

**ОХРАНА ТРУДА.
ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ.
ЭКОЛОГИЯ**

DOI: 10.53078/20778481_2022_4_84

УДК 628.3:621.3

В. Н. Штепа, С. В. Тыновец, А. Б. Шикунец

**УСОВЕРШЕНСТВОВАННАЯ СХЕМА ОБРАБОТКИ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ
ПИЩЕВЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ AOPS**

V. N. Shtepa, S. V. Tynovets, A. B. Shykunets

**IMPROVED SCHEME FOR PROCESSING AQUEOUS SOLUTIONS AT FOOD
ENTERPRISES USING AOPS TECHNOLOGIES**

Аннотация

Комплексно рассмотрена проблематика комбинированной электротехнологической обработки многокомпонентных водных растворов. Из полученных анализов качества сточной воды установлены ключевые загрязнители изучаемых пищевых предприятий (сырзавод и мясокомбинат). Установлено, что ключевые загрязнители имеют биологическую природу и хорошо поддаются окислению. Обоснована комбинация различных технологий и подтверждена эффективность такого подхода результатами исследований очистки фактических сточных вод сырзавода и мясокомбината. Предложена схема локальных сооружений очистки и определена последовательность обработки водных растворов пищевых предприятий с ее использованием.

Ключевые слова:

очистка сточных вод, экологическая безопасность, ресурсоэффективность, геоэкосистемы.

Для цитирования:

Штепа, В. Н. Усовершенствованная схема обработки водных растворов пищевых предприятий с использованием технологий AOPS / В. Н. Штепа, С. В. Тыновец, А. Б. Шикунец // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2022. – № 4 (77). – С. 84–91.

Abstract

The problems of combined electrotechnological processing of multicomponent aqueous solutions are comprehensively considered. Based on the obtained analyses of wastewater quality, key pollutants of the food enterprises under study (a cheese factory and a meat processing plant) were determined. It was found that the key pollutants are of a biological nature and lend themselves well to oxidation. The combination of different technologies is substantiated and the effectiveness of this approach is confirmed by the studies of the processing of actual wastewater from the cheese factory and meat processing plant. A scheme for local processing facilities is proposed, and based on its use, the sequence of aqueous solution processing at food enterprises is determined.

Keywords:

wastewater treatment, environmental safety, resource efficiency, geoecosystems.

For citation:

Shtepa, V. N. Improved scheme for processing aqueous solutions at food enterprises using AOPS technologies / V. N. Shtepa, S. V. Tynovets, A. V. Shykunets // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2022. – № 4 (77). – P. 84–91.

Введение

Одним из наиболее экологически опасных поллютантов сточных вод пищевых предприятий, прежде всего сырзаводов и молокозаводов, является молочная сыворотка. Ее кислая среда, например, угнетает микроорганизмы, применяемые на коммунальных сооружениях биологической очистки [1]. При этом окисление органических соединений вызывает неприятный запах, кроме того, ее наличие в геоэкосистемах оказывает крайне негативное влияние на биоразнообразие водоемов, поскольку попадая в них без очистки органические вещества сыворотки потребляют для своей нейтрализации большое количество кислорода, вследствие чего резко ухудшаются условия развития флоры и фауны, в том числе рыб [2]. Также в сточных водах сырзаводов и молокозаводов содержатся растворы солей и кислот, которые используются в технологических процессах [3].

Другими значимыми пищевыми предприятиями, загрязняющими окружающую среду, с санитарно-эпидемиологической точки зрения являются сточные воды мясокомбинатов, поскольку содержат в своем составе большое количество органических и неорганических загрязнений, в том числе бактерий-возбудителей инфекционных болезней, что также негативно влияет на природные водные ресурсы и гидробионты [3, 4].

Вместе с тем среди методов обработки загрязненных водных растворов отдельным современным и динамично развивающимся направлением выделяются Advanced oxidation process (AOPs) [5], к которым относятся ряд передовых технологических решений: гомогенные и гетерогенные фотокатали-

тические процессы, озонирование, варианты процесса Фентона, ультразвуковая обработка, плазменные процессы, ферратные и персульфатные технологии, использование ионизирующего излучения и микроволновой обработки.

Так, использование реактива Фентона при облучении водного раствора ультрафиолетом (длина волны – 254 нм) и управлении значениями pH позволяет обеспечить глубокую деструкцию органических загрязнителей с эффективностью более 80 % [6].

Комбинирование ультрафиолетового облучения (длина волны – 254 нм) и внесение перекиси водорода H_2O_2 , кроме окисления загрязнителей, усиливает комплексный эффект дезинфекции обрабатываемой среды [7].

Отдельно необходимо выделить использование такого сильного окислителя, как ферраты (VI) [5], которые относятся к одному из наиболее мощных существующих окислителей и благодаря своему действию разлагают большинство токсичных химических веществ в малотоксичные продукты, а также, благодаря дезинфицирующему действию, вызывают гибель вредных микроорганизмов.

Вместе с тем необходимо отметить, что даже используемые AOPs-технологии являются интеграцией двух и более процессов. Именно поэтому проблематику очистки сточных вод необходимо рассматривать в комплексе, сочетая различные технологические решения с комбинацией методов очистки для достижения наиболее устойчивой работы очистных сооружений [8–10].

Соответственно, создание ресурсоэффективных схем обработки водных растворов предприятий пищевой промышленности при очистке много-

компонентных сточных вод и/или водо-подготовке является актуальной научно-прикладной задачей.

Материалы и методы

Из полученных на молокоперерабатывающем предприятии дискретных точечных анализов качества водных растворов можно сделать выводы касательно ключевых загрязнителей сточных вод сырзавода (согласно требований предельно допустимых концентраций):

– «фосфаты» (системное кратное превышение во всех пробоотборах – со значениями в 5,4 раза выше ПДК);

– «рН» (системное кратное превышение во всех пробоотборах (с дрейфом в «кислую сторону») – со значениями до 1,68 раза выше ПДК);

– «хлориды» (периодическое превышение – со значениями в 6 раз выше ПДК);

– «сухой остаток» (стабильное кратное превышение – со значениями до 4 раз выше ПДК);

– «взвешенные вещества» (стабильное превышение – со значениями на 6 %...79 % выше ПДК);

– «железо общее» (единичные превышения – на 58 %...78 % раз выше ПДК).

Также имеют место значительные превышения биологического потребления кислорода (БПК) и химического потребления кислорода (ХПК). Усредненные зарегистрированные величины показателей: БПК – 2400 мгО₂/л, ХПК – 3000 мгО₂/л.

Что касается показателей качества производственных сточных вод мясокомбината, то концентрации поллютантов также существенно превышают ПДК, которые установлены для отведения не только в природные водоемы, но и в коммунальные канализационные системы (табл. 1).

Табл. 1. Результаты анализа проб сточной воды мясокомбината при пиковых значениях загрязнителей

Наименование показателя	Нормативное требование (ПДК)	Качество сточной воды на входе в локальные очистные сооружения
рН среды	6,5...8,5	7,49
Фосфор общий, мг/л	5	10,7
Азот аммонийный, мг/л	35	13,1
Хлориды, мг/л	700	253,05
Взвешенные вещества, мг/л	500	1260,9
Сухой остаток, мг/л	1000	1650

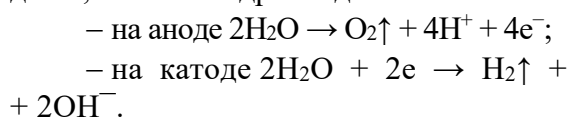
В то же время оценка соотношения БПК и ХПК для сырзавода (такое значение является интегральным показателем органического и неорганического загрязнения сточных вод) указывает на то, что ключевые поллютанты в этом сегменте имеют биологическую природу и должны эффективно подвергаться окислению

(2400 мгО₂/л / 3000 мгО₂/л = 0,8).

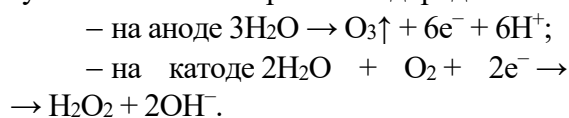
В качестве флокулирующей добавки использовался биоцидный продукт с показателями: рН = 10,47, ОВП = –21 мВ, TDS = 2870. В сточную воду обоих предприятий вносили 0,125 мл/л биоцидного флокулянта (БФ) концентрацией 1 % (в дальнейшем рабочая доза).

Для электролизной обработки водных растворов использовали диафрагменный электролизер с неактивной мембраной (анод и катод выполнены из электродного графита) объемом 3 л при силе постоянного тока 10 А. Время электролизного воздействия на водные растворы составляло 120 с. Продолжительность обработки, соответственно, количество вносимого окислителя и экспозиция облучения в единицу объема воды регулировались скоростью потока раствора через реактор. Именно в электролизере реализованы АОРs.

Основными реакциями такого электролиза сточных вод и разрушения органических загрязнителей являются образование кислорода O_2 и водорода H_2 , а также гидроксид-иона OH^- :

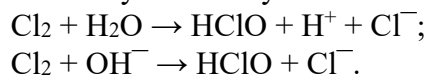


При электролизе воды также образуются озон O_3 и перекись водорода H_2O_2 :



Как ранее обозначалось, в присутствии хлоридов (находятся в сточной воде предприятия) при электролизе воды образуется растворенный хлор: на аноде $2Cl^- \rightarrow Cl_2 + 2e^-$.

Растворенный хлор Cl_2 , реагируя с водой и гидроксид-ионом, образует хлорноватистую кислоту $HClO$:



Разложение хлорноватистой кислоты $HClO$ в воде приводит к образованию гипохлорит-иона: $HOCl \leftrightarrow H^+ + OCl^-$.

Из приведенных выше реакций следует, что при электролизе воды образуется ряд сильных окислителей: кислород O_2 , озон O_3 , перекись водорода H_2O_2 , гипохлорит-ион OCl^- , которые выполняют деструкцию органических компонентов сточных вод.

Появление при электролизе воды OH^- -радикалов, H_2O_2 и O_3 приводит к образованию других сильных окислителей, таких как O_3^- , O_2^- , O^- , HO_2 , HO_3 , HO_4 и др.

При флотокоагуляционной обработке использовали флотокоагулятор с напорной подачей атмосферного воздуха. Режим флотокоагуляционной обработки: расход воздуха – 200 л/ч, доза реагента-коагулянта $FeCl_3$ – 40 мг/л. Также применялся озонатор авторской разработки производительностью 15 г O_3 /ч.

Задача физического моделирования процессов очистки сточных вод предприятий пищевой промышленности – создание и исследования последовательности этапов использования различных технологий [11], в том числе БФ и электротехнологической обработки.

Результаты и их обсуждение

Предварительная обработка сточных вод сырзавода разными способами очистки не обеспечила требуемого качества водного раствора (табл. 2).

На основе анализа вышеуказанных данных (см. табл. 2) была обоснована комбинация способов очистки (рис. 1). Эффективность использования предложенной схемы комбинации разных способов очистки была подтверждена исследованиями очистки сточной воды сырзавода (рис. 2) и мясокомбината (табл. 3).

Соответственно, эффективность (редукция поллютантов) очистки сточных вод сырзавода по загрязнителям следующая: ХПК – 41 %, фосфору – 65 %, сухому остатку – 28 %, хлоридам – 25 %.

Основываясь на полученных результатах, предложена схема локальных сооружений очистки сточных вод сырзаводов и мясокомбинатов (рис. 3).

Табл. 2. Результаты обработки сточной воды сырзавода разными способами очистки

Номер пробы	Вид обработки	pH	ХПК, мгО ₂ /л	Азот аммонийный, мг/л	Сухой остаток, мг/л	Хлориды, мг/л
1	Исходная вода	6,2	9240	2,6	11730	1168
2	Озонирование	7	9500	3,3	11783	1179
3	Электролизное окисление (без внесения реагентов)	6,7	8160	5,3	10283	920
4	Внесение только биоцидного флокулянта	10	9540	2,2	13246	1418
5	Флотокоагуляция	6,8	9940	4,8	11850	1254

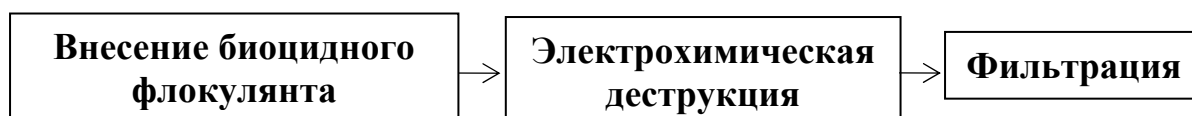


Рис. 1. Структура комбинации различных способов очистки сточных вод пищевых предприятий

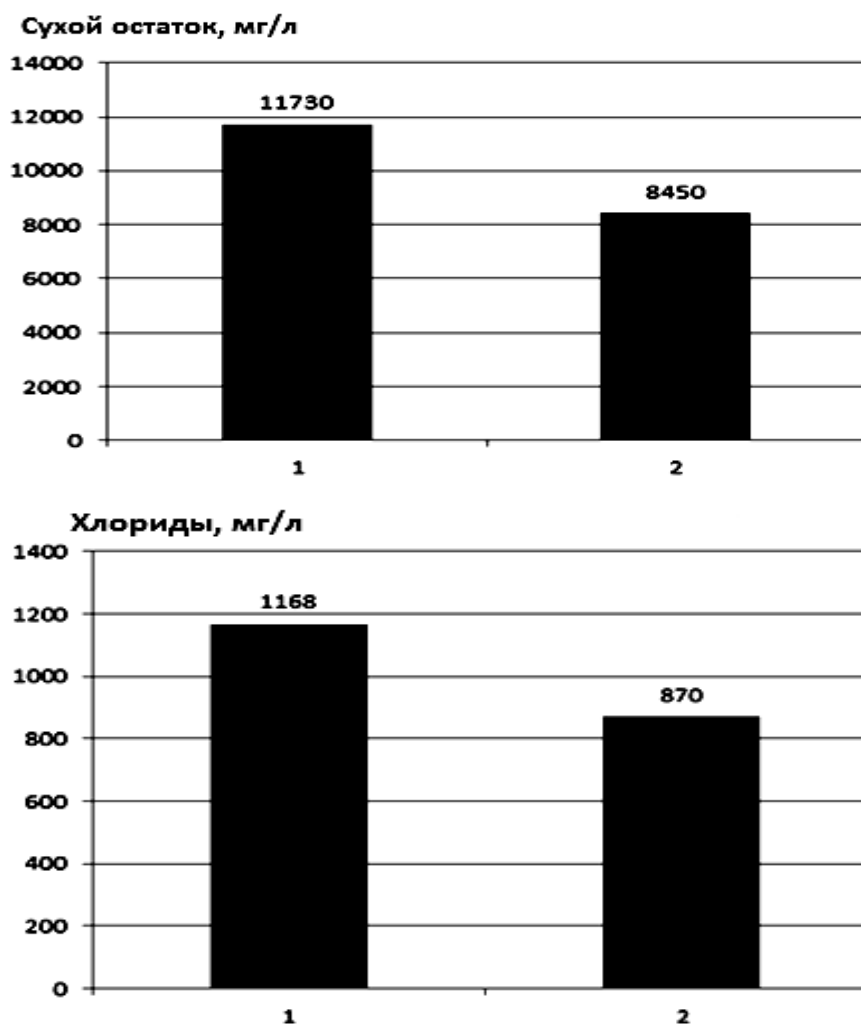
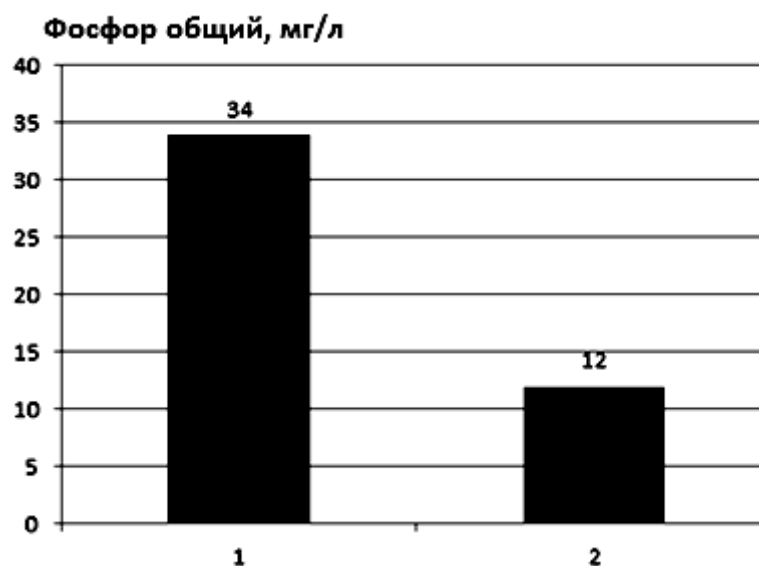


Рис. 2. Результаты очистки сточной воды сырзавода: 1 – концентрация загрязнителя до очистки; 2 – концентрация загрязнителя после очистки



Окончание рис. 2

Табл. 3. Результаты обработки сточной воды мясокомбината

Режим обработки	Фосфор, мг/л	pH	Сухой остаток, мг/л	Азот аммонийный, мг/л	ХПК, мгО ₂ /л
0 (сточная вода)	9,9	6,8	2620	12,3	1700
1 (электролиз совместно с рабочей дозой БФ)	2,4	7,4	1812	5,1	804
2 (флотокоагуляция)	7,1	7,1	1944	2,6	1330
4 (электролиз совместно с двойной рабочей дозой БФ)	0,58	7,7	1781	6,2	298

Следовательно, комбинирование различных способов очистки усиливает эффективность удаления ключевых загрязнителей сточных вод, что подтверждено на примере обработки сточных вод пищевых предприятий: сырзавода и мясокомбината [12]. Представленная редукция удаления загрязнителей достигнута в промышленных условиях, что позволит значительно проще масштабировать аналогичные технологические решения на другие объекты [13]: локальные очистные сооружения и/или водоподготовку.

Функциональное описание последовательности обработки сточной воды (см. рис. 3):

- сточная вода поступает в емкость регулировки расхода, где происходит предварительная фильтрация;

- вода подается в электролизный модуль; в электролизный модуль предварительно вносится биоцидный флокулянт; далее происходят комплексные процессы окисления органических загрязнителей (AOPs), их коагулирование и флокуляция;

- на выходе электролизного модуля с использованием гидроциклонов происходит разделение взвешенных частиц и потока очищенной воды (для повышения эффективности работы флотатора);

- флотатор выполняет отделение полученных взвешенных загрязнителей от сточной воды;

- окончательно доочищаются сточные воды на фильтрующих элементах;

- продукты очистки отводятся в емкость осадка (шлама).



Рис. 3. Усовершенствованная схема локальных сооружений очистки сточных вод пищевых предприятий

Заключение

При проведении обработки сточных вод разными способами очистки отдельно не удалось достичь требуемого качества водного раствора. Была обоснована комбинация технологических решений и подтверждена эффективность такой схемы результатами исследования очистки сточной воды сырзавода и мясокомбината. На основе исследований предложенной структуры локальных сооружений очистка сточных вод пищевых предприятий определена последовательность обработки во-

дных растворов, которая обеспечивает минимизацию антропогенного воздействия на геоэкосистемы и позволяет ставить задачи выполнения требований ресурсоэффективности.

Последующие исследования обосновано нацелить на создание технологий интенсификации биологических процессов, которые происходят в водных растворах на основе воздействия физических факторов и построения математических моделей прогнозирования синергетических результатов при использовании разных способов водоподготовки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Храмцов, А. Г.** Промышленная переработка вторичного молочного сырья / А. Г. Храмцов, С. В. Василисин. – Москва: ДеЛи принт, 2003. – 100 с.
2. **Евдокимов, И. А.** Обработка молочного сырья мембранными методами / И. А. Евдокимов, Д. Н. Володин, М. В. Головкина // Молочная промышленность. – 2012. – № 2. – С. 34–37.
3. **Корчик, Н. М.** Технологии очистки сточных вод предприятий пищевой промышленности [Электронный ресурс] / Н. М. Корчик // Сотрудничество для решения проблемы отходов: материалы 3 Междунар. конф. – Харьков, 2006. – Режим доступа: <http://www.waste/com.ua/cooperation/2006/theses/korchik.html>. – Дата доступа: 02.09.2022.
4. **Малахова, Н. Д.** Очистка сточных вод мясоперерабатывающих предприятий / Н. Д. Малахова // Мясная индустрия. – 2001. – № 5. – С. 49–51.
5. **Stasinakis, A.** Use of selected advanced oxidation processes (AOPs) for wastewater treatment / A. Stasinakis // Global NEST journal. – 2008. – Vol. 10. – P. 376–385.
6. **Oliveira, L.** Digital Services in Crisis, Disaster, and Emergency Situations / L. Oliveira, F. Tajariol, L. Gonçalves // IGI Global. – 2021. – P. 411.
7. Optimization of UV/H₂O₂ and ozone wastewater treatment by the experimental design methodology / J. A. Malvestiti [et al.] // Environmental technology. – 2019. – Vol. 40. – P. 1910–1922.
8. **Мазоренко, Д. І.** Інженерна екологія сільськогосподарського виробництва / Д. І. Мазоренко, В. Г. Цапко, Ф. І. Гончаров. – Київ: Знання, 2006. – 376 с.
9. **Штепа, В. Н.** Концепция управления оборудованием водоочистки с учетом доминирующего загрязнителя / В. Н. Штепа, А. П. Левчук // Агропанорама. – 2018. – № 5. – С. 33–38.
10. **Штепа, В. М.** Обґрунтування та розробка критерію енергоефективності функціонування електротехнологічних систем водопідготовки / В. М. Штепа, Ф. І. Гончаров, М. А. Сироватка // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Сер. Техніка та енергетика АПК: зб. наук. пр. – Київ: НУБіПУ, 2011. – Вип. 161. – С. 187–193.
11. **Штепа, В. М.** Обґрунтування робочої міри ефективності електротехнологічної водоочистки [Електронний ресурс] / В. М. Штепа // Енергетика і автоматика. – 2018. – № 4. – С. 99–111. – Режим доступа: <http://journals.nubip.edu.ua/index.php/Energiya/article/view/11558>. – Дата доступа: 27.05.2022.
12. **Штепа, В. Н.** Адаптивные решения интеллектуального управления очистными сооружениями / В. Н. Штепа, Н. А. Заец, Д. Г. Алексеевский // Новые методы и технологии в водоснабжении и водоотведении: сб. тр. / Ин-т ЖКХ ПАП Беларуси; под общ. ред. В. О. Китикова. – Минск: БГТУ, 2022. – С. 281–287.
13. **Shtepa, V. N.** Preventive improvement of wastewater treatment efficiency / V. N. Shtepa, Ye. Yu Chernysh, D. V. Danilov // Journal of Engineering Sciences. – 2021. – Vol. 8, iss. 1. – P. H8–H15.

Статья сдана в редакцию 14 октября 2022 года

Владимир Николаевич Штепа, д-р техн. наук, доц., проректор по научной работе, Полесский государственный университет. E-mail: shtepa.v@polessu.by.

Сергей Васильевич Тыновец, ст. преподаватель, Полесский государственный университет.

Алексей Борисович Шикунец, магистрант, Полесский государственный университет.

Vladimir Nikolayevich Shtepa, DSc (Engineering), Associate Prof., Pro-Rector for Research, Polesky State University. E-mail: shtepa.v@polessu.by.

Sergey Vasilievich Tynovets, senior lecturer, Polesky State University.

Alexey Borisovich Shykunets, MSc (Engineering), Polesky State University.