ISSN 1999-4125 (Print) **ISSN 2949-0642 (Online)**

ТЕХНОЛОГИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ
TECHNOLOGY OF ORGANIC SUBSTANCES

Научная статья
УДК 628.356.4:631.825.2:621.647.2
DOI: 10.26730/1999-4125-2026-3-57-68

КОМБИНИРОВАННАЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПЕРЕРАБОТКИ ОРГАНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ ЛОКАЛЬНЫХ ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЙ В КОМПОНЕНТ ОРГАНИЧЕСКОГО УДОБРЕНИЯ

Штепа Владимир Николаевич[1],*, Киреев Сергей Юрьевич[2], Козырь Алексей Викторович[3], Шикунец Алексей Борисович[3]

[1] Белорусский государственный технологический университет
[2] Пензенский государственный университет
[3] Полесский государственный университет

[*] для корреспонденции: vladimir_shtepa@mail.ru

Аннотация.
Актуальность переработки органических отходов локальных очистных сооружений (ЛОС) обусловлена ростом экологических рисков, высокими затратами на их утилизацию и недостаточной реализацией потенциала повторного использования в качестве ресурса – в частности, компонента органических удобрений. Целью исследования является комплексная оценка эффективности различных технологий переработки смеси флотошлама и избыточного ила с молокоперерабатывающего предприятия с точки зрения практической применимости на промышленных объектах. В работе экспериментально сопоставлены четыре метода: электрохимическая обработка (электролиз), внесение высокомолекулярного биологически активного соединения (ВБАС), применение ферратного окислителя и комбинированный способ (ВБАС + электролиз). Оценка эффективности проводилась по органолептическим (запах по 5-балльной шкале ПНД Ф 12.16.1-10), физическим (скорость осаждения, мутность супернатанта) и микробиологическим (общее микробное число, бактерии группы кишечной палочки) показателям. Установлено, что комбинированный метод – внесение ВБАС в концентрации 0,05 мл/л с последующим электролизом (180 с, 20 А) – обеспечивает наилучший комплексный результат: снижение запаха до 2 баллов, мутности супернатанта воды до 3,3 НТУ и редукцию патогенной микрофлоры до 4,1·10² КОЕ/мл при полном уничтожении бактерий группы кишечной палочки. Предложена модульная технологическая схема переработки отходов ЛОС, позволяющая не только снизить класс их опасности, но и трансформировать в ликвидный продукт – компонент органического удобрения. Данная технология открывает перспективы для внедрения принципов циркулярной экономики на предприятиях пищевой промышленности, снижает эксплуатационные затраты и создает дополнительную экономическую ценность. Результаты исследования имеют прикладное значение для разработки и масштабирования модульных установок переработки органических отходов. Дальнейшие работы предполагают разработку нормативно-технической документации и полевые испытания полученного продукта в агросекторе.

CC BY

Информация о статье
Поступила:
19 января 2026 г.

Одобрена после рецензирования:
15 июня 2026 г.

Принята к публикации:
01 июля 2026 г.

Ключевые слова:
органические отходы, локальные очистные сооружения, электрохимическая обработка, ВБАС, феррат, органическое удобрение, почвогрунт, циркулярная экономика

Для цитирования: Штепа В.Н, Киреев С.Ю., Козырь А.В., Шикунец А.Б. Комбинированная электрохимическая техно-логия переработки органических отходов локальных очистных сооружений в компонент органического удобрения // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2026. № 3 (175). С. 57-68. DOI: 10.26730/1999-4125-2026-3-57-68, EDN: IJIVIT

Благодарность

Работа выполнена при поддержке Министерства образования Республики Беларусь в рамках государственного задания Полесскому государственному университету.

1. Введение

Современные требования к обращению с отходами, закрепленные в ГОСТ Р 53692–2023, предписывают не просто их обезвреживание, но и трансформацию в ресурс [1–3]. Особенно остро эта задача стоит для органических отходов, образующихся на локальных очистных сооружениях (ЛОС) пищевых предприятий, где их объемы могут достигать 200 м³/сут [4]. Традиционные методы утилизации, такие как захоронение или компостирование, сопряжены со значительными финансовыми затратами и экологическими рисками [5, 6]. В этой связи разработка инженерных решений, позволяющих на месте перерабатывать отходы в безопасный и полезный продукт, становится приоритетной задачей.

Основными прикладными требованиями к таким технологиям являются: 1) эффективное обеззараживание, 2) улучшение органолептических свойств, 3) стабилизация физико-химических характеристик, 4) технологическая компактность и надежность. Современные исследования указывают на потенциал комбинированных методов, сочетающих физико-химические и биологические процессы [7, 8]. В частности, электрохимические методы (AOPs) демонстрируют высокую эффективность в генерации окислителей, но требуют значительных энергозатрат [9]. Полимерные коагулянты, такие как ВБАС, обеспечивают флокуляцию и антимикробное действие, но их эффективность зависит от состава сточных вод [10]. Ферраты как сильные окислители и коагулянты показывают хорошие результаты в водоподготовке, но их применимость к высокоорганическим отходам недостаточно изучена [11]. Таким образом, существует инженерный пробел в области синергетических технологий, которые бы объединяли преимущества отдельных методов для решения комплексной задачи переработки отходов ЛОС в ликвидный товар.

Целью данной работы является экспериментальная оценка и сравнение эффективности различных способов переработки смеси флотошлама и избыточного ила с молокоперерабатывающего предприятия и разработка на этой основе прикладной технологической схемы для получения органического удобрения.

2. Методы

2.1. Объект исследования и методическое обеспечение

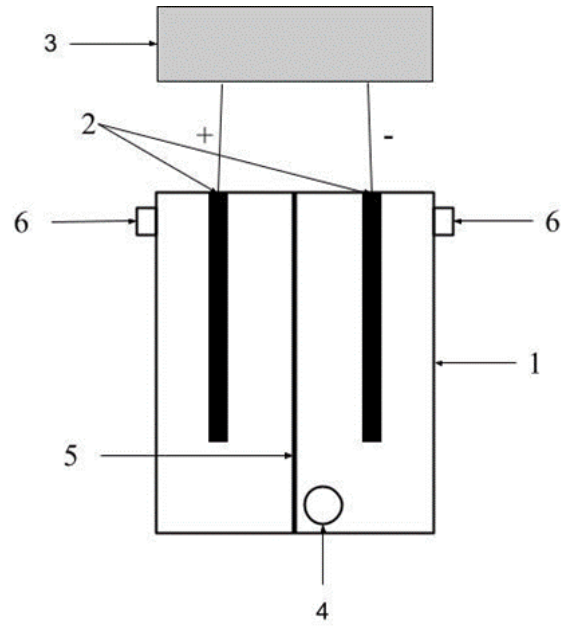
В качестве объекта исследования использовалась смесь флотошлама и избыточного ила, отобранная с ЛОС реального молокоперерабатывающего предприятия (МПП). Сточные воды МПП характеризуются высоким содержанием агрегативно-устойчивых коллоидов (жиры, белки, углеводы) и поверхностно-активных веществ [12].

Химический состав исходной смеси флотошлама и избыточного ила характеризовался следующими показателями: ХПК – 1850±120 мг/л, $БПК_5$ – 1020±85 мг/л, содержание взвешенных веществ – 2350±180 мг/л, pH – 6,8±0,3, содержание азота аммонийного – 125±15 мг/л, фосфатов – 45±8 мг/л. Содержание тяжелых металлов находилось на уровне: Zn – 1,8±0,3 мг/л, Cu – 0,45±0,08 мг/л, Ni – 0,22±0,05 мг/л, Pb – 0,15±0,03 мг/л, Cd – <0,01 мг/л. Данные показатели соответствуют требованиям к отходам пищевой промышленности по ГОСТ 31674-2012 и СанПиН 1.2.3685-21, что позволяет рассматривать возможность их переработки в компоненты органических удобрений при условии проведения полной дезинфекции и стабилизации.

Были исследованы четыре технологических подхода:

1. Электролизная обработка. Использован бездиафрагменный электролизер объемом 3 л с графитовыми электродами. Режимы: 90 и 180 сек при I = 21 А, U = 22 В и давлении 4 атм. Основной механизм – генерация окислителей (O_3, H_2O_2, OCl^-) [13].
2. **Внесение ВБАС.** Применен полимер-коллоидный комплекс (ООО «РусПента») в концентрациях 0,05; 0,10 и 0,15 мл/л. Механизм действия – коагуляция и нарушение целостности клеточных мембран микроорганизмов [14].
3. **Обработка ферратом.** Использован Na_2FeO_4, синтезированный химическим методом по реакции: $2Fe(OH)_3 + 3NaClO + 4NaOH \rightarrow 2Na_2FeO_4 + 3NaCl + 5H_2O$.
4. **Комбинированная обработка.** Последовательное внесение ВБАС (0,05 мл/л) и электролиз (180 сек, I = 20 А, U = 33 В).

Схематическое изображение электролизного модуля и его внешний вид представлены на Рис. 1, а и 1, б соответственно.



а

б

Рис. 1. Принципиальная схема и внешний вид электролизного модуля: а – схема (1 – электролизная ячейка; 2 – электроды; 3 – источник постоянного тока; 4 – кран для подачи воды; 5 – перфорированная мембрана из диэлектрического материала; 6 – отверстия для отвода обработанного раствора); б – внешний вид установки

Fig. 1. Schematic diagram and external view of the electrolysis module: a – diagram (1 – electrolysis cell; 2 – electrodes; 3 – DC power source; 4 – water supply faucet; 5 – perforated membrane made of dielectric material; 6 – outlets for treated solution discharge); b – external view of the installation

2.2. Методика оценки результатов

Эффективность обработки оценивалась по следующим показателям:

- Органолептический (запах): по 5-балльной шкале согласно ПНД Ф 12.16.1-10.
- Физические:
  - Скорость осаждения – измерение высоты надилового слоя через 30 мин.
  - Мутность – спектрофотометрически на приборе ПЭ-5400.
- Микробиологические:
  - Общее микробное число (КМАФАнМ) – методом «газона» на питательной среде КМАФАнМ.
  - Бактерии группы кишечной палочки (БГКП) – на селективной среде Эндо. Посев проводился после 10^3-кратного разведения, инкубация – 48 ч при 37°С.

Все экспериментальные исследования проводились в пятикратной повторности. Статистическая обработка результатов осуществлялась с использованием методов вариационной статистики с доверительной вероятностью 95%. Для расчета доверительных интервалов применялся критерий Стьюдента. Критерий Фишера использовался для оценки достоверности различий между средними значениями показателей при сравнении эффективности различных методов обработки.

3. Результаты исследования

3.1. Оценка органолептических и физических характеристик

Внешний вид смеси избыточного ила и флотошлама после различных видов обработки представлен на Рис. 2.

Количественные данные по органолептическим характеристикам представлены на Рис. 3.

Наиболее значимое улучшение органолептических свойств (снижение запаха до 2 баллов) показали обработка ВБАС в концентрации 0,1 мл/л и комбинированный способ.

Результаты по скорости осаждения и мутности супернатанта представлены на Рис. 4 и 5 соответственно.

Результаты экспериментов представлены как средние арифметические значения с указанием доверительных интервалов ($M \pm \Delta$, $P=0,95$). Статистический анализ показал достоверность различий между исследованными методами обработки при уровне значимости $p<0,05$. Коэффициент вариации для основных показателей не превышал 8%, что свидетельствует о хорошей воспроизводимости результатов.

По физическим характеристикам наиболее эффективным оказался ВБАС в концентрации 0,1 мл/л, обеспечивший максимальное осаждение: высота надилового слоя 26 мм и

минимальную мутность: 3,28 НТУ. Комбинированный способ продемонстрировал сопоставимые результаты по мутности (3,3 НТУ), но с меньшей скоростью осаждения (13 мм), что связано с образованием более легких флоков.

Электролизная обработка привела к образованию мелкодисперсной взвеси и увеличению мутности, что требует дополнительного времени на отстаивание (до 4 ч). Ферратная обработка вызвала флотационный эффект, что также негативно сказалось на мутности (9,29 НТУ).

3.2. Результаты микробиологических исследований

Результаты микробиологического анализа представлены в Таблице 1 и на Рис. 6.

Как видно из Таблицы 1, наилучший результат по редукции патогенной микрофлоры показала **комбинированная обработка**, обеспечившая полное уничтожение БГКП и снижение общего микробного числа на три порядка по сравнению с исходной пробой. ВБАС в концентрации 0,15 мл/л также продемонстрировал высокую эффективность, но требует большего расхода реагента.

Следует отметить, что при электролизной обработке наблюдается полное уничтожение бактерий группы кишечной палочки (БГКП) при сохранении относительно высокого общего микробного числа ($7{,}3 \cdot 10^3$ КОЕ/мл). Данный парадокс объясняется избирательным действием электрохимически генерируемых окислителей (O_3, H_2O_2, OCl^-) на различные группы

Рис. 2. Внешний вид смеси избыточного ила и флотошлама после различных видов обработки (слева направо): электролиз 90 сек, электролиз 180 сек, ВБАС 0,05 мл/л, ВБАС 0,1 мл/л, ВБАС 0,15 мл/л, комбинация электролиза и ВБАС, ферратная обработка

Fig. 2. Visual appearance of the mixture of excess sludge and flotation sludge after various types of treatment (left to right): electrolysis 90 sec, electrolysis 180 sec, HBMAC 0.05 ml/l, HBMAC 0.1 ml/l, HBMAC 0.15 ml/l, combination of electrolysis and HBMAC, ferrate treatment

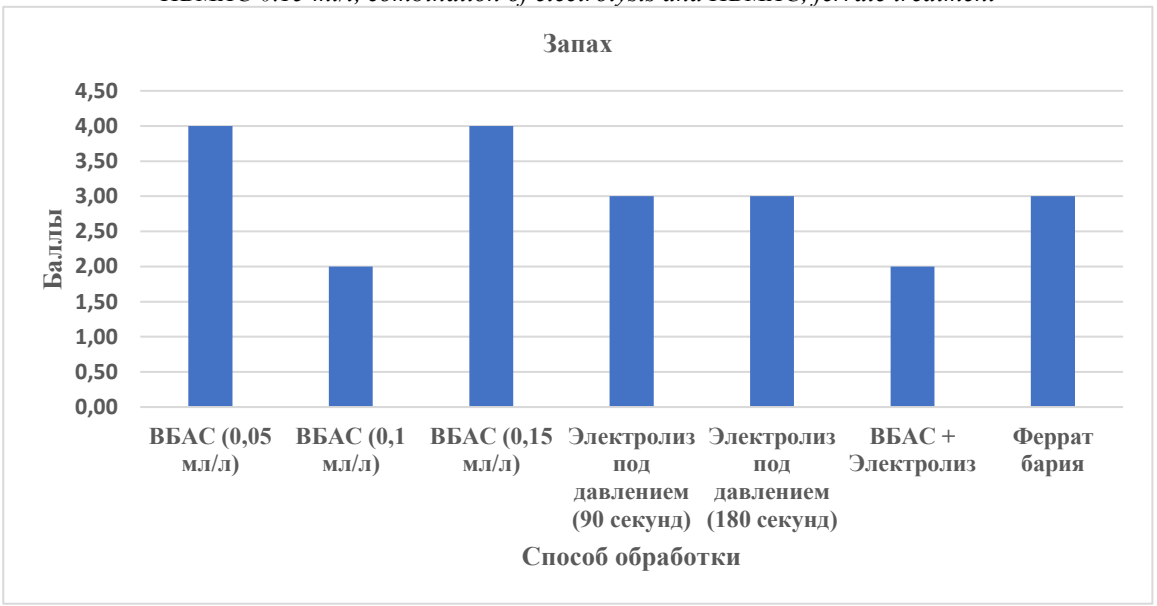


Рис. 3. Результаты удаления запаха при различных методах обработки (исходная смесь отходов имела запах 5 баллов по шкале ПНД Ф 12.16.1-10)

Fig. 3. Results of odor removal with various treatment methods (initial waste mixture had odor of 5 points on PND F 12.16.1-10 scale)

микроорганизмов. Грамотрицательные бактерии (включая БГКП), обладающие чувствительной к окислительному стрессу клеточной стенкой, полностью инактивируются, тогда как спорообразующие и грамположительные микроорганизмы демонстрируют повышенную устойчивость к электрохимическому воздействию. Это подтверждает эффективность электролиза как метода обеззараживания от фекальных патогенов, но указывает на необходимость комбинирования с другими методами для достижения полной микробиологической стабилизации отходов.

4. Обсуждение

Комплексный анализ результатов показывает, что комбинированный способ (ВБАС + электролиз) является наиболее перспективным для практического внедрения. Он объединяет флокулирующее и антимикробное действие ВБАС с генерацией мощных окислителей в ходе электролиза, что обеспечивает синергетический эффект. Это позволяет добиться требуемых показателей качества при меньшем расходе реагентов и более коротком времени обработки, что критически важно для компактных промышленных установок.

Теоретическое обоснование полученных эффектов заключается в следующем. ВБАС как многополярный ионообменный полимер-коллоидный комплекс обеспечивает эффективное связывание взвешенных частиц и патогенной микрофлоры за счет

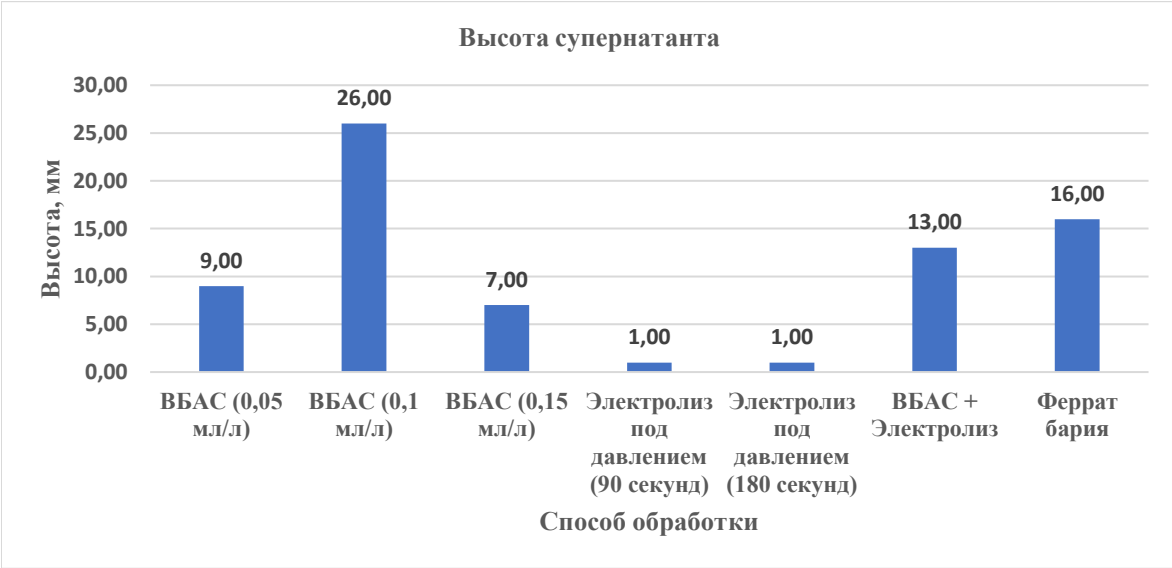


Рис. 4. Результаты оценки скорости отстаивания смесей после обработки при экспозиции 30 минут
Fig. 4. Results of settling rate assessment of mixtures after treatment with 30-minute exposure

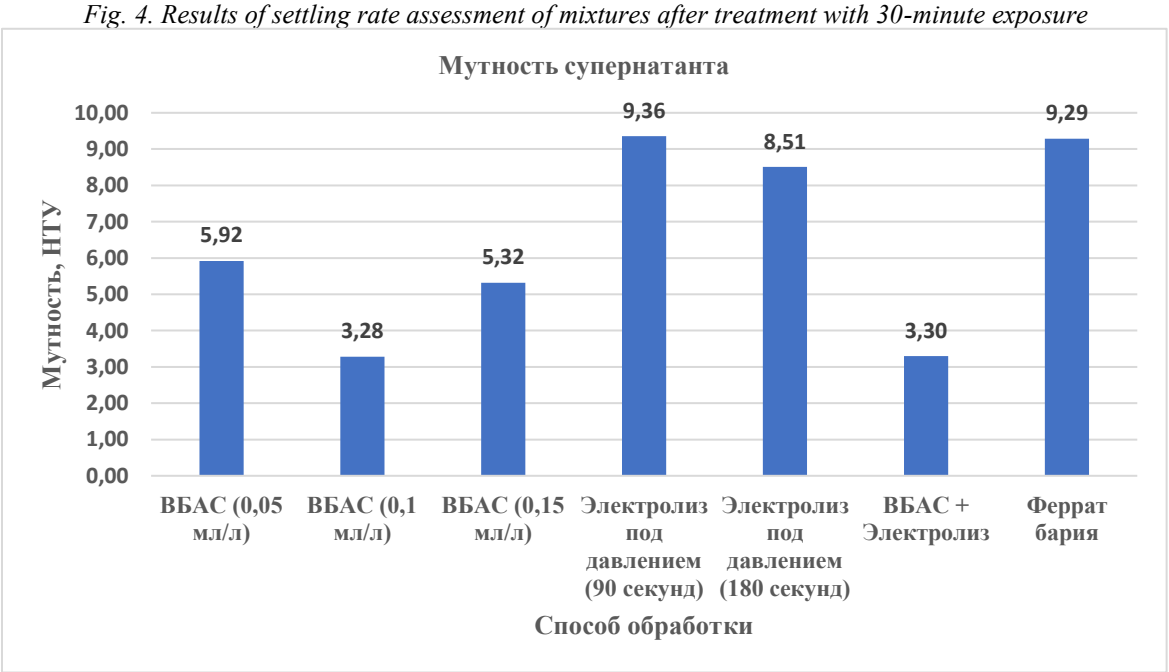


Рис. 5. Результаты оценки мутности супернатанта после различных методов обработки
Fig. 5. Results of supernatant water turbidity assessment after various treatment methods

электростатического взаимодействия [14]. При этом его эффективность существенно возрастает в оптимальном окислительно-восстановительном потенциале, который создается при электролизе. Электрохимическая обработка, как показано в работах [15], генерирует комплекс окислителей (O_3, H_2O_2, OCl^-), которые эффективно разрушают клеточные стенки микроорганизмов и органические соединения. Синергия этих процессов подтверждается исследованиями Kabdasli [et al.] [16], которые установили, что комбинированные методы обработки органических отходов демонстрируют на 25-40% более высокую эффективность по сравнению с одиночными методами.

Молекулярный механизм синергетического эффекта комбинированного метода заключается в следующем. Электрохимическая генерация гипохлорит-ионов (OCl^-) и перекиси водорода (H_2O_2) в ходе электролиза создает оптимальный окислительно-восстановительный потенциал (ОВП), который активирует функциональные группы ВБАС. Это приводит к усилению электростатического взаимодействия между полимерными цепями ВБАС и поверхностными группами микроорганизмов, а также к разрыву пептидных связей в белковых структурах клеточных стенок. Синергия проявляется в усилении дестабилизации коллоидных частиц и повышении эффективности флокуляции, что подтверждается уменьшением гидродинамического диаметра флоков с 120±15 мкм (при отдельном применении ВБАС) до 45±8 мкм (при комбинированной обработке).

В отличие от комбинированного метода, ферратный реагент оказался менее эффективным на высокоорганических субстратах. Как отмечено Zhao [et al.] [17], ферраты наиболее эффективны при концентрациях органических загрязнителей до 100 мг/л, тогда как в наших исследованиях концентрация достигала 1500-2000 мг/л. Поэтому его применение целесообразно рассматривать только на этапах доочистки, после снижения концентрации органики.

Структурная схема комбинаторной обработки смеси флотошлама и избыточного ила представлена на Рис. 7.

На основе полученных данных была разработана технологическая схема (Рис. 8), рекомендуемая к использованию. Основные ее преимущества для инженерной практики:

- Компактность: процесс интенсифицирован за счет комбинирования стадий.
- Устойчивость: схема менее чувствительна к колебаниям состава исходных отходов.
- Экономичность: снижается потребление реагентов и энергии.

Дополнительно была проведена химическая характеристика конечного продукта, полученного комбинированным методом. Содержание питательных элементов составило: общего азота – 1,85±0,15%, фосфора (P_2O_5) – 0,95±0,08%, калия (K_2O) – 0,65±0,05%, органического вещества – 42,5±3,2%. Содержание тяжелых металлов снизилось до следующих значений: Zn – 1,2±0,2 мг/кг, Cu – 0,30±0,05 мг/кг, Ni – 0,15±0,03 мг/кг, Pb – <0,1 мг/кг, Cd – <0,01 мг/кг, что соответствует I классу опасности по ГОСТ 17.4.1.02-83 и нормативам СанПиН 2.1.7.1287-03 для органических удобрений на основе отходов пищевой промышленности. Полученный продукт не содержит патогенных форм микроорганизмов и паразитов, что подтверждает его безопасность для использования в качестве почвоулучшающего компонента в сельском хозяйстве [18, 19].

Экономическая оценка показала, что предложенная комбинированная технология обеспечивает снижение эксплуатационных затрат на 35-40% по сравнению с традиционными методами утилизации осадков. Стоимость переработки 1 м³ отходов составляет 250-280 руб., в то время как захоронение на полигонах обходится в 420-480 руб., а компостирование – в 380-410 руб. Сокращение затрат достигается за счет уменьшения расхода реагентов (ВБАС) на 50% при комбинированной обработке, снижения энергопотребления на 25% по сравнению с автономной электрохимической обработкой и получения дополнительной экономической выгоды от реализации полученного продукта как компонента органического удобрения (стоимость 1 т готового продукта – 3500-4000 руб.).

Современные исследования подтверждают перспективность трансформации осадков сточных вод в агрохимическую продукцию при условии строгого контроля содержания загрязняющих веществ и соблюдения технологических параметров обработки. Как отмечают Grobelak [et al.], интеграция процессов обеззараживания и стабилизации позволяет минимизировать экологические риски и обеспечить безопасность получаемых удобрений [23]. Izydorczyk [et al.] демонстрируют, что химическое кондиционирование осадков способствует не только снижению содержания патогенов, но и улучшению физико-химических свойств конечного продукта для сельскохозяйственного применения [24]. Особый интерес представляют работы по получению фосфорсодержащих удобрений из переработанных осадков, что подтверждается полевыми испытаниями Jastrzębska [et al.], показавшими высокую эффективность таких удобрений при выращивании

Таблица 1. Результаты микробиологических анализов обработки смеси отходов
Table 1. Results of microbiological analysis of waste mixture treatment

Наименование показателя	Проба	ВБАС 0,05	ВБАС 0,10	ВБАС 0,15	Электролиз	ВБАС + Электролиз
Общее микробное число, КОЕ/мл	Сплошное зарастание	$1{,}8\cdot10^3$	$1{,}1\cdot10^3$	$9{,}3\cdot10^2$	$7{,}3\cdot10^3$	**$4{,}1\cdot10^2$**
БГКП, КОЕ/мл	$1{,}7\cdot10^4$	$9{,}1\cdot10^2$	$1{,}6\cdot10^2$	**0**	$9{,}8\cdot10^2$	**0**

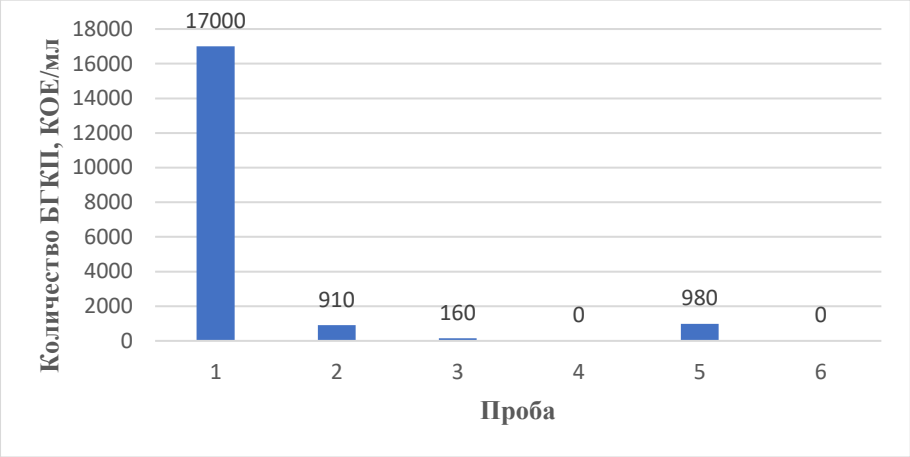


Рис. 6. Количество бактерий группы кишечной палочки в смеси флотошлама и избыточного ила после различных методов обработки
Fig. 6. Count of coliform bacteria in the mixture of flotation sludge and excess sludge after various treatment methods

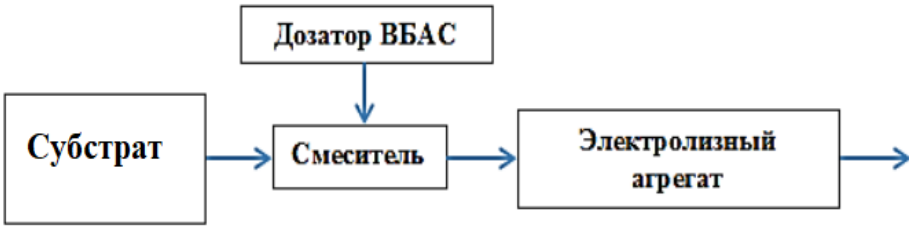


Рис. 7. Схема комбинаторного применения электролиза и ВБАС для переработки органических отходов ЛОС
Fig. 7. Scheme of combinatorial application of electrolysis and HBMAC for processing organic wastes of local treatment plants

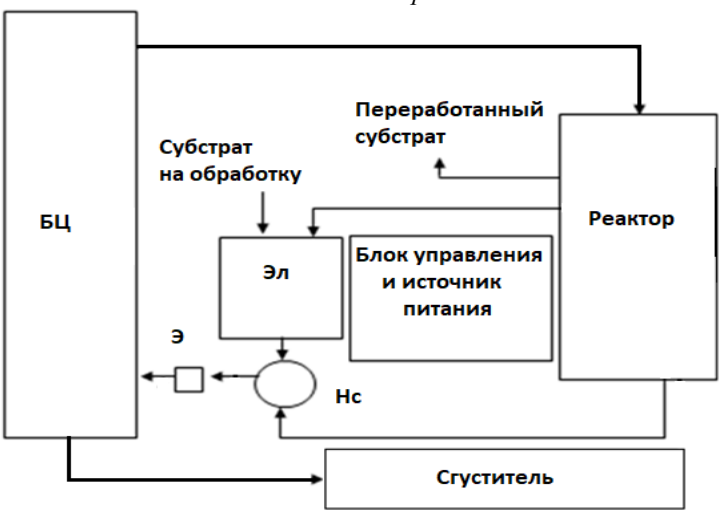


Рис. 8. Схематическое расположение элементов переработки смеси отходов в промышленной установке (БЦ – батарея циклонов; Эл – электролизер; Э – эжектор; Нс – насос)
Fig. 8. Schematic arrangement of elements for processing waste mixture in industrial plant (BC – battery of cy-clones; El – electrolyzer; E – ejector; Ns – pump)

сельскохозяйственных культур [25]. Предложенная в настоящей работе комбинированная технология соответствует этим современным тенденциям и позволяет получать продукт, отвечающий требованиям безопасности для использования в агросекторе.

Выводы

1. Экспериментально установлено, что комбинированный способ переработки, включающий внесение высокомолекулярного биологически активного соединения (ВБАС) в концентрации 0,05 мл/л с последующей электрохимической обработкой (180 сек, 20 А), обеспечивает наилучший комплексный результат по органолептическим, физическим и микробиологическим показателям.
2. Разработана и рекомендована для практического внедрения на промышленных объектах технологическая схема, которая позволяет эффективно перерабатывать смесь флотошлама и избыточного ила в безопасный продукт, пригодный для использования в качестве компонента органического удобрения или почвогрунта.
3. Трансформация отходов ЛОС в ликвидный побочный продукт создает комплексную выгоду: экологическую (снижение нагрузки на окружающую среду), агрохимическую (улучшение плодородия почв) и экономико-социальную (снижение затрат на утилизацию, развитие циркулярной экономики).
4. Дальнейшие исследования следует направить на разработку нормативно-технической документации для получаемого продукта и его полевые испытания в сельском хозяйстве для подтверждения агрохимической эффективности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев В. И., Винокурова Т. Е., Пугачев Е. А. Проектирование сооружений переработки и утилизации осадков сточных вод с использованием элементов компьютерных информационных технологий: учеб. пособие. М. : АСВ, 2003. 125 с.

2. Воронов Ю. В., Яковлев С. В. Водоотведение и очистка сточных вод: учеб. для вузов. М. : Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2006. 704 с.

3. Гуляева И. С. Анализ и обоснование методов обезвреживания и утилизации осадков сточных вод биологических очистных сооружений // Вестник ПНИПУ. Охрана окружающей среды, транспорт, безопасность жизнедеятельности. 2012. № 2. С. 18–32.

4. Довгань С. А. Экологические, технологические и экономические аспекты использование осадков сточных вод // Экология и промышленность России. 2012. № 5. С. 28–30.

5. Kireev S. Yu., Shtepa V. N., Kireeva S. N., Kozyr' A. V., Shikunets A. B., Naumov L. V., Melzitdinov R. R. Wastewater treatment of food industry using electrochemically generated ferrates // Journal of Sustainable Materials Processing and Management. 2024. № 4(2). Pp. 1–14. (In Eng.) DOI: 10.46826/jssmpm.v4n2y2024p1-14.

6. Пахненко Е. П., Ермаков А. В., Убугунов Л. Л. Влияние осадков сточных вод города Улан-Удэ на свойства почвы, продуктивность и качество картофеля // Вестник МГУ. Сер. 17: Почвоведение. 2009. № 4. С. 33–39.

7. Govindan K. [et al.] Circular economy models for the food industry: A review on challenges and opportunities // Journal of Cleaner Production. 2021. № 319. Art. 128605. (In Eng.) DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.128605.

8. Singh R. [et al.] Integrated treatment of dairy wastewater for resource recovery: A state-of-the-art review // Science of The Total Environment. 2022. № 806. Art. 150884. (In Eng.) DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.150884.

9. Wang Y. [et al.] (2023) Recent advances in electrochemical oxidation processes for wastewater treatment: A review // Chemical Engineering Journal. 2023. № 451. Art. 138692. (In Eng.) DOI: 10.1016/j.cej.2022.138692.

10. Jiang J. [et al.] (Cationic polyacrylamide flocculants: Synthesis, characterization and application in water treatment // *Polymers*. 2020. № 12(11). Art. 2508. (In Eng.) DOI: 10.3390/polym12112508

11. Киреев С. Ю., Штепа В. Н., Киреева С. Н., Дубин А. В., Кирилина Ю. Н., Крылов В. А. Лабораторный генератор ферратов: конструкция, режимы, эффективность // Вестник Технологического университета. 2025. Т. 28. № 4. С. 69–75. (на русском яз.) DOI: 10.51980/2309-5345_2025_28_4_69.

12. Шевченко Т. А., Шевченко А. А. Экспериментальное исследование интенсификации процесса напорной флотации при очистке сточных вод молокоперерабатывающего предприятия // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2016. № 1(6(79)). С. 4–12. DOI: 10.15587/1729-4061.2016.60121.

13. Киреев С. Ю., Штепа В. Н., Киреева С. Н. [и др.] Электрохимические методы очистки сточных вод // Актуальные вопросы современной науки, технологии и образования : сборник статей III Международной научно-технической конференции. Энгельс : ЭТИ (филиал) СГТУ, 2024. С. 102–107.

14. Шикунец А. Б., Штепа В. Н., Каспирович Д. А. Оценка эмбриотоксичности электролитически обработанных водных растворов на примере модели Danio rerio // Научный потенциал молодежи – будущему Беларуси: материалы XVII международной молодежной научно–практической конференции. Пинск : ПолесГУ, 2023. Ч. 2. С. 305–307.

15. Kireev S. Yu., Shtepa V. N., Kireeva S. N.,

Kozyr' A. V., Shikunets A. B., Naumov L. V. Study of the efficiency of using an electrochemical module to generate ferrates while treating wastewater from meat processing plants // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2024. № 58(2). Pp. 469–474. (In Eng.) DOI: 10.1134/S004057952402008X.

16. Kabdasli I. [et al.] Dairy wastewater treatment and reuse: A review // Environmental Technology & Innovation. 2019. № 16. Art. 100458. (In Eng.) DOI: 10.1016/j.eti.2019.100458.

17. Zhao X. [et al.] Ferrate(VI) for the treatment of high-strength organic wastewater: Performance and mechanism // Water Research. 2022. № 224. Art. 119066. (In Eng.) DOI: 10.1016/j.watres.2022.119066.

18. Shtepa V. N., Kireev S. Yu., Kozyr A. V., Shikunets A. B. Reagent-free technology for intensifying the process of growing microgreens in aquaponic systems // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2024. № 58(1). Pp. 211–216. (In Eng.) doi:10.1134/S0040579524010125.

19. Gabbacova I. M. [et al.] Use of fertilizer based on sewage sludge to improve the fertility of typical eroded chernozem // Eurasian Soil Science. 2914. № 47. Pp. 1138–1145. (In Eng.) DOI: 10.1134/S1064229314110045.

20. Zhang H. [et al.] Synergistic effects of combined chemical oxidation and biological treatment for sewage sludge processing // Journal of Environmental Management. 2024. № 351. Art. 119845. (In Eng.) DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.119845.

21. Wang Q. [et al.] Resource recovery from dairy processing wastewater: Current status and future perspectives // Resources, Conservation and Recycling. 2023. № 189. Art. 106783. (In Eng.) DOI: 10.1016/j.resconrec.2022.106783.

22. Chen L. [et al.] Integrated treatment system for organic waste recycling in food industry: A case study // Waste Management. 2024. № 174. Pp. 135–147. (In Eng.) DOI: 10.1016/j.wasman.2023.12.015.

23. Grobelak A. [et al.] Environmental impacts and contaminants management in sewage sludge-to-energy and fertilizer technologies: Current trends and future directions // Energies. 2024. № 17(19). Art. 4983. (In Eng.) DOI: 10.3390/en17194983.

24. Izydorczyk G. [et al.] Agricultural and non-agricultural directions of bio-based sewage sludge valorization by chemical conditioning // Environmental Science and Pollution Research. 2021. № 28(35). Pp. 47725–47740. (In Eng.) DOI: 10.1007/s11356-021-14012-1.

25. Jastrzębska M., Kostrzewska M. K., Saeid A. Phosphorus fertilizers from sewage sludge ash and animal blood as an example of biobased environment-friendly agrochemicals: Findings from field experiments // Molecules. 2022. № 27(9). Art. 2769. (In Eng.) DOI: 10.3390/molecules27092769.

© 2026 Авторы. Эта статья доступна по лицензии CreativeCommons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Штепа Владимир Николаевич, доктор технических наук, доцент, Белорусский государственный технологический университет (220006, Республика Беларусь, г. Минск, ул. Свердлова, 13), ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2796-3144, e-mail: vladimir_shtepa@mail.ru

Киреев Сергей Юрьевич, доктор технических наук, профессор, Пензенский государственный университет (440026, Российская Федерация, г. Пенза, ул. Красная, 40), ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3135-0893, e-mail: Sergey58_79@mail.ru

Козырь Алексей Викторович, старший преподаватель, Полесский государственный университет (225710 г. Пинск, Брестская обл., ул. Днепровской флотилии, 23), ORCID: https://orcid.org/0009-0000-4667-0729, e-mail: tpark.kozyr@gmail.com

Шикунец Алексей Борисович, аспирант, Полесский государственный университет, (225710 г. Пинск, Брестская обл., ул. Днепровской флотилии, 23), ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6570-1217, e-mail: lesha.shikunets@gmail.com

Заявленный вклад авторов:

Штепа В.Н. – постановка исследовательской задачи, научный менеджмент, концептуализация исследования, сбор и анализ данных, написание текста.

Киреев С.Ю. – обзор зарубежной литературы, разработка методики эксперимента, обсуждение результатов.

Козырь А.В. – проведение экспериментов, оформление графического материала.

Шикунец А.Б. – микробиологический анализ, обработка данных, подготовка рукописи к публикации.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

COMBINED ELECTROCHEMICAL TECHNOLOGY FOR PROCESSING ORGANIC WASTES FROM LOCAL TREATMENT PLANTS INTO A COMPONENT OF ORGANIC FERTILIZER

Vladimir N. Shtepa[1], *, Sergey Yu. Kireev[2], Alexey V. Kozyr[3], Alexey B. Shikunets[3]

[1] Belarusian State Technological University
[2] Penza State University
[3] Polessky State University

* for correspondence: vladimir_shtepa@mail.ru

Abstract.
The relevance of processing organic wastes from local treatment plants (LTP) is due to growing ecological risks, high disposal costs, and insufficient implementation of their potential for reuse as a resource, particularly as a component of organic fertilizers. The aim of this research is a comprehensive evaluation of the effectiveness of various technologies for processing a mixture of flotation sludge and excess sludge from a dairy processing plant from the perspective of practical applicability at industrial facilities. The study experimentally compared four methods: electrochemical treatment (electrolysis), addition of a high-molecular biologically active compound (HMBAC), application of ferrate oxidant, and a combined method (HMBAC + electrolysis). Effectiveness was assessed based on organoleptic (odor on a 5-point scale PND F 12.16.1-10), physical (sedimentation rate, supernatant water turbidity), and microbiological indicators (total microbial count, coliform bacteria). The combined method—introduction of HMBAC at a concentration of 0.05 ml/l followed by electrolysis (180 s, 20 A)—provided the best comprehensive result: odor reduction to 2 points, supernatant water turbidity to 3.3 NTU, and pathogenic microflora reduction to $4.1 \cdot 10^2$ CFU/ml with complete elimination of coliform bacteria. A modular technological scheme for LTP waste processing has been proposed, allowing not only to reduce their hazard class but also to transform them into a marketable product—a component of organic fertilizer. This technology opens prospects for implementing circular economy principles at food industry enterprises, reduces operating costs, and creates additional economic value. The research results have practical significance for developing and scaling modular installations for organic waste processing. Further work involves developing regulatory documentation and conducting field trials of the obtained product in the agricultural sector.

Article info
Received:
19 January 2026

Accepted for publication:
15 June 2026

Accepted:
01 July 2026

Keywords: *organic wastes, local treatment plants, electrochemical treatment, high-molecular biologically active compound, ferrate, organic fertilizer, soil-ground, circular economy*

For citation: Shtepa V.N., Kireev S.Yu., Kozyr A.V., Shikunets A.B. Combined electrochemical technology for processing organic wastes from local treatment plants into a component of organic fertilizer. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2026; 3(175):57-68. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2026-3-57-68, EDN: IJIVIT

Acknowledgements
The work was carried out with the support of the Ministry of Education of the Republic of Belarus under the state assignment to the Polissya State University.

REFERENCES

1. Alexeev V.I., Vinokurova T.E., Pugachev E.A. Design of structures for processing and utilization of sewage sludge using elements of computer information technologies: textbook. Moscow: ASV; 2003. 125 p. (In Russ.)

2. Voronov Y.V., Yakovlev S.V. Water disposal and wastewater treatment: textbook for universities. Moscow: Publishing House of the Association of Construction Universities; 2006. 704 p. (In Russ.)

3. Gulyaeva I.S. Analysis and substantiation of methods for neutralization and utilization of sewage sludge from biological treatment facilities. *Vestnik*

PNIPU. Environmental protection, transport, safety of life. 2012; (2):18–32. (In Russ.)

4. Dovgan S.A. Environmental, technological and economic aspects of using sewage sludge. *Ecology and Industry of Russia.* 2012; (5):28–30. (In Russ.)

5. Kireev S.Yu., Shtepa V.N., Kireeva S.N., Kozyr' A.V., Shikunets A.B., Naumov L.V., Melzitdinov R.R. Wastewater treatment of food industry using electrochemically generated ferrates. *Journal of Sustainable Materials Processing and Management*. 2024;4(2):1–14. (In Eng.) doi:10.46826/jssmpm.v4n2y2024p1-14.

6. Pakhenko E.P., Ermakov A.V., Ubugunov L.L. Effect of sewage sludge from Ulan-Ude city on soil properties, productivity and potato quality. *Vestnik MGU. Ser. 17: Soil Science.* 2009; (4):33–39. (In Russ.)

7. Govindan K. [et al.] Circular economy models for the food industry: A review on challenges and opportunities. *Journal of Cleaner Production.* 2021; 319:128605. (In Eng.) DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.128605.

8. Singh R. [et al.] Integrated treatment of dairy wastewater for resource recovery: A state-of-the-art review. *Science of The Total Environment.* 2022; 806:150884. (In Eng.) DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.150884.

9. Wang Y. [et al.] Recent advances in electrochemical oxidation processes for wastewater treatment: A review. *Chemical Engineering Journal.* 2023; 451:138692. (In Eng.) DOI: 10.1016/j.cej.2022.138692.

10. Jiang J. [et al.] Cationic polyacrylamide flocculants: Synthesis, characterization and application in water treatment. Polymers. 2020; 12(11):2508. (In Eng.) DOI: 10.3390/polym12112508.

11. Kireev S.Yu., Shtepa V.N., Kireeva S.N., Dubin A.V., Kirilina Yu.N., Krylov V.A. Laboratory generator of ferrates: design, modes, efficiency. *Bulletin of the Technological University*. 2025; 28(4):69–75. (In Russ.) DOI: 10.51980/2309-5345_2025_28_4_69.

12. Shevchenko T.A., Shevchenko A.A. Experimental study of intensification of pressure flotation process for treatment of wastewater from dairy processing plant. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* 2016; 1(6(79)):4–12. (In Russ.) DOI: 10.15587/1729-4061.2016.60121.

13. Kireev S.Yu., Shtepa V.N., Kireeva S.N. [et al.] Electrochemical methods of wastewater treatment. In: Current issues of modern science, technology and education: collection of articles of the III International scientific and technical conference. Engels: ETI (branch) of SSTU; 2024. Pp. 102–107. (In Russ.)

14. Shikunets A.B., Shtepa V.N., Kasperskovich D.A. Assessment of embryotoxicity of electrolytically treated aqueous solutions on the example of Danio rerio model. Scientific potential of youth – future of Belarus: materials of the XVII international youth scientific-practical conference. Pinsk: Polissya State University; 2023. Part 2. Pp. 305–307. (In Russ.)

15. Kireev S.Yu., Shtepa V.N., Kireeva S.N., Kozyr' A.V., Shikunets A.B., Naumov L.V. Study of the efficiency of using an electrochemical module to generate ferrates while treating wastewater from meat processing plants. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2024;58(2):469–474. (In Eng.) DOI: 10.1134/S004057952402008X.

16. Kabdasli I. [et al.] Dairy wastewater treatment and reuse: A review. *Environmental Technology & Innovation.* 2019; 16:100458. (In Eng.) DOI: 10.1016/j.eti.2019.100458.

17. Zhao X. [et al.] Ferrate(VI) for the treatment of high-strength organic wastewater: Performance and mechanism. *Water Research.* 2022; 224:119066. (In Eng.) DOI: 10.1016/j.watres.2022.119066.

18. Shtepa V.N., Kireev S.Yu., Kozyr A.V., Shikunets A.B. Reagent-free technology for intensifying the process of growing microgreens in aquaponic systems. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2024;58(1):211–216. (In Eng.) DOI: 10.1134/S0040579524010125.

19. Gabbasova I.M. [et al.] Use of fertilizer based on sewage sludge to improve the fertility of typical eroded chernozem. *Eurasian Soil Science.* 2014; 47:1138–1145. (In Eng.) DOI: 10.1134/S1064229314110045.

20. Zhang H. [et al.] Synergistic effects of combined chemical oxidation and biological treatment for sewage sludge processing. *Journal of Environmental Management.* 2024; 351:119845. (In Eng.) DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.119845.

21. Wang Q. [et al.] Resource recovery from dairy processing wastewater: Current status and future perspectives. *Resources, Conservation and Recycling.* 2023; 189:106783. (In Eng.) DOI: 10.1016/j.resconrec.2022.106783.

22. Chen L. [et al.] Integrated treatment system for organic waste recycling in food industry: A case study. *Waste Management.* 2024; 174:135–147. (In Eng.) DOI: 10.1016/j.wasman.2023.12.015.

23. Grobelak A. [et al.] Environmental impacts and contaminants management in sewage sludge-to-energy and fertilizer technologies: Current trends and future directions. *Energies*. 2024;17(19):4983. (In Eng.) DOI: 10.3390/en17194983.

24. Izydorczyk G. [et al.] Agricultural and non-agricultural directions of bio-based sewage sludge valorization by chemical conditioning. *Environmental Science and Pollution Research*. 2021;28(35):47725–47740. (In Eng.) DOI: 10.1007/s11356-021-14012-1.

25. Jastrzębska M., Kostrzewska M.K., Saeid A. Phosphorus fertilizers from sewage sludge ash and animal blood as an example of biobased environment-friendly agrochemicals: Findings from field experiments. *Molecules*. 2022;27(9):2769. (In Eng.) DOI: 10.3390/molecules27092769.

© 2026 The Authors. This is an open access article under the CC BY license

(http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:
Vladimir N. Shtepa, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Belarusian State Technological University (13 Sverdlova Str., Minsk, 220006, Republic of Belarus), ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2796-3144, e-mail: vladimir_shtepa@mail.ru
Sergey Yu. Kireev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Penza State University (40 Krasnaya Str., Penza, 440026, Russian Federation), ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3135-0893, e-mail: Sergey58_79@mail.ru
Alexey V. Kozyr, Senior Lecturer, Polissya State University (225710, Republic of Belarus, Pinsk, Dneprovskoy flotilii, 23), ORCID: https://orcid.org/0009-0000-4667-0729, e-mail: kozyr@psu.by
Alexey B. Shikunets, Postgraduate Student, Polissya State University (225710, Republic of Belarus, Pinsk, Dneprovskoy flotilii, 23), ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6570-1217, e-mail: lesha.shikunets@gmail.com

Contribution of the authors:
Shtepa V.N. – research problem statement, scientific management, research conceptualization, data collection and analysis, writing the text.
Kireev S.Yu. – review of foreign literature, development of the experimental methodology, discussion of results.
Kozyr A.V. – conducting experiments, preparation of graphical material.
Shikunets A.B. – microbiological analysis, data processing, manuscript preparation for publication.

All authors have read and approved the final manuscript.