

УДК 628.355

С. О. Лукашевич, Р. М. Маркевич
Белорусский государственный технологический университет

БИОЛОГИЧЕСКАЯ ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД ПИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА (ОБЗОР)

Способы и технологии, рассмотренные в обзоре литературных источников, относятся к области очистки промышленных сточных вод, в частности к методам очистки сточных вод, образующихся при производстве пива. Пивоваренная промышленность является одним из самых больших потребителей свежей воды на производственные нужды, а образующиеся сточные воды характеризуются высоким уровнем содержания органических загрязняющих веществ и требуют повышенного внимания к их удалению перед сбросом очищенных сточных вод в окружающую среду.

Целью данной работы является обзор способов очистки сточных вод пивного производства, в основе которых лежит технология биологического удаления загрязняющих веществ. Обзор фокусируется на ключевых вопросах: водопотребление пивоваренной промышленности, количество и состав образующихся сточных вод, их экологическое воздействие, традиционные способы очистки сточных вод, а также современные направления развития данной области.

В обзоре описаны основные конструктивные особенности различных биореакторов, принципы очистки, положенные в основу их работы, и отмечено, насколько эффективно данные биореакторы могут быть использованы для очистки сточных вод пивного производства.

Ключевые слова: сточные воды, гранулированный активный ил, пивное производство, химическая потребность в кислороде, анаэробно-аэробный метод очистки, UASB-реактор, SBR-реактор.

Для цитирования: Лукашевич С. О., Маркевич Р. М. Биологическая очистка сточных вод пивного производства // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. 2022. № 1 (253). С. 66–79.

S. O. Lukashevich, R. M. Markevich
Belarusian State Technological University

BIOLOGICAL TREATMENT OF BREWERY WASTEWATER (OVERVIEW)

This literature review considers methods and techniques for industrial wastewater treatment, particular for wastewater generating in beer processing. Beer production are one of the largest users of fresh water for processing needs and the resulting wastewater is characterized by high level of organic pollutants content and require higher attention for remediation before discharge to environment.

This paper aims to review methods of brewery wastewater treatment based on biological pollutants removal technology. The review focuses on some key issues: water consumption and wastewater generation, its quantity and composition, the environmental impact, traditional wastewater treatment methods as well as modern directions of development in this area.

It is described the main constructive features of various bioreactors, the underlying principles of their work. It is noted how efficiently these bioreactors can be utilized for treating brewery wastewater.

Key words: waste water, granulated activated sludge, brewery production, chemical oxygen demand, anaerobic-aerobic treatment method, UASB-reactor, SBR-reactor.

For citation: Lukashevich S. O., Markevich R. M. Biological treatment of brewery wastewater. *Proceeding of BSTU, issue 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Geoecology*, 2022, no. 1 (253), pp. 66–79 (In Russian).

Введение. Пивоваренная промышленность составляет важный экономический сегмент любой страны. По потреблению среди напитков пиво занимает пятое место в мире после чая, газированных напитков, молока и кофе [1].

Пивоварение – многостадийное производство, которое сопровождается образованием загрязняющих веществ, поступающих в окружающую среду – воздух, воду и почву.

Загрязняющими компонентами сточных вод являются побочные продукты (например, отработанный зерно от затирания, избыточная масса дрожжей и т. д.). Кроме того, сточные воды образуются при мойке резервуаров, бутылок, машин и производственных помещений. Следует отметить, что сточные воды отдельных стадий процесса изменчивы. Например, при мойке бутылок образуются большие объемы сточных

вод, но они вносят лишь незначительную часть от общего содержания органических веществ в сточных водах, сбрасываемых в процессе пивоварения. С другой стороны, сточные воды процессов брожения и фильтрования вносят 97% биологической потребности в кислороде (БПК), но, как правило, образуются в небольшом количестве, составляя около 3% от общего объема сточных вод [2].

Количество образующихся сточных вод зависит от потребления воды на производственные нужды. Как правило, расход воды на объем произведенного пива составляет около 6–9 м³ на 1 м³ производимого пива, однако количество образуемых сточных вод может составлять от 1 до 3 м³/м³, поскольку часть воды входит в готовый продукт, утилизируется с побочными продуктами и теряется при испарении [3].

В странах с интенсивной эксплуатацией природных ресурсов, например в Китае, потребление пресной воды составляет 10–40 м³ на 1 м³ производимого пива и образуется 7–35 м³ сточных вод [4].

Источниками образования сточных вод на пивоваренных заводах являются различные производственные подразделения, сточные воды которых поступают в общезаводскую канализацию [5]: отделение приготовления сусле; бродильное отделение; отделение варочного цеха; отделение фильтрации; отделение наполнения; моечное отделение; отделение котельной, компрессорной; отделение транспортного цеха; туалеты, душевые, столовая.

Наиболее существенная часть в водном балансе пивоваренных заводов приходится на теплообменные воды. Вода для целей охлаждения может быть использована однократно, но может рециркулировать. Обратная система требует межоперационного охлаждения воды, но более выгодна в отношении расхода воды, а при недостатке свежей воды необходима [6].

Сброс сточных вод пивоваренного производства в водные объекты без предварительной очистки приводит к явлению эвтрофикации водоемов и, как следствие, к снижению растворенного кислорода и прозрачности воды, появлению неприятного запаха, увеличению расходов на водоподготовку, а также к подкислению воды и нарушению пищевых цепей (явление acidification) [7].

Таким образом, сброс неочищенных (или частично очищенных) сточных вод пивоваренных заводов в водные объекты может представлять потенциально серьезную проблему их загрязнения. По мере того как ужесточаются требования по сбросу сточных вод, призыв к повторному использованию воды и поиску новых решений в области очистки сточных вод набирает обороты.

Задачей данного обзора является рассмотрение состава сточных вод пивного производства, анализ существующих и развивающихся методов очистки данного вида сточных вод, обсуждение результатов лабораторных и полномасштабных исследований в этом направлении.

Основная часть. *Состав сточных вод.* Состав сточных вод пивного производства может значительно колебаться, так как он зависит от различных процессов, которые имеют место при производстве пива [3].

Одним из важных факторов, определяющих состав сточных вод, являются потери пива, которые могут составлять от 8 до 15% и значительно увеличивают концентрацию загрязняющих веществ в сточных водах [8].

Источниками загрязняющих компонентов сточных вод пивоваренных заводов являются [9–11]:

- остатки сусле и пива;
- промывная вода;
- сточные воды, содержащие взвеси;
- сточные воды, содержащие остатки хмеля;
- сточные воды со станции СІР (Cleaning in Place, т. е. безразборная мойка);
- темные щелочные сточные воды из поливинилпирролидинового фильтра;
- сточные воды, содержащие кизельгур;
- щелочные ополоски;
- отработанный раствор из бутыломоечной машины с нерастворенными твердыми веществами, такими как бумажная пульпа от этикеток, шлам и прочие загрязнения;
- растворимые вещества, такие как клей, едкий натр, соли металлов;
- следы масел, жиров, средства для смазывания ленты транспортера;
- остатки пива из возвратных бутылок, бочек и кегов, смывы остатков пива из разливочного аппарата.

Сточные воды пивного производства можно отнести к разряду концентрированных. Наиболее загрязненные сточные воды получают от замачивания зерна, экстракции хмеля, промывки фильтромассы, отмывки дрожжей. По объему они составляют около 27% от всех сточных вод. Дрожжевые отделения пивоваренных заводов дают менее загрязненные сточные воды [9].

Большая часть сточных вод пивоваренных заводов поступает в результате операций по очистке и содержит щелочные моющие средства (каустическая сода), дезинфицирующие средства, кислоты (фосфорная, азотная) и отходы процесса пивоварения. Так как в общий сток регулярно попадают моечные воды из установок СІР, рН загрязненных сточных вод колеблется в диапазоне 5–9 [10].

Сточные воды пивоваренных заводов, охлаждающиеся в охлаждающих и моечных установках, имеют высокие показатели химической потребности в кислороде (ХПК), но они малотоксичны [12]. Сточные воды бутылкомоечных отделений пивзавода образуются в удельном количестве 3 дм³ на 1 дм³ вместимости бутылки и характеризуются БПК₅ 280–310 мг О₂/дм³ [9].

Содержание азота и фосфора в основном зависит от способа обращения с сырьем и количества отработанных дрожжей, присутствующих в сточных водах. Высокое содержание фосфора также может быть результатом использования химикатов в установке СР [3]. Органические компоненты в сточных водах пивного производства, как правило, легко поддаются биологическому удалению и в основном состоят из сахаров, растворимого крахмала, этанола, летучих жирных кислот и т. д. Соотношение БПК_{полн}/ХПК составляет от 0,6 до 0,7. Эти показатели благоприятны для процессов биологической очистки [3]. Сточные воды обычно имеют температуру от 25 до 38°С, но иногда могут наблюдаться гораздо более высокие температуры [8].

На основании данных различных источников [12–19] в таблице приведены интервалы, в которых могут находиться показатели загрязнения сточных вод отделений пивного производства. В общем случае количество сточных вод, концентрация загрязнений зависят от принятой на данном предприятии технологии производства пива.

Биологические способы очистки. При планировании постройки очистных сооружений на пивоваренном производстве необходимо учитывать как экологические, так и социальноэкономические факторы. Процесс производства пива относится к периодическим производствам, поэтому для него характерны так называемые «залповые выбросы», когда концентрация загрязнений и количество сточных вод подвержены существенным колебаниям во времени [9]. Основная цель – выбрать технологию, достаточно гибкую, чтобы справляться с колебаниями нагрузок по

органическим веществам и другим характеристикам сточных вод, поддерживая при этом как можно более низкие капитальные и эксплуатационные затраты [20].

Сточные воды пивоварения содержат главным образом органические загрязнения в высоких концентрациях (ХПК до 5–7 тыс. мг/дм³). Биологическая очистка таких сточных вод традиционными аэробными методами с использованием аэротенков или биофильтров имеет ряд недостатков [12, 21, 22]:

- необходимость разбавления, что ведет к увеличению объемов перерабатываемой воды и очистных сооружений, потребляемой технологической воды, энергозатрат на прокачивание сточных вод;

- высокие энергозатраты на аэрацию сточных вод (до 70–80% совокупных энергозатрат на очистку);

- образование вторичного отхода – избытка биомассы (активного ила, биопленки), утилизация или захоронение которого также является экологической проблемой;

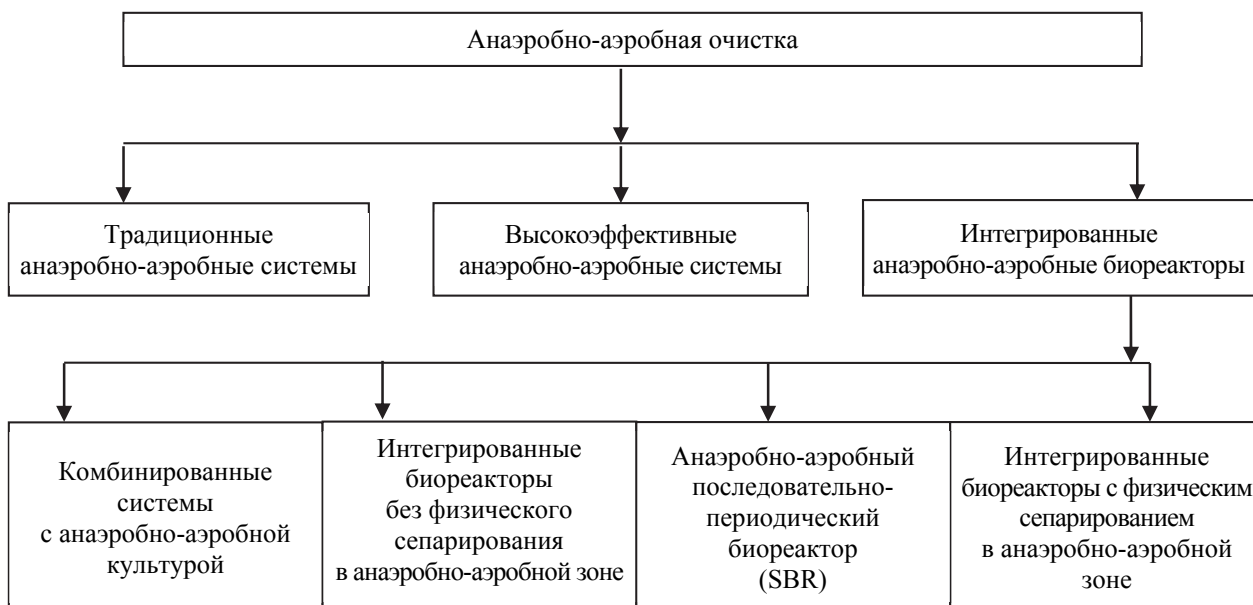
- необходимость введения дополнительных количеств биогенных элементов в случае их дефицита в перерабатываемом потоке, при этом их несбалансированное добавление приводит к дополнительному загрязнению окружающей среды;

- сложность обеспечения требуемых нормативов содержания остаточных загрязнений в случае очистки без разбавления сточных вод, особенно в условиях холодного климата и низкой способности к самоочищению природных экосистем.

Несмотря на отмеченные недостатки, аэробная очистка успешно применяется для очистки сточных вод пивоваренных заводов, однако в последнее время анаэробные системы стали более привлекательным вариантом [20]. При сбросе очищенных сточных вод в поверхностные водоемы наилучшим решением считается анаэробная предварительная очистка в сочетании с последующей дополнительной аэробной стадией для удаления загрязняющих веществ [3].

Показатели загрязнения сточных вод отделений пивного производства

Показатель	Значение показателя для обще-заводского потока	Значение показателя для отделений			
		замачивания зерна, экстракции хмеля, отмывки фильтромассы	дрожжевого	бродильного	моечного, розлива продукции
ХПК, мг О ₂ /дм ³	680–90 000	22 500–32 500	2000–5000	1030–1370	150–550
БПК ₅ , мг О ₂ /дм ³	1100–65 000	5000–10 000	1200–3000	850–1000	280–310
рН	3,5–10,0	3,2–3,9	4,0–7,2	4,2–4,9	5,0–9,0
Азот по Кьельдалю, мг/дм ³	110–210	–	60–250	320–450	–
Азот аммонийный, мг/дм ³	18–22	–	–	–	–
Фосфор общий, мг/дм ³	50–124	144–216	100	–	–
Взвешенные вещества, г/дм ³	5–8	10–15	0,5–2,0	0,75	0,09–0,2
Сульфаты, мг/дм ³	20–50	–	–	–	–



Типы интегрированных анаэробно-аэробных систем

При очистке сточных вод пивоваренных заводов анаэробная и аэробная обработки часто сочетаются. Как показано на рисунке, существует четыре типа интегрированных анаэробно-аэробных биореакторов [21].

Преимущества интегрированных анаэробно-аэробных биореакторов следующие [23]: во-первых, в анаэробном реакторе основная часть ХПК (70–85%) преобразуется в небольшом объеме биореактора в биогаз, который может успешно послужить в качестве замены ископаемого топлива в котельных пивоварни или как источник для выработки электроэнергии; во-вторых, на этапе последующей аэробной (или кислородной) обработки удаляется до 98% ХПК и биогенных элементов. Кроме того, несомненными преимуществами комбинированной анаэробно-аэробной очистки сточных вод пивоваренного завода по сравнению с полной аэробной являются положительный энергетический баланс, уменьшение образования осадка и незначительные площади очистных сооружений [21]. Недавняя разработка башенных анаэробных (например, с внутренней циркуляцией) и аэробных (например, эрлифтных) реакторов позволяет создавать чрезвычайно компактные конструкции очистных сооружений, при этом отвечающие строгим требованиям к качеству сбрасываемых вод [20].

Есть сообщения, что используя высокопроизводительные анаэробные реакторы, такие как анаэробный последовательный реактор периодического действия (AnSBR), реактор с восходящим потоком через слой анаэробного ила (UASB), анаэробный реактор с перегородками и слоем гранулированного ила (GRABBR), анаэробный

реактор с псевдооживленным слоем (AnFB), успешно очищают сточные воды пивоваренных заводов и получают удовлетворительное снижение ХПК [17, 24, 25]. Рассмотрим некоторые из них.

AnSBR. Анаэробный последовательный реактор периодического действия – это относительно недавно разработанная технология очистки сточных вод, которая была тщательно изучена благодаря своим преимуществам [8]:

- отсутствие засоров по сравнению с реакторами с неподвижным слоем (FBR);
- высокая эффективность как удаления ХПК, так и получения биогаза;
- отсутствие первичных и вторичных отстойников;
- гибкий контроль и т. д.

Последовательность процессов в AnSBR-реакторе следующая: в ходе фазы 1 (заполнения), входной поток направляется в реактор, где в свою очередь смешивается с биомассой, которая осталась от предыдущего цикла. Подача сточных вод может осуществляться в состоянии покоя либо при простом перемешивании. Фаза 2 (реакции) SBR-реакторов может организовываться различным образом (в аэробных, анаэробных условиях, с чередованием анаэробной, аноксидной и аэробных зон и т. д.). В данном случае для реактора AnSBR используется анаэробный резервуар. В конце фазы 3 (седиментации) производится выгрузка (фаза 4) очищенных сточных вод, избыточный активный ил отводится, а оставшийся готовится к новому циклу [26]. Испытание AnSBR-реактора с использованием гранулированного активного ила [8] показало хорошую степень удаления ХПК (90%) при средней нагрузке по ХПК 1,5–5,0 кг/(м³·сут);

кроме того, в процессе образовывался дополнительный источник энергии – биогаз (в количестве $2,4 \text{ дм}^3/(\text{дм}^3 \cdot \text{сут})$) с содержанием метана 50–80%.

Таким образом, анаэробный последовательный реактор периодического действия является потенциальной альтернативной технологией очистки сточных вод пивоваренных заводов.

UASB. Наиболее распространенной системой, применяемой на пивоваренных заводах, являются реакторы типа UASB с восходящим потоком сточных вод через слой анаэробного ила, в которых анаэробный ил присутствует в гранулированной форме, а сточные воды перекачиваются снизу-вверх в вертикальном резервуаре [27]. Сепаратор в верхней части реактора UASB служит для отделения биомассы от биогаза и сточных вод [20].

Реактор UASB эффективен при высоких концентрациях ХПК $> 2000 \text{ мг/дм}^3$ при средней нагрузке по ХПК $10 \text{ кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{сут})$ [28]. На 1 кг снижаемого ХПК образуется около $0,4\text{--}0,5 \text{ м}^3$ (н. у.) биогаза, который имеет в составе 70–85% метана CH_4 , 15–30% углекислого газа CO_2 и следовые количества H_2S [29].

Системы предварительной очистки сточных вод UASB представляют собой проверенную устойчивую технологию для снижения нагрузки по загрязняющим веществам в сточных водах пивоваренного завода, однако сообщается, что процесс анаэробной очистки, в т. ч. и в реакторе UASB, имеет низкую эффективность удаления соединений азота и фосфора, поскольку в системе не образуется больших количеств ила [28, 30–32]. Таким образом, для полного удаления этих биогенных элементов в крупномасштабных установках UASB требуются дальнейшие исследования. Также UASB-реактор малоэффективен при низких нагрузках по ХПК (ниже 2000 мг/дм^3) [32]. Другими словами, производительность рассматриваемого в настоящее время UASB-реактора может быть улучшена [17].

Частично приведенные недостатки UASB-реактора могут быть решены в его модификации – реакторе с расширяющимся слоем активного ила (EGSB), который отличается более высокой скоростью пропускания восходящего потока сточных вод. Интенсификация гидравлического перемешивания способствует диспергированию гранулированного слоя и лучшему контакту гранул со сточными водами. Высокая скорость потока достигается за счет конструктивных особенностей реакторов EGSB (в виде высоких узких колонн) или за счет включения в схему рециркуляции потока [33, 34].

GRABBR. Основная масса органических веществ может быть удалена в анаэробном реакторе. Однако если промышленные сточные воды богаты соединениями азота, только небольшая

часть органического азота будет преобразована в аммонийный на потребности клеток. Оставшийся аммоний в сточных водах после анаэробного процесса может быть нитрифицирован при последующей аэробной очистке. В этом случае требуется установка денитрификации и часто внешний источник углерода для полного удаления азота, поскольку сточные воды из аэробной установки, вероятно, будут содержать недостаточное количество углерода для достижения полной денитрификации [31].

Объединение процессов денитрификации и метаногенеза в одном реакторе является методом, альтернативным традиционной схеме очистки. Большинство исследований по комбинированной денитрификации и метаногенезу проводилось в реакторах с полным перешиванием. Чтобы уменьшить ингибирование нитратами метаногенеза, были исследованы двухступенчатые анаэробные системы, однако и они не были лишены недостатков [35].

Считается, что GRABBR может оказаться более подходящей системой для комбинированного удаления углерод- и азотсодержащих загрязнений в одной анаэробной установке, чем традиционные анаэробные биореакторы, в основном из-за наличия поршневого протока, разделения фаз и характеристик гранулированного слоя [31].

Реактор с перегородками и гранулированным слоем (GRABBR), который представляет собой поршневой проточный многофазный биореактор, сочетающий в себе свойства анаэробного реактора с перегородками (ABR) и системы анаэробного гранулированного слоя.

GRABBR-реактор был испытан на сточных водах пивного производства [31]. В этом исследовании в GRABBR-реакторе было достигнуто полное удаление нитратов, эффективность снижения ХПК составила от 97 до 98% при нагрузках органических веществ и оксида азота $3,57 \text{ кг ХПК}/(\text{м}^3 \cdot \text{сут})$ и $0,04\text{--}0,05 \text{ кг NOx-N}/(\text{м}^3 \cdot \text{сут})$ соответственно. Последующее использование аэробной установки второй ступени позволило удалить оставшийся углерод органических соединений и достигнуть общей эффективности снижения ХПК более 99%.

AnFB. Анаэробные реакторы с псевдооживленным слоем являются реакторами башенного типа, в которых поток жидкости направлен снизу вверх. Частицы активного ила увлекаются сточными водами вверх, таким образом создается суспендированный слой. Для увеличения концентрации биомассы и площади контакта активного ила со сточными водами часто используются носители (например, цеолит).

Таким образом, положительными чертами реакторов с псевдооживленным слоем являются

высокая концентрация биомассы и скорость массообмена, устойчивость к динамической нагрузке вследствие высокого времени удержания биомассы (до 72 ч), низкий прирост биомассы. Один из главных недостатков – затраты энергии на поддержание псевдожизненного слоя [36].

Исследование очистки сточных вод пивного производства [25] показало тенденцию к увеличению снятия ХПК с увеличением скорости подаваемых сточных вод, что связано с повышением массообмена при большей турбулентности потока. Однако эффект увеличения снятия ХПК при повышении скорости потока не был значительным из-за гашения турбулентности по высоте псевдооживленного слоя. При увеличении скорости потока сточных вод с 1 до 4 см/с снятие ХПК увеличилось только на 15%.

Наряду с явными преимуществами анаэробной очистки существуют проблемы, связанные с запуском и функционированием анаэробных реакторов. Многостадийный анаэробный процесс осуществляется консорциумом неидентифицированных и взаимозависимых микроорганизмов, что делает процесс нестабильным и затрудняет мониторинг и регулирование. Ситуация усложняется сложным и непостоянным составом сточных вод пивоваренных заводов, низким рН и высокой нагрузкой по органическим веществам [28].

Ранее было продемонстрировано, что анаэробные системы, такие как реакторы с восходящим потоком через слой анаэробного ила (UASB), анаэробные последовательные реакторы периодического действия (AnSBR) и реакторы со слоем гранулированного ила (GRABBR), являются надежными технологиями, которые обеспечивают высокую эффективность удаления органического углерода и дополнительно дают возможность рекуперации энергии за счет вырабатываемого биогаза.

Тем не менее очищенные сточные воды в анаэробных процессах содержат остаточные загрязнения, которые требуют дополнительной очистки перед сбросом в окружающую среду.

Обычно биологическая очистка сточных вод пивоваренных заводов включает комбинацию анаэробных и аэробных процессов [20]. Как традиционные системы с активным илом (CAS), так и последовательные реакторы периодического действия (SBR) можно использовать для аэробной очистки и доочистки сточных вод [21, 37].

Среди различных методов аэробной доочистки использование аэробного гранулированного ила (AGS) считается многообещающей и конкурентоспособной технологией. В течение последнего десятилетия доказана осуществимость данной технологии по отношению к

очистке разнообразных промышленных сточных вод из-за малой занимаемой площади и высокой эффективности удаления питательных веществ [22, 38, 39].

Различные исследования показали, что аэробный гранулированный ил может успешно культивироваться в реакторе типа SBR на подпитке из сточных вод пивного производства и активно удалять соединения углерода и азота [37–40]. В этих исследованиях изучалась возможность получения гранулированного активного ила, а также его устойчивость к низким рН сточных вод и различным нагрузкам.

После окончания процесса гранулирования была достигнута высокая и стабильная эффективность удаления ХПК (88,7%) и азота аммонийного (88,9%) при продолжительности цикла 6 ч. Среднее значение ХПК в очищенных сточных водах составило 212 мг/дм³, а концентрация ионов аммония в среднем менее 14,4 мг/дм³. Удаление азота происходило за счет нитрификации и одновременной денитрификации во внутреннем ядре гранул [37].

Для гранулированного активного ила испытывались различные нагрузки при следующих соотношениях элементов: 100C:10N:1P и 100C:6N:1P. Степень удаления углерода органических соединений не зависела от нагрузки (в выбранном диапазоне) и для обоих случаев соотношения элементов составила 80–85%. Степень удаления общего азота была выше в случае меньшей нагрузки по азоту, т. е. 100C:6N:1P. Однако содержание общего фосфора на выходе составляло 14 мг/дм³, что не соответствовало требованиям законодательства Канады (менее 10 мг/дм³) [40].

В исследовании [41] сравнивались два различных режима аэрации – периодическая аэрация с чередованием аноксидных условий и непрерывная аэрация – для изучения степени удаления загрязняющих веществ, грануляции аэробного гранулированного активного ила и разнообразия микробного сообщества. Результаты показали, что периодическая аэрация способствует более высокой эффективности удаления органических веществ, соединений азота и фосфора и более быстрому процессу грануляции, формированию большего размера гранул и разнообразию микробного сообщества, нежели непрерывная аэрация. В частности, активно развивались такие роды, как *Nitrosopumilus*, *Nitrospina*, факультативные анаэробы, участвующие в удалении соединений азота (до 98%) и фосфора (до 80%). Временное отключение аэрации позволило сэкономить примерно 40% энергии.

В исследовании [42] в два SBR-реактора подавали равные объемы активного ила и сточные воды пивоваренного завода без аэрации и

механического перемешивания во время периода заполнения (для предотвращения вспухания ила). Реакторы работали в течение 15 недель с 5-дневным гидравлическим временем удерживания для каждого цикла. Оба SBR-реактора работали по стандартной схеме, но с отличиями на фазе аэрации. Один из реакторов работал по схеме непрерывной аэрации с поддержанием низкой концентрации растворенного кислорода ($1,5 \text{ мг/дм}^3$). Второй реактор работал по схеме циклической аэрации, когда концентрация кислорода 3 мг/дм^3 поддерживалась в течение 9 ч в день, затем аэрация прекращалась.

Показатель ХПК сточных вод изменялся от 2976 до $10\,860 \text{ мг/дм}^3$ (для каждого цикла использовались свежие сточные воды с пивоваренного завода). После очистки по первой схеме (в условиях низкокислородной аэрации) значения ХПК находились в диапазоне от 232 до 1000 мг/дм^3 (эффективность очистки 90%), в то время как в реакторе, работающем по схеме циклической аэрации, значения ХПК варьировались от 964 до 4136 мг/дм^3 (эффективность очистки 78%). Более высокая производительность SBR-реактора, работающего по схеме непрерывной аэрации, объяснена тем, что активность микроорганизмов, разлагающих органические вещества, увеличивалась из-за постоянной доступности кислорода по сравнению с реактором, работающим по схеме циклической аэрации.

На сегодняшний день технология аэробного гранулированного ила (AGS) в SBR-реакторе принята в качестве устойчивой альтернативы системе CAS для очистки сточных вод и уже применяется в полном масштабе [40].

SBR-реакторы составляют 91% всех типов реакторов, используемых для очистки промышленных сточных вод гранулированным активным илом [43].

Сообщается, что бывает сложно разработать процесс, при котором 100% активного ила находится в гранулированном виде. Например, в реакторе может содержаться около 50% ила в виде работоспособных гранул, а остальная часть может находиться в виде плотных хлопьев [44].

Поскольку на процесс гранулирования влияет множество факторов и нет единого мнения о механизме дезинтеграции гранул, необходима оптимизация рабочих параметров для долгосрочного использования аэробного гранулированного ила [43].

За последние несколько лет многие исследования с применением аэробного гранулированного ила для очистки промышленных сточных вод дали положительные результаты. Однако все еще существуют некоторые проблемы при использовании технологии AGS для очистки промышленных сточных вод [43]:

– устойчивость к ударным нагрузкам и режимам эксплуатации, сложность эксплуатации, стоимость и степень автоматизации, которые могут быть улучшены в будущем;

– должны быть дополнительно исследованы рабочие параметры для соответствия различным типам промышленных сточных вод. До сих пор не существует единых правил эксплуатации или параметров очистки промышленных сточных вод с использованием гранулированного активного ила. Таким образом, дальнейшие исследования могут быть сосредоточены также на том, как в той или иной степени стандартизировать процесс очистки;

– сфера применения технологии очистки промышленных сточных вод с использованием гранулированного активного ила нуждается в расширении. Почти все исследования аэробных гранул, о которых сообщалось до сих пор, проводились с применением SBR-реакторов. Однако для реальной очистки сточных вод во всем мире используются в основном проточные реакторы (аэротенки-вытеснители). Таким образом, применение технологии гранулированного активного ила в проточных реакторах без необходимости реконструкции существующих сооружений может быть рассмотрено в дальнейших исследованиях [44];

– практически отсутствуют исследования по удалению соединений азота и фосфора. Большинство предыдущих исследований по очистке промышленных сточных вод гранулированным активным илом были сосредоточены на снижении ХПК, значительная часть исследований не учитывала эффективность удаления азота и фосфора [43].

Также изучается вопрос о хранении гранул активного ила и их регенерации (реактивации). Исследование [45] показало, что гранулированный активный ил после 12 месяцев хранения при 4°C может быть реактивирован для очистки промышленных сточных вод, однако стабильными оказывались гранулы при ступенчатом увеличении содержания органических веществ (вариант реактивации 1) в воде, в которой гранулы культивировались для регенерации. Гранулы, которые сразу подвергались высоким нагрузкам (вариант реактивации 2), частично разрушались и уменьшались в размерах. После кратковременной регенерации гранулы активного ила далее использовались для очистки сточных вод. Эффективность удаления органических веществ для гранул после двух вариантов реактивации составила 87 и 97% соответственно. Более высокая эффективность удаления органических соединений во втором варианте регенерации гранул объясняется тем, что, несмотря на разрушение гранул, они все же были более адаптированными к среде,

очистка происходила как за счет процесса адсорбции загрязнений, так и за счет биодеградации сложных веществ. После первого варианта регенерации процесс очистки осуществлялся преимущественно только за счет адсорбции загрязняющих веществ.

Стабильность гранул обычно определяется как сохранение биоактивности и состава микробного сообщества. Стабильность аэробных гранул также характеризуется как способность противостоять гидродинамическим силам сдвига или другим механическим влияниям [46].

Режим голодания и анаэробные условия приводят к включению процесса эндогенного клеточного дыхания и лизису клеток, поверхность гранулы постепенно становится пористой, и гранула разрушается [47]. Хотя механизм нестабильности гранул активного ила все еще плохо изучен, для поддержания стабильности гранул необходимы исследования в области сокращения времени отстаивания, изучение гидродинамических аспектов и периода голодания [48].

Последние достижения. Возникающие экологические проблемы и растущие потребности пивоваренной промышленности в воде и энергии стали стимулом для развития и усовершенствования технологий очистки сточных вод пивного производства [13]. Ниже представлены последние достижения в очистке сточных вод пивного производства.

Мембранные реакторы (MBR-реакторы) наиболее часто применяются для очистки сточных вод. Эффективность MBR-реакторов была изучена для очистки различных городских и промышленных сточных вод [13]. Как показали исследования, MBR-реактор обеспечивал снижение ХПК на 99% при очистке пивоваренных сточных вод в течение 440 дней непрерывного эксперимента при следующих характеристиках сточных вод: ХПК 2200–4800 мг/дм³, ион аммония 125–240 мг/дм³, общий фосфор 25–40 мг/дм³, рН 6,0–9,0. Таким образом, эта система достаточно эффективна и надежна для очистки сточных вод пивоваренных заводов с высоким содержанием органических веществ [49].

Мембранная фильтрация считается неотъемлемым компонентом систем очистки сточных вод и питьевой воды, эффективность этого процесса зависит от оптимального подбора размеров пор мембраны и размеров частиц удаляемых примесей [20]. Мембранную фильтрацию можно разделить на четыре категории в порядке увеличения размера пор: гиперфильтрация, нанофильтрация, ультрафильтрация и микрофильтрация. Были проведены исследования использования нанофильтрации для очистки сточных вод пивоваренных заводов. Результаты показали удаление в среднем 99, 55 и 70% загрязнений по ХПК, ионов

натрия и хлора соответственно. Это подтверждает, что нанофильтрация достаточно для очистки сточных вод [50]. Однако метод ограничен объемом поступающих сточных вод и содержанием взвешенных и растворенных веществ, которые необходимо предварительно удалять коагуляцией или флокуляцией [51].

Биореактор с псевдооживленным слоем (FBR) работает за счет накопления на насадках активной биомассы, образующей биопленку с большой площадью поверхности. Очистка сточных вод осуществляется на поверхности и внутри биопленки в процессе ее омывания восходящим потоком жидкости. В одном из исследований протестировали два носителя (измельченный в порошок полиэтилен и экстендосферы (Extendspheres™) с активным объемом 25%) для удаления органических веществ из сточных вод пивоваренных заводов с различной степенью нагрузки по органическому веществу (OLR). Реактор работал непрерывно с пошаговым увеличением OLR до тех пор, пока не было достигнуто условие ограничения. Такой реактор с псевдооживленным слоем достиг 90% эффективности удаления загрязнений по ХПК [16].

Микробный топливный элемент (MFC) – это многоцелевая технология, которая может использоваться для более чистого производства электроэнергии, очистки сточных вод, извлечения чистых элементов, удаления органических веществ, смягчения воды, биоремедиации, обезвреживания красителей. Это новый многообещающий подход и к очистке сточных вод пивоваренных заводов. Система сочетает анаэробную очистку с размещаемыми в воде анодом и катодом, на последнем в качестве акцептора электронов выступает кислород или альтернативный акцептор. Микроорганизмы, прикрепленные к аноду MFC, окисляют субстраты (например, органические вещества сточных вод пивоваренного завода) с образованием CO₂ и высвобождают электроны и протоны. Затем электронный поток перемещается на катод через внешнюю цепь. В катодной реакции используются различные акцепторы электронов, чаще всего кислород (O₂). Другие изученные акцепторы электронов включают восстановление металлов, восстановление воды до водорода, восстановление нитратов и восстановление сульфатов [52].

Сточные воды пивоваренных заводов характеризуются высокими значениями ХПК и высоким содержанием органических веществ (сахаров, крахмала, белковых компонентов). Различные легко разлагаемые соединения, включая ацетат, глюкозу, сахарозу, были использованы в качестве субстрата в опытах с микробным топливным элементом [18]. В этом исследовании MFC были опробованы для очистки сточных вод

с точки зрения меньших затрат энергии. Эффективность очистки сточных вод пивоваренных заводов с ХПК 2250 мг/дм³ при 20 и 30°C составила 85 и 87% соответственно. Также были протестированы характеристики МФС с последовательным соединением анод – катод и достигнута эффективность удаления загрязнений по ХПК более 90% при снижении значения этого показателя с 1250 до 60 мг/дм³ [53]. Другие авторы сообщили об удалении до 94% загрязнений по ХПК с помощью аналогичного подхода [12].

Заключение. Анализ информации по теме очистки сточных вод пивного производства показывает, что при выборе или разработке технологии очистки данного типа сточных вод следует придерживаться сочетания анаэробных и аэробных методов, так как индивидуально оба подхода не лишены недостатков. Также показано, что особое внимание в последние два десятилетия уделяется технологиям с применением активного ила в гранулированном виде. Многими исследованиями подтверждено явное пре-

имущество гранулированного активного ила перед флокулированным, однако все еще существует ряд нерешенных вопросов, препятствующих широкомасштабному внедрению данной технологии в промышленную практику.

Набирает обороты использование реакторов последовательно-периодического действия (SBR), в которых все стадии очистки организованы в одной емкости, а использование гранулированного активного ила в этих реакторах подкрепляет преимущества данной технологии очистки сточных вод.

Современные тенденции очистки сточных вод с использованием мембранной фильтрации и микробного топливного элемента способствуют эффективному извлечению загрязняющих веществ из сточных вод, а последняя технология позволяет также производить электроэнергию. Данные способы очистки были успешно протестированы в лабораторных условиях, однако их применение в полном масштабе лимитируется объемом поступающих сточных вод и содержанием взвешенных веществ.

Список литературы

1. Fillaudeau L., Blanpain-Avet P., Daufin G. Water, wastewater and waste management in brewing industries // *Journal of Cleaner Production*. 2006. Vol. 14. P. 463–471. DOI: 10.1016/j.jclepro.2005.01.0022.
2. Huige N. J. *Handbook of Brewing*. Boca Raton: CRC Press Publ., 2006. 60 p.
3. Brewery and Winery Wastewater Treatment: Some Focal Points of Design and Operation / A. G. Brito [et al.] // *Utilization of By-Products and Treatment of Waste in the Food Industry*. 2007. P. 109–131. DOI: 10.1007/978-0-387-35766-9_77.
4. Water system integration of a brewhouse / X. Feng [et al.] // *Energy Conversion and Management*. 2009. Vol. 50. P. 354–359. DOI: 10.1016/j.enconman.2005.11.0011.
5. Гавриленков А. М., Зарцына С. С., Зуева С. Б. Экологическая безопасность пищевых производств. СПб: Гиорд, 2006. 272 с.
6. Крамарева Т. Н. Оценка воздействия на окружающую среду предприятий пищевой промышленности. М.: Сам полиграфист, 2015. 118 с.
7. Qin R. The characteristics of beer industrial wastewater and its influence on the environment // *Earth and Environmental Sciences: 2nd International Symposium on Resource Exploration and Environmental Science Series*. 2018. Vol. 170. No. 3. P. 1–5. DOI: 10.1088/1755-1315/170/3/032068.
8. Treatment of brewery wastewater using anaerobic sequencing batch reactor (ASBR) / X. Shao [et al.] // *Bioresource Technology*. 2008. Vol. 99. P. 3182–3186. DOI: 10.1016/j.biortech.2007.05.050.
9. Очистные сооружения пивоваренных заводов. Проектировщикам // Компания Argel, 2013. URL: <https://www.vo-da.ru/articles/ochistnye-sooruzeniya-pivzavodov/sostav-i-harakteristiki> (дата обращения: 05.09.2021).
10. Palmer J. J., Kaminski C. *Water. A comprehensive study for brewers*. Colorado: A Division of the Brewers Association Publ., 2013. 315 p.
11. Иванченко О. Б., Хабибулин О. Б. Пути образования и токсические свойства сточных вод пивоваренных предприятий // *Экологическая биотехнология*. 2015. С. 433–436.
12. Brewery wastewater treatment using air-cathode microbial fuel cells / Y. Feng [et al.] // *Environmental Biotechnology*. 2008. Vol. 78. P. 873–880. DOI: 10.1007/s00253-008-1360-2.
13. Werkneh A. A., Osunkunle A., Beyene H. D. Recent advances in brewery wastewater treatment; approaches for water reuse and energy recovery: a review // *Environmental Sustainability*. 2019. Vol. 2. P. 199–209. DOI: 10.1007/s42398-019-00056-22.
14. Organic pollutants abatement and biodecontamination of brewery effluents by a non-thermal quenched plasma at atmospheric pressure / A. Doubla [et al.] // *Chemosphere*. 2007. Vol. 69. P. 332–337. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2007.04.0077.
15. Inert COD production in a membrane anaerobic reactor treating brewery wastewater / B. K. Ince [et al.] // *Water Research*. 2000. Vol. 34. P. 3943–3948. DOI: 10.1016/S0043-1354(00)00170-6.

16. Brewery wastewater treatment using anaerobic inverse fluidized bed reactors / A. Alvarado-Lassman [et al.] // *Bioresource Technology*. 2008. Vol. 99. P. 3009–3015. DOI: 10.1016/j.biortech.2007.06.0222.
17. A study of industrial anaerobic treatment of opaque beer brewery wastewater in a tropical climate using a full-scale UASB reactor seeded with activated sludge / W. Parawira [et al.] // *Process Biochemistry*. 2005. Vol. 40. P. 593–599. DOI: 10.1016/j.procbio.2004.01.036.
18. Production of electricity from the treatment of continuous brewery wastewater using a microbial fuel cell / Q. Wen [et al.] // *Fuel*. 2010. Vol. 89, no. 7. P. 1381–1385. DOI: 10.1016/j.fuel.2009.11.004.
19. Charakterystyka jakościowa ścieków powstających w browarach i słodowniach / W. Janczukowicz [et al.] // *Rocznik Ochrona Środowiska*. 2013. Vol. 15. P. 729–748.
20. The treatment of brewery wastewater for reuse: State of the art / G. S. Simate [et al.] // *Desalination*. 2011. Vol. 273. P. 235–247. DOI: 10.1016/j.desal.2011.02.035.
21. Driessen W., Vereijken T. Recent developments in biological treatment of brewery effluent // *The Institute and Guild of Brewing Convention: Livingstone, Zambia, March 2–7, 2003*. 10 p.
22. Данилович Д. А. Будущее, которое уже наступило: технология гранулированного активного ила. НДТ. 2017. № 3. С. 10–11.
23. Biogas Production in Brewery // *BioThane*. URL: <http://www.biothane.com/en/articles/14856.html> (дата обращения: 15.10.2021).
24. Baloch M. I., Akunna J. C., Collier P. J. The performance of a phase separated granular bed bioreactor treating brewery wastewater. *Bioresource Technology*. 2007. Vol. 98. No. 9. P. 1849–1855. DOI: 10.1016/j.biortech.2006.06.014.
25. Ochieng A. A. Brewery wastewater treatment in a fluidised bed bioreactor // *Journal of Hazardous Materials*. 2002. Vol. 90. P. 311–321. DOI: 10.1016/S0304-3894(01)00373-9.
26. Sequencing Batch Reactors (SBR) // *Ethics™*. URL: <http://www.ethicsinfinity.com/EthicsProduct-sequencing-batch-reactors-sbr> (дата обращения: 15.10.2021).
27. Treatment of brewery wastewater and its use for biological production of methane and hydrogen / M. K. Arantes [et al.] // *International journal of hydrogen energy*. 2017. Vol. 42. P. 26243–26256. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.08.206.
28. A study of industrial anaerobic treatment of opaque beer brewery wastewater in a tropical climate using a full-scale UASB reactor seeded with activated sludge / W. Parawira [et al.] // *Process Biochemistry*. 2005. Vol. 40. P. 593–599. DOI: 10.1016/j.procbio.2004.01.036.
29. Performance of a pilot-scale sewage treatment: an up-flow anaerobic sludge blanket (UASB) and a down-flow hanging sponge (DHS) reactors combined system by sulfur-redox reaction process under low-temperature conditions / M. Takahashi [et al.] // *Bioresource Technology*. 2011. Vol. 102, no. 2. P. 753–757. DOI: 10.1016/j.biortech.2010.08.081.
30. Wastewater-based resource recovery technologies across scale / N. Diaz-Elsayed [et al.] // *Resource Conservation Recycling*. 2019. Vol. 145. P. 94–112. DOI: 10.1016/j.resconrec.2018.12.035.
31. Baloch M. I., Akunna J. C., Collier P. J. Carbon and nitrogen removal in a granular bed baffled reactor // *Environmental Technology*. 2010. Vol. 27. P. 201–208. DOI: 10.1080/09593332708618634.
32. Seung J. L. Applicability and trends of anaerobic granular sludge treatment processes // *Biomass and Bioenergy*. 2014. Vol. 60. P. 189–202. DOI: 10.1016/j.biombioe.2013.11.011.
33. Simultaneous biological removal of sulfur, nitrogen and carbon using EGSB reactor / C. Chen [et al.] // *Applied microbiology and biotechnology*. 2008. Vol. 78. P. 1057–1063. DOI: 10.1007/s00253-008-1396-3.
34. Performance of ANAMMOX-EGSB reactor / T. Chen [et al.] // *Desalination*. 2011. Vol. 278, no. 1. P. 281–287. DOI: 10.1016/j.desal.2011.05.038.
35. Baloch M. I., Akunna J. C. Granular bed baffled reactor (GraBBR): Solution to a two-phase anaerobic digestion system // *Journal of Environmental Engineering (ASCE)*. 2003. Vol. 129. P. 1015–1021. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9372(2003)129:11(1015).
36. Performance of an anaerobic fluidized bed bioreactor (AnFBR) for digestion of primary municipal wastewater treatment biosolids and bioethanol thin stillage / M. Andalib [et al.] // *Renewable Energy*. 2014. Vol. 71. P. 276–285. DOI: 10.1016/j.renene.2014.05.039.
37. Aerobic granulation with brewery wastewater in a sequencing batch reactor / S. Wang [et al.] // *Bioresource Technology*. 2006. Vol. 98, no. 11. P. 2142–2147. DOI: 10.1016/j.biortech.2006.08.018.
38. Formation of aerobic granular sludge and the influence of the pH on sludge characteristics in a SBR fed with brewery/bottling plant wastewater / H. Stes [et al.] // *Water Science and Technology*. 2018. Vol. 77, no. 9. P. 132–143. DOI: 10.2166/wst.2018.132.
39. Effect of extended famine conditions on aerobic granular sludge stability in the treatment of brewery wastewater / S. F. Corsino [et al.] // *Bioresource Technology*. 2017. Vol. 227. P. 150–157. DOI: 10.1016/j.biortech.2016.12.026.

40. Biase A., Corsino S. F., Devlin T., Munz G., Torregrossa G. Aerobic granular sludge treating anaerobically pretreated brewery wastewater at different loading rates // *Water Science and Technology*. 2020. Vol. 12. P. 2295–2298. DOI: 10.2175/193864718825137115.
41. Intermittent aeration improving activated granular sludge granulation for nitrogen and phosphorus removal from domestic wastewater / J. Huanf [et al.] // *Bioresource Technology Report*. 2021. Vol. 15. P. 1–11. DOI: 10.1016/j.biteb.2021.100739.
42. Bakar B. F., Shabangu K., Chetty M. Brewery wastewater treatment using laboratory scale aerobic sequencing batch reactor // *South African Journal of Chemical Engineering*. 2017. Vol. 24, no. 1. P. 128–134.
43. Zheng S., Lu H., Zhang G. The recent development of the aerobic granular sludge for industrial wastewater treatment // *Environmental Technology Reviews*. 2020. Vol. 9, no. 1. P. 55–66. DOI: 10.1080/21622515.2020.1732479.
44. Sarma S. J., Tay J. H. Aerobic Granulation for a Future Wastewater Treatment Technology: Challenges Ahead // *Environmental Science. Water research and technology*. 2017. Vol. 4. P. 9–15. DOI: 10.1039/C7EW00148G.
45. Reactivation of aerobic granular sludge for the treatment of industrial shipboard slop wastewater: Effects of long-term storage on granules structure, biofilm activity and microbial community / R. Campo [et al.] // *Journal of Water Process Engineering*. 2021. Vol. 42. P. 1–11. DOI: 10.1016/j.jwpe.2021.102101.
46. Sheng J. P., Yu H. Q., Li X. Y. Extracellular polymeric substances (EPS) of microbial aggregates in biological wastewater treatment systems // *Biotechnol. Adv.* 2010. Vol. 28, no. 6. P. 882–894. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2010.08.001.
47. Effects of wastewater type on stability and operating conditions control strategy in relation to the formation of aerobic granular sludge / N. A. Harnirrudin [et al.] // *Water Science and Technology*. 2021. P. 1–18. DOI: 10.2166/wst.2021.415.
48. Shifts in bacterial community composition and abundance of nitrifiers during aerobic granulation in two nitrifying sequencing batch reactors / X. Y. Fan [et al.] // *Bioresource Technology*. 2018. Vol. 251. P. 99–107. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.12.038.
49. Brewery wastewater treatment and resource recovery through long term continuous-mode operation in pilot photosynthetic bacteria membrane bioreactor / H. Lu [et al.] // *Scientific Total Environment*. 2019. Vol. 646. P. 196–205. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.07.268.
50. Braeken L., Bruggen B., Vandecasteele T. Regeneration of brewery wastewater using nanofiltration // *Water Resource and Technology*. 2004. Vol. 38, no. 13. P. 3075–3082. DOI: 10.1016/j.watres.2004.03.028.
51. Zahrim A. Y., Tizaoui C., Hilal N. Coagulation with polymers for nanofiltration pre-treatment of highly concentrated dyes: a review // *Desalination*. 2011. Vol. 266. P. 1–16. DOI: 10.1016/j.desal.2010.08.012.
52. Olajire A. A. The brewing industry and environmental challenges // *Journal of Cleaner Production*. 2012. Vol. 30. P. 313–320. DOI: 10.1016/j.jclepro.2012.03.003.
53. Pandey P. Recent advances in the use of different substrates in microbial fuel cells toward wastewater treatment and simultaneous energy recovery // *Applied Energy*. 2016. Vol. 168. P. 706–723. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.01.056.

References

1. Fillaudeau L., Blanpain-Avet P., Daufin G. Water, wastewater and waste management in brewing industries. *Journal of Cleaner Production*, 2006, vol. 14, pp. 463–471. DOI: 10.1016/j.jclepro.2005.01.0022.
2. Huige N. J. Handbook of Brewing. Boca Raton, CRC Press Publ., 2006. 60 p.
3. Brito A. G., Oliveira J. M., Peixoto J., Costa C. Brewery and Winery Wastewater Treatment: Some Focal Points of Design and Operation. *Utilization of By-Products and Treatment of Waste in the Food Industry*, 2007, pp. 109–131. DOI: 10.1007/978-0-387-35766-9_77.
4. Feng X., Huang L., Zhang X., Liu Y. Water system integration of a brewhouse. *Energy Conversion and Management*, 2009, vol. 50, pp. 354–359. DOI: 10.1016/j.enconman.2005.11.0011.
5. Gavrilenkov A. M., Zartsyna S. S., Zuyeva S. B. *Ecologicheskaya bezopasnost' pishchevykh proizvodstv* [Ecological safety of food production]. Saint Petersburg, Giord Publ., 2006. 272 p. (In Russian).
6. Kramareva T. N. *Otsenka vozdeystviya na okruzhayushchuyu sredu predpriyatiy pishchevoy promyshlennosti* [Assessment of environmental impact of food industry enterprises]. Moscow, Sam poligrafist Publ., 2015. 118 p. (In Russian).
7. Qin R. The characteristics of beer industrial wastewater and its influence on the environment. *Earth and Environmental Sciences: 2nd International Symposium on Resource Exploration and Environmental Science Series*, 2018, vol. 170, no. 3, pp. 1–5. DOI: 10.1088/1755-1315/170/3/032068.
8. Shao X., Peng D., Teng Z., Ju X. Treatment of brewery wastewater using anaerobic sequencing batch reactor (ASBR). *Bioresource Technology*, 2008, vol. 99, pp. 3182–3186. DOI: 10.1016/j.biortech.2007.05.050.

9. Brewery wastewater facilities. To designers. *Kompaniya Argel* [Argel company], 2013. Available at: <https://www.vo-da.ru/articles/ochistnye-sooruzheniya-pivzavodov/sostav-i-harakteristiki> (accessed 05.09.2021).
10. Palmer J. J., Kaminski C. Water. A comprehensive study for brewers. Colorado, A Division of the Brewers Association Publ., 2013. 315 p.
11. Ivanchenko O. B., Khabibulin O. B. Formation pathways and toxic properties of brewery wastewater. *Ecologicheskaya biotekhnologiya* [Environmental biotechnology], 2015, pp. 433–436 (In Russian).
12. Feng Y., Logan B., Wang X., Lee H. Brewery wastewater treatment using air-cathode microbial fuel cells. *Environmental Biotechnology*, 2008, vol. 78, pp. 873–880. DOI: 10.1007/s00253-008-1360-2.
13. Werkneh A. A., Osunkunle A., Beyene H. D. Recent advances in brewery wastewater treatment; approaches for water reuse and energy recovery. *Environmental Sustainability*, 2019, vol. 2, pp. 199–209. DOI: 10.1007/s42398-019-00056-22.
14. Doubla A., Laminsi S., Nzali S., Njoyim E. Organic pollutants abatement and biodecontamination of brewery effluents by a non-thermal quenched plasma at atmospheric pressure. *Chemosphere*, 2007, vol. 69, pp. 332–337. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2007.04.0077.
15. Ince B. K., Ince O., Sallis P., Anderson J. K. Inert COD production in a membrane anaerobic reactor treating brewery wastewater. *Water Research*, 2000, vol. 34, pp. 3943–3948. DOI: 10.1016/S0043-1354(00)00170-6.
16. Alvarado-Lassman A., García-Alvarado M. A., Rustrian E., Rodriguez-Jimenes G. Brewery wastewater treatment using anaerobic inverse fluidized bed reactors. *Bioresource Technology*, 2008, vol. 99, pp. 3009–3015. DOI: 10.1016/j.biortech.2007.06.0222.
17. Parawira W., Zvauya R., Kudita I., Nyandoroh N. G. A study of industrial anaerobic treatment of opaque beer brewery wastewater in a tropical climate using a full-scale UASB reactor seeded with activated sludge. *Process Biochemistry*, 2005, vol. 40, pp. 593–599. DOI: 10.1016/j.procbio.2004.01.036.
18. Wen Q., Wu Y., Zhao L., Sun Q. Production of electricity from the treatment of continuous brewery wastewater using a microbial fuel cell. *Fuel*, 2010, vol. 89, no. 7, pp. 1381–1385. DOI: 10.1016/j.fuel.2009.11.004.
19. Janczukowicz W., Mielcarek A., Rodziewicz J., Ostrowska K. Charakterystyka jakościowa ścieków powstających w browarach i słodowniach. *Rocznik Ochrona Środowiska*, 2013, vol. 15, pp. 729–748.
20. Simate G. S., Cluett J., Iyuke S. E., Musapatika E. T. The treatment of brewery wastewater for reuse: State of the art. *Desalination*, 2011, vol. 273, pp. 235–247. DOI: 10.1016/j.desal.2011.02.035.
21. Driessen W., Vereijken T. Recent developments in biological treatment of brewery effluent. *The Institute and Guild of Brewing Convention*. Livingstone, Zambia, March 2–7, 2003. 10 p.
22. Danilovich D. A. A future that has already arrived: granulated activated sludge technology. *NDT* [BAT], 2017, no. 3, pp. 10–11 (In Russian).
23. Biogas Production in Brewerier. BioThane. Available at: <http://www.biothane.com/en/articles/14856.html> (accessed 15.10.2021).
24. Baloch M. I., Akunna J. C., Collier P. J. The performance of a phase separated granular bed bioreactor treating brewery wastewater. *Bioresource Technology*, 2007, vol. 98, no. 9, pp. 1849–1855. DOI: 10.1016/j.biortech.2006.06.014.
25. Ochieng A. A. Brewery wastewater treatment in a fluidised bed bioreactor. *Journal of Hazardous Materials*, 2002, vol. 90, pp. 311–321. DOI: 10.1016/S0304-3894(01)00373-9.
26. Sequencing Batch Reactors (SBR). *Ethics™*. Available at: <http://www.ethicsinfinity.com/EthicsProduct-sequencing-batch-reactors-sbr> (accessed 15.10.2021).
27. Arantes M. K., Alves H., Sequinel R., Silva E. Treatment of brewery wastewater and its use for biological production of methane and hydrogen. *International journal of hydrogen energy*, 2017, vol. 42, pp. 26243–26256. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.08.206.
28. Parawira W., Zvauya R., Kudita I., Nyandoroh M. G. A study of industrial anaerobic treatment of opaque beer brewery wastewater in a tropical climate using a full-scale UASB reactor seeded with activated sludge. *Process Biochemistry*, 2005, vol. 40, pp. 593–599. DOI: 10.1016/j.procbio.2004.01.036.
29. Takahashi M., Yamaguchi T., Kuramoto Y., Nagano A. Performance of a pilot-scale sewage treatment: an up-flow anaerobic sludge blanket (UASB) and a down-flow hanging sponge (DHS) reactors combined system by sulfur-redox reaction process under low-temperature conditions. *Bioresource Technology*, 2011, vol. 102, no. 2, pp. 753–757. DOI: 10.1016/j.biortech.2010.08.081.
30. Diaz-Elsayed N., Rezaei N., Guo T., Mohebbi S. Wastewater-based resource recovery technologies across scale. *Resource Conservation Recycling*, 2019, vol. 145, pp. 94–112. DOI: 10.1016/j.resconrec.2018.12.035.

31. Baloch M. I., Akunna J. C., Collier P. J. Carbon and nitrogen removal in a granular bed baffled reactor. *Environmental Technology*, 2010, vol. 27, pp. 201–208. DOI: 10.1080/09593332708618634.
32. Seung J. L. Applicability and trends of anaerobic granular sludge treatment processes. *Biomass and Bioenergy*, 2014, vol. 60, pp. 189–202. DOI: 10.1016/j.biombioe.2013.11.011.
33. Chen C., Ren N.-Q., Wang A., Yu Z. Simultaneous biological removal of sulfur, nitrogen and carbon using EGSB reactor. *Applied microbiology and biotechnology*, 2008, vol. 78, pp. 1057–1063. DOI:10.1007/s00253-008-1396-3.
34. Chen T., Zheng P., Tang C., Wang S. Performance of ANAMMOX-EGSB reactor. *Desalination*, 2011, vol. 278, no. 1, pp. 281–287. DOI:10.1016/j.desal.2011.05.038.
35. Baloch M. I., Akunna J. C. Granular bed baffled reactor (GraBBR): Solution to a two-phase anaerobic digestion system. *Journal of Environmental Engineering (ASCE)*, 2003, vol. 129, pp. 1015–1021. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9372(2003)129:11(1015).
36. Andalib M., Elbeshbishy E., Nizara M., Hisham H. Performance of an anaerobic fluidized bed bio-reactor (AnFBR) for digestion of primary municipal wastewater treatment biosolids and bioethanol thin stillage. *Renewable Energy*, 2014, vol. 71, pp. 276–285. DOI: 10.1016/j.renene.2014.05.039.
37. Wang S., Liu X., Gong W., Gao B. Aerobic granulation with brewery wastewater in a sequencing batch reactor. *Bioresource Technology*, 2006, vol. 98, no. 11, pp. 2142–2147. DOI: 10.1016/j.biortech.2006.08.018.
38. Stes H., Caluwe M., Aerts S., Dobbeleers T. Formation of aerobic granular sludge and the influence of the pH on sludge characteristics in a SBR fed with brewery/bottling plant wastewater. *Water Science and Technology*, 2018, vol. 77, no. 9, pp. 132–143. DOI: 10.2166/wst.2018.132.
39. Corsino S. F., Biase A., Devlin T., Munz G., Torregrossa G. Effect of extended famine conditions on aerobic granular sludge stability in the treatment of brewery wastewater. *Bioresource Technology*, 2017, vol. 227, pp. 150–157. DOI: 10.1016/j.biortech.2016.12.026.
40. Biase A., Corsino S.F., Devlin T., Munz G., Torregrossa G. Aerobic granular sludge treating anaerobically pretreated brewery wastewater at different loading rates. *Water Science and Technology*, 2020, vol. 12, pp. 2295–2298. DOI: 10.2175/193864718825137115.
41. Huang J., Xu L., Guo Y., Liu D., Chen S. Intermittent aeration improving activated granular sludge granulation for nitrogen and phosphorus removal from domestic wastewater. *Bioresource Technology Report*, 2021, vol. 15, pp. 1–11. DOI: 10.1016/j.biteb.2021.100739.
42. Bakar B. F., Shabangu K., Chetty M. Brewery wastewater treatment using laboratory scale aerobic sequencing batch reactor. *South African Journal of Chemical Engineering*, 2017, vol. 24, no. 1, pp. 128–134.
43. Zheng S., Lu H., Zhang G. The recent development of the aerobic granular sludge for industrial wastewater treatment. *Environmental Technology Reviews*, 2020, vol. 9, no. 1, pp. 55–66. DOI: 10.1080/21622515.2020.1732479.
44. Sarma S. J., Tay J. H. Aerobic Granulation for a Future Wastewater Treatment Technology: Challenges Ahead. *Environmental Science. Water research and technology*, 2017, vol. 4, pp. 9–15. DOI: 10.1039/C7EW00148G.
45. Campo R., Vassalo A., Rabbeni G., Arancio W. Reactivation of aerobic granular sludge for the treatment of industrial shipboard slop wastewater: Effects of long-term storage on granules structure, biofilm activity and microbial community. *Journal of Water Process Engineering*, 2021, vol. 42, pp. 1–11. DOI: 10.1016/j.jwpe.2021.102101.
46. Sheng J. P., Yu H. Q., Li X. Y. Extracellular polymeric substances (EPS) of microbial aggregates in biological wastewater treatment systems. *Biotechnol. Adv.*, 2010, vol. 28, no. 6, pp. 882–894. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2010.08.001.
47. Harnirrudin N. A., Awang N. A., Zaidi N. S., Said M. A. M. Effects of wastewater type on stability and operating conditions control strategy in relation to the formation of aerobic granular sludge. *Water Science and Technology*, 2021, pp. 1–18. DOI: 10.2166/wst.2021.415.
48. Fan X. Y., Gao J., Pan K.-L., Li D.-C. Shifts in bacterial community composition and abundance of nitrifiers during aerobic granulation in two nitrifying sequencing batch reactors. *Bioresource Technology*, 2018, vol. 251, pp. 99–107. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.12.038.
49. Lu H., Zhang G., Peng M., Li B. Brewery wastewater treatment and resource recovery through long term continuous-mode operation in pilot photosynthetic bacteria membrane bioreactor. *Scientific Total Environment*, 2019, vol. 646, pp. 196–205. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.07.268.
50. Braeken L., Bruggen B., Vandecasteele T. Regeneration of brewery wastewater using nanofiltration. *Water Resource and Technology*, 2004, vol. 38, no. 13, pp. 3075–3082. DOI: 10.1016/j.watres.2004.03.028.

51. Zahrim A. Y., Tizaoui C., Hilai N. Coagulation with polymers for nanofiltration pre-treatment of highly concentrated dyes: a review. *Desalination*, 2011, vol. 266, pp. 1–16. DOI: 10.1016/j.desal.2010.08.012.

52. Olajire A. A. The brewing industry and environmental challenges. *Journal of Cleaner Production*, 2012, vol. 30, pp. 313–320. DOI: 10.1016/j.jclepro.2012.03.003.

53. Pandey P. Recent advances in the use of different substrates in microbial fuel cells toward wastewater treatment and simultaneous energy recovery. *Applied Energy*, 2016, vol. 168, pp. 706–723. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.01.056.

Информация об авторах

Лукашевич Стефания Олеговна – магистрант кафедры биотехнологии. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: stefani.lukashevich@gmail.com

Маркевич Раиса Михайловна – кандидат химических наук, доцент кафедры биотехнологии. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: marami@tut.by

Information about the authors

Lukashevich Stefania Olegovna – Master's degree student, the Department of Biotechnology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: stefani.lukashevich@gmail.com

Markevich Raisa Mikhailovna – PhD (Chemistry), Assistant Professor, the Department of Biotechnology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: marami@tut.by

Поступила 15.11.2021