеют средне-высокий уровень опасности, поскольку они ухудшают физическое состояние воды и могут снижать активность микроорганизмов биологической очистки.

Установлено, что эффективное снижение экологической опасности возможно только при использовании поэтапной комплексной схемы очистки. Механическая стадия необходима для удаления крупных и взвешенных частиц, регулирование pH — для нейтрализации влияния санитарных стоков, коагуляция и флокуляция — для удаления коллоидной фракции, биологическая очистка — для разложения растворенной органики, а сорбционная доочистка — для снижения остаточных моющих веществ и специфических органических примесей.

Практическое значение работы заключается в возможности использования предложенной схемы при разработке локальных очистных сооружений пивоваренных предприятий. Рекомендуется проводить регулярный мониторинг pH, ХПК, БПК, мутности, взвешенных веществ, соединений азота и фосфора, а также контролировать поступление моющих средств в производственные стоки. Внедрение комплексного подхода позволит снизить экологическую нагрузку на водные объекты, повысить устойчивость очистных сооружений и создать условия для безопасного сброса или технического повторного использования очищенной воды.

Список литературы

1. Воронов Ю.В., Яковлев С.В. Водоотведение и очистка сточных вод. Москва, Издательство Ассоциации строительных вузов. – 2006. – 704 с.
2. Мухамедов К.Г., Насирова Н.К., Мухамедов Ж.К., Абдурахманов О.Х. Очистка сточных вод гальванических производств реагентным методом. Universum: технические науки. 2023. № 7(112). С. 51–56.
3. Тукташева Е.Ю. Исследование эффективности предварительной реагентной обработки сточных вод пивоваренного производства. Градостроительство и архитектура. 2021. Т. 11. № 3. С. 56–61. DOI: 10.17673/Vestnik.2021.03.09.

4. Ashraf A., Ramamurthy R., Rene E.R. Wastewater treatment and resource recovery technologies in the brewery industry: Current trends and emerging practices. Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2021. Vol. 47. Article 101432. DOI: 10.1016/j.seta. 2021.101432.
5. Carnevale Miino M., Torretta V., Repková M., Hlavínek P., Telek J. Treatment of a Real Brewery Wastewater with Coagulation and Flocculation: Impact on Organic Substance and Nutrient Concentrations. Applied Sciences. 2025. Vol. 15. No. 6. Article 2999. DOI: 10.3390/ app15062999.
6. Fillaudeau L. Blanpain-Avet P., Daufin G. Water, wastewater and waste management in brewing industries // Journal of Cleaner Production. – 2006. – № 2006. – P. 463–471. – DOI: 10.1016/ j.jclepro.2005.01.002.
7. Garomsa F.S., Berhanu Y.M., Desta W.M., Bidira F. Indigenous bio-coagulant assisted electrocoagulation process for the removal of contaminants from brewery wastewater: Performance evaluation and response surface methodology optimization. Heliyon. 2024. Vol. 10. No. 22. Article e40394. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e40394.
8. Li J., Xiao Z., Gu J., Yang Z., Dong W., Liu Y., Xu Z., Zhu W. Brewery wastewater as an alternative external carbon source for full-scale municipal wastewater treatment plants: A performance, cost, and environmental assessment // Journal of Water Process Engineering. – 2025. – DOI: 10.1016/j.jwpe.2025.107483.
9. Olajire A.A. The brewing industry and environmental challenges // Journal of Cleaner Production. – 2012. – № 2012. – P. 1–21. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2012.03.003.
10. Shumbe T., Angassa K., Tessema I., Tibebu S., Abewaa M., Getu T. Performance evaluation of a brewery wastewater treatment plant: A case of Heineken Brewery, Addis Ababa, Ethiopia. Heliyon. 2024. Vol. 10. No. 23. Article e40719. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e40719.
11. Simate G.S., Cluett J., Iyuke S.E., Musapatika E.T., Ndlovu S., Walubita L.F., Alvarez A.E. The treatment of brewery wastewater for reuse: State of the art. Desalination. 2011. Vol. 273. No. 2–3. P. 235–247. DOI: 10.1016/j.desal.2011.02.035.
12. Teh C.Y., Budiman P.M., Shak K.P.Y., Wu T.Y. Recent advancement of coagulation-flocculation and its application in wastewater treatment. Industrial & Engineering Chemistry Research. 2016. Vol. 55. No. 16. P. 4363–4389. DOI: 10.1021/acs.iecr.5b04703.

References

1. Voronov Yu.V., Yakovlev S.V. [Water disposal and wastewater treatment]. Moscow, Izdatelstvo Assotsiatsii stroitelnykh vuzov Publ., 2006. 704 P. (In Russ.).
2. Mukhamedov K.G., Nasirova N.K., Mukhamedov J.K., Abdurakhmanov O.H. [Reagent treatment of wastewater from electroplating industries]. Universum: tekhnicheskie nauki, 2023, no. 7(112), P. 51–56. 3. [Study of efficiency of pre-reagent treatment of wastewater from brewery]. Gradostroitelstvo i arkhitektura, 2021, vol. 11, no. 3, P. 56–61. DOI: 10.17673/ Vestnik.2021.03.09. (In Russ.). (In Russ.).

3. Ashraf A., Ramamurthy R., Rene E.R. Wastewater treatment and resource recovery technologies in the brewery industry: Current trends and emerging practices. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2021, vol. 47, article 101432. DOI: 10.1016/j.seta.2021.101432.
4. Carnevale Miino M., Torretta V., Repková M., Hlavínek P., Telek J. Treatment of a Real Brewery Wastewater with Coagulation and Flocculation: Impact on Organic Substance and Nutrient Concentrations. Applied Sciences, 2025, vol. 15, no. 6, article 2999. DOI: 10.3390/app15062999.
5. Fillaudeau L. Blanpain-Avet P., Daufin G. Water, wastewater and waste management in brewing industries // Journal of Cleaner Production. – 2006. – No. 5. – P. 463–471. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2005.01.002.
6. Garomsa F.S., Berhanu Y.M., Desta W.M., Bidira F. Indigenous bio-coagulant assisted electrocoagulation process for the removal of contaminants from brewery wastewater: Performance evaluation and response surface methodology optimization. Heliyon, 2024, vol. 10, no. 22, article e40394. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e40394.
7. Li J., Xiao Z., Gu J., Yang Z., Dong W., Liu Y., Xu Z., Zhu W. Brewery wastewater as an alternative external carbon source for full-scale municipal wastewater treatment plants: A performance, cost, and environmental assessment // Journal of Water Process Engineering. – 2025. – DOI: 10.1016/j.jwpe.2025.107483.
8. Olajire A.A. The brewing industry and environmental challenges // Journal of Cleaner Production. – 2012. – P. 1–21. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2012.03.003.
9. Shumbe T., Angassa K., Tessema I., Tibebu S., Abewaa M., Getu T. Performance evaluation of a brewery wastewater treatment plant: A case of Heineken Brewery, Addis Ababa, Ethiopia. Heliyon, 2024, vol. 10, no. 23, article e40719. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e40719.
10. Simate G.S., Cluett J., Iyuke S.E., Musapatika E.T., Ndlovu S., Walubita L.F., Alvarez A.E. The treatment of brewery wastewater for reuse: State of the art. Desalination, 2011, vol. 273, no. 2–3, P. 235–247. DOI: 10.1016/j.desal.2011.02.035.
11. Teh C.Y., Budiman P.M., Shak K.P.Y., Wu T.Y. Recent advancement of coagulation-flocculation and its application in wastewater treatment. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2016, vol. 55, no. 16, P. 4363–4389. DOI: 10.1021/acs.iecr.5b04703.