

ОБОСНОВАНИЕ КРИТЕРИЕВ ПРИ ВЫБОРЕ ТЕХНОЛОГИИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОСАДКОВ СТОЧНЫХ ВОД

В. О. Китиков¹, И. И. Полоз², А. И. Чухольский³

¹ Д. т. н., профессор, директор ГНУ «Институт жилищно-коммунального хозяйства Национальной академии наук Беларуси», Минск, Беларусь, e-mail: institut-gkh@mail.ru

² К. с.-х. н., доцент, учёный секретарь ГНУ «Институт жилищно-коммунального хозяйства Национальной академии наук Беларуси», Минск, Беларусь, e-mail: uira@list.ru

³ Аспирант, научный сотрудник ГНУ «Институт жилищно-коммунального хозяйства Национальной академии наук Беларуси», Минск, Беларусь, e-mail: antonchuholskiy@gmail.com

Реферат

В статье представлены критерии и их весовые коэффициенты для выбора оптимальной технологии использования осадков сточных вод. Применение данных критериев позволяет объективно оценить различные варианты технологий, учесть специфику местных условий и требований, минимизировать риски для окружающей среды и здоровья людей, оптимизировать затраты и повысить эффективность процесса. Наиболее приоритетными является группа экологических критериев, однако комплексный подход, учитывающий все критерии одновременно, позволяет создать устойчивую и долгосрочную стратегию управления осадком.

Ключевые слова: осадки сточных вод, критерии, технология, метод анализа.

JUSTIFICATION OF CRITERIA FOR SELECTING WASTEWATER SLUDGE UTILIZATION TECHNOLOGY

V. O Kitikau, I. I. Poloz, A. I. Chuholsky

Abstract

This article presents criteria and their weighting coefficients for selecting the optimal technology for using wastewater sludge. Applying these criteria allows for an objective evaluation of different technology options, considering the specifics of local conditions and requirements, minimizing risks to the environment and human health, optimizing costs, and enhancing process efficiency. The group of ecological criteria holds the highest priority. However, a comprehensive approach that considers all criteria simultaneously allows for the creation of a sustainable and long-term strategy for sludge management.

Keywords: wastewater sludge, criteria, technology, analysis method.

Введение

Осадки сточных вод (далее – ОСВ) являются побочным продуктом очистки сточных вод, представляя собой сложную смесь органических и неорганических веществ. Их объемы непрерывно возрастают, создавая серьезные проблемы для окружающей среды и требуя эффективных и безопасных методов утилизации. Традиционный метод утилизации ОСВ – депонирование в местах хранения (на иловых площадках) оказывает различное негативное воздействие на окружающую среду и здоровье человека. Это загрязнение почвы и грунтовых вод тяжёлыми металлами и другими токсичными веществами, неприятный запах, распространение болезнетворных бактерий, а также выбросы вредных веществ в атмосферу [1].

Поиск альтернативных, более экологических и экономически выгодных методов утилизации ОСВ является актуальной задачей современного мира. Существующие технологии утилизации ОСВ включают в себя компостирование, анаэробное сбраживание, термофильное сбраживание, пиролиз и использование ОСВ в качестве компонента при создании строительных материалов. Выбор метода утилизации ОСВ должен быть направлен на обеспечение экологической безопасности, экономической целесообразности и социальной ответственности. Однако следует отметить, что выбор оптимальной технологии зависит от множества факторов, включая физические и химические свойства и биологический состав ОСВ, экономические, экологические, технические и социальные аспекты, а также законодательные требования.

В связи с этим целью работы является определение и обоснование критериев выбора оптимальной технологии утилизации или использования ОСВ.

Материалы и методы исследования

Обоснование критериев выбора технологии использования ОСВ включает в себя комплексный анализ, сочетающий в себе методы аналитического обзора, сравнительного анализа и статистического моделирования. Для ранжирования критериев выбора технологии утилизации ОСВ по степени их значимости применен метод анализа

иерархий (далее – АНР), включающий определение цели исследования, создание иерархии, разработку иерархической структуры, парное сравнение, расчет весовых коэффициентов для каждого критерия, синтез оценок, проверку согласованности, что позволяет оценить вклад каждого критерия в общее решение при выборе технологии использования или утилизации ОСВ.

Применение метода анализа иерархий для ранжирования критериев выбора технологии использования осадков сточных вод

Состав и свойства ОСВ являются ключевым фактором для обоснования критериев выбора технологии их использования или утилизации, так как они определяют, какая технология переработки будет наиболее эффективна в конкретных условиях, а также безопасна для окружающей среды.

Существует несколько классификаций ОСВ: по происхождению, по составу, по влажности, по степени токсичности [2].

По происхождению ОСВ разделяются на бытовые и промышленные [3]. Бытовые ОСВ образуются на коммунальных очистных сооружениях и характеризуются высоким содержанием органического вещества (45–58 %), а также низким содержанием неорганической составляющей [4].

Промышленные ОСВ образуются на локальных очистных сооружениях производственных предприятий. Их состав может значительно варьировать в зависимости от вида промышленности и технологических процессов, применяемых на предприятии. Промышленные осадки могут содержать высокие концентрации тяжёлых металлов, органических растворителей и других опасных соединений [5].

В зависимости от состава ОСВ делят на минеральные и органические [1]. Минеральные осадки в основном состоят из неорганических веществ, таких как песок, глина, металлы и соли. Они образуются в процессе очистки сточных вод от взвешенных частиц и растворенных неорганических соединений. Минеральные осадки характеризуются низким содержанием органических веществ и высокой плотностью.

Органические осадки в основном состоят из органических веществ, таких как бактерии, водоросли, остатки растений и животных. Они образуются в процессе биологической очистки сточных вод. Органические осадки характеризуются высоким содержанием органических веществ и низкой плотностью.

В соответствии с классификацией, основанной на степени влажности, твердые отходы ОСВ делятся на четыре основных типа: сырые, уплотненные, обезвоженные и сухие [6].

Сырые осадки, характеризующиеся влажностью свыше 90 %, представляют собой рыхлую, низкоплотную массу, требующую предварительного обезвоживания перед дальнейшей утилизацией или переработкой.

Уплотненные осадки, полученные путем сгущения до предела текучести, обладают влажностью в диапазоне 85–90 %. Обезвоженные осадки с влажностью 40–80 % отличаются повышенной плотностью по сравнению с сырыми и уплотненными ОСВ и могут служить в качестве компонента сырья для переработки, например в процессах компостирования или анаэробного сбраживания.

Сухие ОСВ, полученные в результате термической сушки до влажности 5–40 %, отличаются высокой плотностью и могут использоваться в качестве топлива при пиролизе или как компонент при производстве строительных материалов.

В зависимости от применяемых технологий очистки сточных вод ОСВ делятся на первичные осадки, избыточный активный ил, биомассу с биофильтров, ОСВ после анаэробных процессов [6].

Первичные осадки (сырые) образуются в первичных отстойниках и содержат в основном взвешенные органические вещества, могут характеризоваться высокой влажностью (90–95 %) и низкой плотностью (1–1,5 г/см³).

Избыточный активный ил образуется в процессе биологической очистки сточных вод и содержит активный ил, который не участвует в процессе очистки. Он характеризуется высоким содержанием органических веществ (70–85 %) и низким содержанием неорганической составляющей (15–30 %). Биомасса биофильтров образуется в биофильтрах и содержит биопленку, которая формируется на поверхности фильтрующего материала, характеризуется высоким содержанием органических веществ (70–90 %) и низким содержанием неорганических (10–30 %).

Осадки после анаэробных процессов (дигестат) образуются в анаэробных реакторах и содержат остатки органического материала после анаэробного сбраживания. Они характеризуются высоким содержанием органических веществ (50–70 %) и низким содержанием минеральной составляющей (30–50 %), имеют мелкую и однородную структуру, цвет – почти черный или темно-серый. Отличаются высокой текучестью, выделяют запах сургуча или асфальта.

Степень токсичности ОСВ определяется согласно классификатору отходов, образующихся в Республике Беларусь. Согласно классификатору все ОСВ относятся к опасным отходам третьего (отбросы с решеток, осадки сооружений биологической очистки хозяйственно-фекальных сточных вод и осадок сухой (подвергнутый термической или иной сушке) и четвертого (ил активный очистных сооружений, песок из песколовков (минеральный осадок) и осадки сетей хозяйственно-фекальной канализации) классов опасности [7].

Для обоснования критериев выбора оптимальной технологии необходимо провести тщательный анализ наиболее распространенных технологий использования и утилизации ОСВ с выявлением их преимуществ и недостатков.

В последнее десятилетие компостирование является распространенным методом использования ОСВ во многих странах мира, особенно в тех, где сохраняется высокий спрос на удобрения, применяемые в сельском хозяйстве. Компостирование является биологическим процессом, при котором органические вещества в ОСВ разлагаются микроорганизмами в присутствии кислорода с образованием стабилизированного продукта – компоста [8]. Компост может использоваться в качестве удобрения, почвогрунта или субстрата.

В Европейском союзе (далее – ЕС) компостирование является одним из традиционных методов использования ОСВ, особенно в Болгарии, Хорватии, Литве, Кипре, Люксембурге. Помимо стран ЕС компостирование ОСВ применяется в США, Канаде, Австралии, Китае и России [9–12]. В Республике Беларусь компостирование ОСВ не так распространено и применяется на одном предприятии УП Витебскоблводоканал филиал Витебскоблводоканал.

Преимуществами технологии компостирования ОСВ можно отметить высокую эффективность в уничтожении патогенных микроорганизмов; возможность получения ценных продуктов (удобрений, почвогрунтов, субстратов); сокращение объемов депонированных ОСВ; относительно низкие затраты [1].

Недостатками являются: относительно долгое время компостирования; требование специфических условий для осуществления процесса компостирования (в нашей стране процесс компостирования можно осуществлять только весной, летом и осенью, а в зимние месяцы компостирование неэффективно); необходимость контроля над содержанием тяжелых металлов и патогенных микроорганизмов.

В качестве сырья для компостирования подходят нетоксичные, обезвоженные ОСВ с высокой степенью содержания органических веществ. Хотелось бы отметить, что в Республике Беларусь не существует стандартов, которые бы нормировали содержание тяжелых металлов и других токсичных веществ в составе ОСВ, используемых как компонент сырья при организации технологического процесса производства компоста и этот вопрос остаётся актуальным.

Анаэробное сбраживание представляет собой биологический процесс, при котором органические вещества в ОСВ разлагаются в отсутствие кислорода с образованием биогаза и твердого остатка – дигестата. Биогаз может использоваться в качестве топлива для получения электрической энергии, а в некоторых странах применяется в качестве удобрения.

Анаэробное сбраживание широко применяется по всему миру [13]. В Республике Беларусь анаэробное сбраживание ОСВ применяется на таких предприятиях, как Слонимский водоканал, Барановичский водоканал и Брестский водоканал. Анаэробный процесс сбраживания может протекать как при мезофильных (около 35–40 °С), так и при термофильных (53–57 °С) температурах [14]. В основном применяются процессы сбраживания при мезофильных условиях.

Тип ОСВ, которые бы подходили в качестве сырья при анаэробном сбраживании, может отличаться в зависимости от применяемого технологического процесса и оборудования. Так, на биогазовом комплексе Слонимского водоканала используются ОСВ (сырой осадок, избыточный активный ил и сопутствующие органические материалы) с содержанием твердых веществ в составе от 0,9 % до 3,0 %, в последующем данные отходы проходят стадию сгущения до концентрации твердых веществ не более 5,0 % [15].

ОСВ, задействованные в технологическом цикле анаэробного сбраживания, являются органическими с содержанием органического вещества от 72,5 % до 83 % [15]. Распад 50 % органического вещества считается показателем эффективной работы биогазового комплекса [14]. В органическом веществе основную часть (до 80 %) составляют жиры, белки и углеводы. Именно за счет их распада образуется все количество выделяющегося биогаза, в том числе 60–65 % – за счет распада жиров, остальные 35–40 % приходятся примерно поровну на долю углеводов и белков. Отсюда следует, что при сбраживании осадков первичных отстойников, содержащих больше жиров, образуется больше газа, чем при сбраживании активного ила, в котором больше белков [14].

Преимуществами анаэробного сбраживания ОСВ являются экологичность данной технологии и получение продукта – биогаза. Недостатками являются сравнительно высокие затраты на организацию производства; высокие эксплуатационные затраты; высокая стоимость транспортировки получаемого биогаза (поэтому обычно используется на выработку электроэнергии для биогазовой установки и сопутствующих технологических зданий).

Пиролиз – термическое разложение органических веществ в ОСВ при высокой температуре (400–600 °С) в отсутствие кислорода. Пиролиз бывает низкотемпературный (400–500 °С) и высокотемпературный (500–600 °С), приводящий к образованию пиролизного газа и пиролизного масла соответственно [16].

Пиролиз обладает рядом преимуществ: преобразование осадков в ценные энергетические ресурсы – биогаз и пиролизное масло, используемые для получения энергии или топлива; значительное снижение объема и массы осадков; эффективная дезинфекция осадков, уничтожающая патогены и снижающая риски загрязнения окружающей среды.

Однако следует отметить и недостатки пиролиза: высокие эксплуатационные расходы из-за необходимости специального оборудования и энергопотребления; необходимость предварительной сушки осадков до определенного уровня влажности, что требует дополнительных затрат энергии; необходимость дополнительного сырья. Например, для увеличения выхода ценных продуктов и улучшения качества пиролизного масла добавляют отходы пластика, что требует тщательного контроля из-за риска выделения токсичных веществ при его разложении.

Преимуществами использования ОСВ при производстве строительных материалов (как правило, в качестве добавки или компонента при производстве кирпичей, плитки и бетона) являются: утилизация и использование осадков в качестве ресурса; снижение зависимости от природных ресурсов (например, глины, песка); потенциальное улучшение свойств строительных материалов.

Недостатки: необходимость обеспечения качества и безопасности осадков; дополнительная обработка осадков (например, обезвоживание, сушка) может влиять на прочность и другие характеристики строительных материалов.

Изучив состав и свойства ОСВ, а также проанализировав различные технологии переработки ОСВ, нами был выделен ряд критериев выбора оптимальной технологии их использования и утилизации:

1. Критерии происхождения ОСВ – тип производства или деятельности, при котором образуется ОСВ и количество образующихся осадков.

2. Критерии качественного состава ОСВ определяют, как осадок может быть обработан, утилизирован или использован и необходимы для оценки воздействия на окружающую среду и здоровье человека:

- физические свойства, такие как влажность (сырые, обезвоженные, сухие), плотность, размер частиц, температура;
- химические свойства, такие как концентрация загрязняющих веществ (тяжелые металлы и другие), содержание органического вещества, азота, фосфора, калия, pH, а также биохимическое потребление кислорода и химическое потребление кислорода;
- биологический состав ОСВ (наличие и концентрация болезнетворных бактерий, вирусов и паразитов).

3. Экономические критерии помогают оценить экономическую целесообразность различных методов обработки и утилизации ОСВ и включают капитальные затраты на оборудование, эксплуатационные расходы, затраты на утилизацию побочных продуктов, возможность получения ценных продуктов, доступность технологических материалов на рынке.

4. Экологические критерии включают возможность соблюдения экологических стандартов и нормативов, минимизацию степени воздействия на окружающую среду, степень образования вторичных отходов, степень потребления энергии и воды.

5. Технические критерии – это возможная пропускная способность, автоматизация и управление.

6. Социальные критерии помогают обеспечить, чтобы ОСВ использовался способом, который учитывает интересы и благополучие общества. Это безопасность и здоровье работников (обеспечение безопасных условий труда), безопасность и здоровье населения при использовании продуктов переработки ОСВ, трудоустройство (создание рабочих мест и обучение персонала для работы на объектах обработки осадка), этические стандарты (соблюдение этических норм в процессе обработки и использования ОСВ).

7. Критерии законодательных требований – это способность технологии соответствовать местным и международным стандартам и законодательству, а также проведение мониторинга и отчетности в соответствии с законодательными требованиями.

Ранжирование выбранных критериев проводили с помощью АНР, который включает в себя несколько этапов: определение иерархии критериев, их попарное сравнение, расчет весовых коэффициентов, попарное сравнение подкритериев, агрегация результатов.

При определении иерархии критериев использовали систему уровней. Так, первый уровень (высший) включает в себя критерии, которые являются главными для групп подкритериев, находящихся на следующем уровне (таблица 1).

Следующим этапом ранжирования предложенных критериев было их попарное сравнение. Для каждой пары критериев на первом уровне определяли какой критерий более важен для достижения цели – выбора оптимальной технологии использования ОСВ. Для выполнения поставленной задачи использовалась шкала Саати [17], в которой для оценки относительной важности используется шкала от 1 до 9, где:

- 1 – оба критерия равнозначны;
- 3 – один критерий слегка важнее;
- 5 – один критерий значительно важнее;
- 7 – один критерий сильно важен;
- 9 – один критерий абсолютно важен.

На основании этого построили матрицу парных сравнений, где каждый критерий сравнивался с другими, и оценка их относительной важности записывалась в соответствующую ячейку (таблица 2).

Далее выполнили расчет цены каждого критерия (каждый элемент строки матрицы парных сравнений перемножили и из полученного произведения извлекали корень, равный числу критериев). Затем цену каждого критерия делили на сумму цен всех анализируемых критериев. А полученный результат представляет собой весовой коэффициент для соответствующего критерия, который является мерой степени важности критерия при выборе технологии использования ОСВ.

Следующим этапом было ранжирование главных критериев исходя из полученных весовых коэффициентов, что отражено в таблице 3.

Таблица 1 – Определение иерархии критериев первого уровня и подкритериев второго уровня

Первый уровень	Критерии происхождения ОСВ	Критерии качественного состава ОСВ	Экономические критерии	Экологические критерии	Технические критерии	Социальные критерии	Критерии законодательных требований
Второй уровень	тип производства / деятельности	физические свойства ОСВ	капитальные затраты	соответствие экологическим стандартам	пропускная способность	безопасность работников	соответствие местным стандартам
		химические свойства ОСВ	эксплуатационные расходы	минимизация негативного воздействия на окружающую среду			соответствия международным стандартам
	количество образующихся ОСВ	биологический состав ОСВ	затраты на утилизацию побочных продуктов	степень образования вторичных отходов	автоматизация и управление	безопасность населения	реализация мониторинга в соответствии с законодательными требованиями
			доход от использования основных продуктов	степень потребления энергии и воды			
		доступность материалов					

Таблица 2 – Матрица парных сравнений для критериев первого уровня

Критерии	Происхождение ОСВ	Критерий качественного состава ОСВ	Экономические	Экологические	Технические	Социальные	Критерии законодательных требований
Происхождение ОСВ	1	1/5	1/3	1/7	1/5	1/3	1/5
Критерии качественного состава ОСВ	5	1	3	1/7	3	3	1/5
Экономические	3	1/3	1	1/5	3	3	1/5
Экологические	7	7	5	1	5	5	1/5
Технические	5	1/3	1/3	1/5	1	3	1
Социальные	3	1/3	1/3	1/5	1/3	1	1/3
Критерии законодательных требований	5	5	5	1	3	1	1

Таблица 3 – Ранжирование критериев выбора технологии использования по степени значимости (исходя из весовых коэффициентов)

Критерии	Цена критерия	Весовой коэфф. в долях	Весовой коэфф. в процентах, %
Экологические критерии	2,76	0,31	31,00
Критерий законодательных требований	2,33	0,266	27,00
Критерий качественного состава ОСВ	1,20	0,137	14,00
Экономические критерии	0,86	0,098	10,00
Технические критерии	0,09	0,097	10,00
Социальные критерии	0,05	0,055	5,00
Критерии происхождения ОСВ	0,03	0,03	3,00
Сумма	8,80	1,00	100

Таблица 4 – Ранжирование критериев первого уровня и подкритериев второго уровня в зависимости от степени их значимости (весовых коэффициентов) при выборе технологии использования ОСВ

№	Наименование критерия	Весовой коэффициент, %
1	Экологические критерии	31,00
1.1	Соответствие экологическим стандартам	32,20
1.2	Минимизация негативного воздействия	29,02
1.3	Степень образования вторичных отходов	20,49
1.4	Степень потребления энергии и воды	18,29
2	Критерии законодательных требований	27,00
2.1	Соответствие местным стандартам	52,91
2.2	Соответствие международным стандартам	33,45
2.3	Реализация мониторинга в соответствии с законодательными требованиями	13,64
2	Критерии качественного состава ОСВ	14,00
2.1	Физические свойства ОСВ	33,3
2.2	Химические свойства ОСВ	33,3
2.3	Биологический состав ОСВ	33,3
3	Экономические критерии	10,00
3.1	Доступность технологических материалов на рынке	22,01
3.2	Эксплуатационные расходы	22,01
3.3	Капитальные затраты	22,01
3.4	Затраты на утилизацию побочных продуктов	19,31
3.5	Доход от продажи основных продуктов	14,67
4	Технические критерии	10,00
4.1	Пропускная способность	75,00
4.2	Автоматизация и управление	25,00
5	Социальные критерии	5,00
5.1	Безопасность населения	66,60
5.2	Безопасность работников	33,40
6	Происхождение ОСВ	3,00
6.1	Тип производства / деятельности	75,22
6.2	Количество ОСВ	24,78

Результаты ранжирования критериев показали, что наиболее приоритетной группой критериев, применяемой при выборе технологии использования ОСВ, является экологическая (31 %), которая напрямую связана с защитой окружающей среды и здоровья человека. Весовой коэффициент критериев законодательных требований и критериев качественного состава ОСВ составил 27 и 14 % соответственно.

Для выполнения проверки полученных весовых коэффициентов на непротиворечивость необходимо в соответствии с [17] найти величину отношения согласованности (далее – ОС). Если значение ОС превышает 0,2, то требуется уточнение значений в матрице парных сравнений. В нашем случае значение ОС составило 0,18, что говорит о непротиворечивости полученных результатов.

Также мы провели аналогичный анализ для подкритериев второго уровня, входящих в каждую отдельную группу критериев первого уровня. На основании проведённых вычислений получили результаты ранжирования критериев первого уровня и подкритерии второго уровня в зависимости от степени их значимости (весовых коэффициентов) при выборе технологии использования ОСВ.

Заключение

Проведенное ранжирование критериев для выбора технологии использования ОСВ с использованием метода АНР выявило приоритетность экологических критериев (31 %), что подчеркивает важность выбора экологически устойчивых технологических решений.

Весовой коэффициент критериев законодательных требований составил 27 %, что говорит о гарантии того, что выбранная технология будет безопасной, эффективной и устойчивой в долгосрочной перспективе.

Критерии качественного состава ОСВ также играют значимую роль в принятии решения, определяя технологические возможности переработки ОСВ.

Социальные критерии в контексте данного ранжирования получили весовой коэффициент только 5 %, поскольку безопасность работников и населения будет осуществляться при выполнении требований, обоснованных предыдущими критериями, такими как соответствие экологическим стандартам и минимизация негативного воздействия на окружающую среду.

Таким образом, полученные критерии и их весовые коэффициенты позволяют выделить ключевые аспекты, которые необходимо учитывать при выборе оптимальной технологии. Однако следует отметить, что комплексный подход, учитывающий все эти критерии одновременно, позволяет создать устойчивую и долгосрочную стратегию управления ОСВ, которая будет не только экологичной, но и экономически выгодной, технически выполнимой и социально приемлемой. Важно отметить, что полученные результаты являются относительными и могут варьировать в зависимости от конкретных условий.

Список цитированных источников

1. Чухольский, А. И. Проблема накопления осадков сточных вод и направления её решения в условиях Республики Беларусь / А. И. Чухольский // Проблемы оценки, мониторинга и сохранения биоразнообразия : материалы V Респ. науч.-практ. эколог. конф. / Брестский государственный университет имени А. С. Пушкина ; под ред. Н. М. Матусевич. – Брест : БрГУ, 2023. – С. 24–32.
2. Обработка осадков городских сточных вод: учеб. пособие / Л. Р. Хисамеева [и др.]. – Казань : Изд-во Казанск. гос. архитектур.-строит. ун-та, 2016. – 105 с.
3. Петрова, Т. А. Рекультивация техногенно-нарушенных земель с применением осадков сточных вод в качестве мелиорантов / Т. А. Петрова, Э. Рудзис // Записки Горного института. – 2021. – С. 767–776.
4. Суrowикина, А. П. Отечественный опыт использования хозяйственно-бытовых сточных вод / А. П. Суrowикина, А. В. Слабунова // Экология и водное хозяйство. – 2022. – № 2. – С. 32–48.
5. Жахонгиров, А. К. Очистка промышленных сточных вод / А. К. Жахонгиров, А. Б. Урунов, О. Р. Ачилов // Academic research in educational sciences. – 2022. – № 2. – С. 18–24.
6. Новикова, О. К. Обработка осадков сточных вод : учеб.-метод. пособие / О. К. Новикова. – Гомель : БелГУТ, 2015. – 96 с.
7. ОКРБ 021-2019. Классификатор отходов, образующихся в Республике Беларусь [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.ecoinfo.by/wp-content/uploads/2023/11/021-2019_.pdf. – Дата доступа: 13.06.2024.
8. Биотермокомпостирование органических отходов / В. В. Миронов [и др.] // Техника и технологии в животноводстве. – 2019. – № 4 (36) : Промышленные биотехнологии. – С. 37–45.
9. European Commission. Sewage sludge [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ec.europa.eu/environment/waste/sludge/>. – Дата доступа: 13.06.2024.
10. Composting and Anaerobic Digestion of Food Waste and Sewage Sludge for Campus Sustainability: A Review [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1155/2022/6455889>. – Дата доступа: 13.06.2024.
11. Current Developments in Biotechnology and Bioengineering [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.science-direct.com/book/9780323999205/current-developments-in-biotechnology-and-bioengineering>. – Дата доступа: 13.06.2024.
12. Composting sewage sludge of wastewater treatment plant [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/289028507_Composting_sewage_sludge_of_wastewater_treatment_plant. – Дата доступа: 13.06.2024.
13. Валиев, В. С. Анализ мирового опыта утилизации осадка городских сточных вод / В. С. Валиев, Д. В. Иванов, Р. Р. Шагидуллин // Российский журнал прикладной экологии. – 2020. – № 4 (24) : Экологические биотехнологии. – С. 43–51.
14. Зайнуллин, Р. Р. Применение технологии анаэробного сбраживания в утилизации осадков сточных вод / Р. Р. Зайнуллин, А. А. Галютдинов // Инновационная наука. – 2016. – № 6–2 : Промышленные биотехнологии. – С. 76–77.
15. Отчет об оценке воздействия на окружающую среду планируемой хозяйственной деятельности по объекту: «Строительство биогазового комплекса на очистных сооружениях канализации города Слонима, включая разработку и согласование проектно-сметной документации, строительство, сдачу в эксплуатацию» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://slonim.gov.by/uploads/files/OVOS-Slonim-copy.pdf>. – Дата доступа: 13.06.2024.
16. Гатин, Б. Ф. Методы стабилизации осадка сточных вод / Б. Ф. Гатин, М. В. Мадьякина, М. В. Шулаев // Пищевые технологии и биотехнологии : материалы XVI Всерос. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов с междунар. участием, посвящ. 150-летию Периодической таблицы химических элементов ; под ред. А. С. Сироткина [и др.]. – Казань : Казан. нац. исслед. технол. ун-т, 2019. – С. 41–45.
17. Смородинский, С. С. Системный анализ и исследование операций: лаб. практикум для студ. спец. «Автоматизированные системы обработки информации» дневн. и дистанц. форм обуч. / С. С. Смородинский, Н. В. Батин. – Минск : БГУИР, 2009. – 64 с.

References

1. CHuhol'skij, A. I. Problema nakopleniya osadkov stochnyh vod i napravleniya eyo resheniya v usloviyah Respubliki Belarus' / A. I. CHuhol'skij // Problemy ocenki, monitoringa i sohraneniya bioraznoobraziya : materialy V Resp. nauch.-prakt. ekolog. konf. / Brestskij gosudarstvennyj universitet imeni A. S. Pushkina ; pod red. N. M. Matusevich. – Brest : BrGU, 2023. – S. 24–32.
2. Obrabotka osadkov gorodskih stochnyh vod: ucheb. posobie / L. R. Hisameeva [i dr.]. – Kazan' : lzd-vo Kazansk. gos. arhitekt.-stroit. un-ta, 2016. – 105 s.
3. Petrova, T. A. Rekul'tivaciya tekhnogenno-narushennyh zemel' s primeneniem osadkov stochnyh vod v kachestve meliorantov / T. A. Petrova, E. Rudzish // Zapiski Gornogo instituta. – 2021. – S. 767–776.
4. Surowikina, A. P. Otechestvennyj opyt ispol'zovaniya hozyajstvenno-bytovykh stochnyh vod / A. P. Surowikina, A. V. Slabunova // Ekologiya i vodnoe hozyajstvo. – 2022. – № 2. – S. 32–48.
5. ZHahongirov, A. K. Ochistka promyshlennykh stochnyh vod / A. K. ZHahongirov, A. B. Urunov, O. R. Achilov // Academic research in educational sciences. – 2022. – № 2. – S. 18–24.
6. Novikova, O. K. Obrabotka osadkov stochnyh vod : ucheb.-metod. posobie / O. K. Novikova. – Gome'l' : BelGUT, 2015. – 96 s.
7. ОКРБ 021-2019. Klassifikator othodov, obrazuyushchihся v Respublike Belarus' [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: https://www.ecoinfo.by/wp-content/uploads/2023/11/021-2019_.pdf. – Data dostupa: 13.06.2024.
8. Biotermokompostirovanie organicheskikh othodov / V. V. Mironov [i dr.] // Tekhnika i tekhnologii v zhivotnovodstve. – 2019. – № 4 (36) : Promyshlennye biotekhnologii. – S. 37–45.
9. European Commission. Sewage sludge [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://ec.europa.eu/environment/waste/sludge/>. – Data dostupa: 13.06.2024.
10. Composting and Anaerobic Digestion of Food Waste and Sewage Sludge for Campus Sustainability: A Review [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1155/2022/6455889>. – Data dostupa: 13.06.2024.
11. Current Developments in Biotechnology and Bioengineering [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://www.science-direct.com/book/9780323999205/current-developments-in-biotechnology-and-bioengineering>. – Data dostupa: 13.06.2024.
12. Composting sewage sludge of wastewater treatment plant [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: https://www.researchgate.net/publication/289028507_Composting_sewage_sludge_of_wastewater_treatment_plant. – Data dostupa: 13.06.2024.
13. Valiev, V. S. Analiz mirovogo opyta utilizacii osadka gorodskih stochnyh vod / V. S. Valiev, D. V. Ivanov, R. R. SHagidullin // Rossijskij zhurnal prikladnoj ekologii. – 2020. – № 4 (24) : Ekologicheskie biotekhnologii. – S. 43–51.
14. Zajnullin, R. R. Primenenie tekhnologii anaerobnogo sbrachivaniya v utilizacii osadkov stochnyh vod / R. R. Zajnullin, A. A. Galyautdinov // Innovacionnaya nauka. – 2016. – № 6–2 : Promyshlennye biotekhnologii. – S. 76–77.
15. Otchet ob ocenke vozdeystviya na okruzhayushchuyu sredu planiruemoj hozyajstvennoj deyatel'nosti po ob'ektu: «Stroitel'stvo biogazovogo kompleksa na ochestnykh sooruzheniyah kanalizacii goroda Slonima, vklyuchaya razrabotku i soglasovanie proektno-smetnoj dokumentacii, stroitel'stvo, sdachu v ekspluatatsiyu» [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://slonim.gov.by/uploads/files/OVOS-Slonim-copy.pdf>. – Data dostupa: 13.06.2024.
16. Gatin, B. F. Metody stabilizacii osadka stochnyh vod / B. F. Gatin, M. V. Madyakina, M. V. SHulaev // Pishchevye tekhnologii i biotekhnologii : materialy HVI Vseros. konf. molodykh uchenykh, aspirantov i studentov s mezhdunar. uchastiem, posvyashch. 150-letiyu Periodicheskoy tablicy himicheskikh elementov ; pod red. A. S. Sirotkina [i dr.]. – Kazan' : Kazan. nac. issled. tekhnol. un-t, 2019. – S. 41–45.
17. Smorodinskij, S. S. Sistemnyj analiz i issledovanie operacij: lab. praktikum dlya stud. spec. «Avtomatizirovannye sistemy obrabotki informacii» dnevn. i distanc. form obuch. / S. S. Smorodinskij, N. V. Batin. – Minsk : BGUIR, 2009. – 64 s.

Материал поступил 05.07.2024, одобрен 08.07.2024, принят к публикации 09.07.2024