

Критерии выбора способа утилизации отходов очистных сооружений

Е. М. Баян^{1}, Л. Е. Пустовая², В. Ю. Стороженко¹*

¹Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Россия, *e-mail: ekbayan@sfedu.ru

²Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

Поступила в редакцию 29.09.2019 г.

Аннотация – Предложен обобщенный алгоритм исследования состава и выбора способа утилизации твердых отходов сточных вод, образующихся на городских и поселковых очистных сооружениях при биологической очистке или в результате вторичной очистки из биореакторов. Алгоритм апробирован на примере образцов реального осадка – отхода очистки сточных вод городских очистных сооружений хозяйственно-бытовых сточных вод. Полученные результаты его анализа с использованием комплекса современных физико-химических методов сравнивались с действующими нормативными показателями соответствующих параметров. Исследования физико-химических свойств образца осадка показали его радиологическую, химическую и биологическую безопасность, а также высокую энергоемкость. Это позволило отнести исследуемый образец к малоопасным и рекомендовать его использование для технической рекультивации нарушенных земель или применение в качестве энергобрикеттов.

Ключевые слова: активный ил, сточные воды, переработка отходов, утилизация осадков, выбор способа утилизации.

Criteria for Choosing Procedure for Disposal of Sewage Sludge Produced at Wastewater Treatment Facilities

E. M. Bayan^{1}, L. E. Pustovaya², and V. Yu. Storozhenko¹*

¹Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia, *e-mail: ekbayan@sfedu.ru

²Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

Received September 29, 2019

Abstract – A generalized algorithm for studying waste composition and choosing procedure for disposal of sewage sludge produced at urban and rural wastewater treatment plants after its biological treatment or secondary treatment in bioreactors is proposed. The algorithm was tested as exemplified for a sample of real sludge which was formed after wastewater purification at urban facilities for treatment of household wastewater. The results of the sewage sludge sample assays using a set of modern physicochemical methods of analysis were compared with the data taken from current standards for the relevant parameters. Studies of physicochemical characteristics for the sediment sample showed its radiological, chemical and biological safety, as well as high energy capacity level. The obtained results made it possible to classify the test sample as a low-hazard material and recommend its use for technical restoration of disturbed lands or production of energy briquettes.

Keywords: sewage sludge, wastewater, waste treatment, waste utilization, disposal procedure choice.

ВВЕДЕНИЕ

Во всем мире остро стоит вопрос рационального и безопасного обращения с отходами, количество которых постоянно увеличивается. Особое беспокойство вызывают многотоннажные отходы, которые занимают большие площади под складирование, отчуждая земельные ресурсы, и являются постоянным источником загрязнения окружающей среды [1–3].

К таким отходам относятся осадки сточных вод (ОСВ), образующиеся на городских или поселковых очистных сооружениях при биологической очистке и представляющие собой избыточный или отработанный активный ил из биореакторов вторичной очистки. Количество осадка сточных вод, полученного в результате действия активного ила, прямо пропорционально количеству очищенных сточных вод. По мере расширения городских территорий, развития новых промышленных производств и увеличения канализационных систем количество данного вида отхода постоянно растет и становится проблемой для многих стран [4]. В 2010 году в Евросоюзе было произведено около 10 млн т сухого отхода, в США – 8 млн т. Ситуация в Китае является еще более сложной из-за быстрого роста инфраструктуры сточных вод. Прогнозируется, что образование отходов городских сточных вод радикально вырастет от 40 млн т в 2017 году до 60–90 млн т к 2020 году [5]. Утилизация активного ила дорогостоящая и, по оценкам исследователей, составляет 25–65% от общей стоимости очистки сточных вод [6].

ОСВ представляет собой гетерогенную смесь микроорганизмов и непереваренных органических и неорганических компонентов с высоким содержанием влаги. Органическая часть ОСВ содержит белки и пептиды, липиды, полисахариды, макромолекулы растений наряду с микрозагрязнителями (среди них могут встречаться полихлорированные дифенилы, полициклические углеводороды, пестициды, поверхностно-активные вещества, побочные продукты фармацевтических предприятий и средств личной гигиены). Также в состав отхода могут входить неорганические вещества, такие как песок, оксид железа и следы тяжелых металлов, например, меди, цинка, кадмия, свинца, никеля, хрома, ртути и пр. [7–9].

Существует много способов утилизации осадков сточных вод. Ил богат органическими веществами и биодоступными питательными компонентами, поэтому отходы избыточного активного ила могут повышать плодородие почв, улучшать их состав и биологические свойства [10]. В связи с этим они часто применяются в качестве органоминерального удобрения [11–13] или для рекультивации нарушенных земель [14]. Однако осадок может содержать различные тяжелые металлы [15], патогенные бактерии, токсичные органические примеси, ПАВ и другие опасные вещества [16], которые могут препятствовать применению ила и производимых из него компостов в сельском хозяйстве или рекультивации земель. Так, например, в Европе введены строгие правила для ограничения прямого использования осадка сточных вод [17, 18], так как это может привести к острой и хронической токсичности для окружающей среды и здоровья человека.

Перспективными представляются технологии, основанные на использовании ОСВ, например, как добавки в строительные материалы [19, 20], в качестве сорбента [21] или для получения биогаза [22, 23].

Органическая фракция осадка сточных вод состоит из углеродсодержащих веществ и за счет этого обладает теплотворной способностью (в сухом виде 10–20 МДж/кг), близкой по значениям для низкосортного угля (лигнита) или биомассы [24, 25]. Поэтому ОСВ можно использовать в качестве топлива для производства электроэнергии или тепловой энергии через процессы сжигания, газификации, пиролиза. При этом разрушаются токсичные органические соединения, микроорганизмы и снижаются объемы отходов [26]. В Европе именно термическая обработка считается устойчивым путем управления утилизацией ОСВ [8, 27–29]. Сжигание позволяет сократить объем отходов почти в 100 раз, однако при этом образуются токсичные зола и газообразные продукты, которые нуждаются в дальнейшей очистке (утилизации). При использовании высокотемпературного пиролиза, который проводится без доступа кислорода, удастся сократить объем токсичных выбросов по сравнению со сжиганием [30].

Переработка избыточного ила в Европейском сообществе производится различными способами, каждый из которых преследует различные цели: минимизация шлама, полная стабилизация и обеззараживание в термических процессах гидролиза перед анаэробным сбраживанием, а также сжигание с помощью печей в кипящем слое [31, 32].

На территории Российской Федерации и ряда других стран наиболее часто применяют складирование отходов очистных сооружений на иловых картах (прудах, илонакопителях), где протекает их биodeградация [33]. Реже используют интенсифицированные процессы автолиза с применением стимулирующих и индуцирующих добавок [34]. В России образуется ежегодно более 2 млн т осадков в расчете на сухое вещество [35].

Как видно из проведенного анализа способов утилизации ОСВ, универсального и эффективного способа утилизации данного вида отходов не существует. Кроме того, выбор способа утилизации осложняется еще и тем, что состав таких осадков не постоянен из-за меняющихся параметров сточных вод [36], поскольку используются различные технологические схемы очистки, при этом отходы биodeградируют при нахождении на иловых картах, изменяя свой химический состав и свойства [36].

В связи с этим в настоящей работе предложен обобщенный алгоритм исследования состава и выбора методики определения способа ОСВ рациональной утилизации на примере осадков, образующихся после биологической очистки городских сточных вод на основе анализа его химического состава, микробиологической и радиационной безопасности, а также энергетических характеристик.

СХЕМА АЛГОРИТМА ВЫБОРА СПОСОБА УТИЛИЗАЦИИ ОСВ

Выбор способа утилизации ОСВ зависит от объема образующегося шлама, его химического состава и физико-химических свойств, оценки

химической безопасности, а также от сравнения затрат на допустимые варианты утилизации.

Исходя из этого, в соответствии с законодательством РФ, на первом этапе выбора способа утилизации необходимо оценить безопасность отхода. Для этого необходимо провести радиационный контроль и микробиологический и химический анализ на содержание токсичных компонентов, которые могут попасть в ОСВ из промышленных сточных вод.

Важно обращать внимание на происхождение осадка, качество сточных вод, которые были подвергнуты очистке, так как ОСВ имеет тенденцию концентрировать тяжелые металлы, плохо биоразлагаемые органические соединения, а также потенциально опасные патогенные организмы (вирусы, бактерии и пр.), присутствующие в сточных водах. При этом осадок богат питательными веществами, такими как азот и фосфор, а также содержит другие ценные вещества, которые могут быть использованы для улучшения качества истощенных почв.

Поэтому рекомендуется выполнить полный химический анализ компонентов и физико-химических свойств отходов (влажности, массовой доли органических веществ, общего азота, фосфора, золы, содержания тяжелых металлов и пр.) для оценки возможности вторичного использования отхода и необходимости его предварительной подготовки, например, обезвоживания.

При допустимом содержании тяжелых металлов, подтверждении токсикологической, микробиологической и радиационной безопасности отхода рекомендуется пройти процедуру сертификации отхода, оценить рациональность использования ОСВ в качестве удобрения в сельском хозяйстве или при рекультивации нарушенных земель.

Также возможно применение технологий анаэробного или аэробного сбраживания, целью которых является уменьшение количества органического вещества и присутствующих в ОСВ болезнетворных микроорганизмов. При анаэробном сбраживании образуется газовая смесь с высоким содержанием метана, что является основным преимуществом анаэробного процесса. Основным недостатком является большая продолжительность проведения процесса (до 30 дней) и высокая стоимость оборудования.

При высоком содержании тяжелых металлов и/или поверхностно-активных веществ использование осадков в качестве удобрения в сельском хозяйстве или как рекультиванта нарушенных земель исключается. В этом случае целесообразно провести термогравиметрический-дифференциально-термический анализ с целью выяснения перспективности применения ОСВ в качестве топлива.

Сжигание ОСВ является менее распространенным способом из-за проблем с выбросами вредных веществ в атмосферу. Кроме того, для ОСВ с низкой теплотворной способностью и необходимостью выпаривания остаточной воды зачастую требуется использовать дополнительные виды топлива, что экономически нецелесообразно.

Заметим, что отдельного подхода и дополнительных исследований требует применение осадков очистных сооружений в качестве сырья для производства некоторых строительных материалов.

Схема обобщенного алгоритма выбора способа утилизации отходов очистных сооружений сточных вод представлена на рис. 1.



Рис. 1. Схема алгоритма выбора безопасного обращения с осадками, образующимися после биологической очистки сточных вод.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Данный алгоритм был апробирован на примере реального осадка городских очистных сооружений хозяйственно-бытовых и промышленных сточных вод. Местом отбора пробы служили иловые площадки, на которых находились осадки, выдержанные в естественных условиях 2 года. Отбор проб и пробоподготовка осуществлялись в соответствии с ГОСТ 17.4.3.01-2017, ГОСТ 17.4.4.02-2017, ГОСТ 28168-89.

Для исследования физико-химических свойств осадка в работе использовали современные методы анализа.

Процессы фазообразования в ходе нагрева образцов осадка городских стоков изучали методами дифференциальной сканирующей калориметрии и термогравиметрического анализа с помощью прибора синхронного термического анализа ТГ-ДТА/ДСК STA 449°C/4 G (JupiterJupred, Германия) с нагревом на воздухе от 293 до 1173 К со скоростью 10 град/мин.

Фазовый состав исследовали на порошковом дифрактометре ARLX'TRA, (Thermo ARL, Швейцария) на $\text{Cu}_{K\alpha}$ -излучении.

Методики определения качественного и количественного анализа состава осадков приведены в таблице 1.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты рентгенофазового анализа представлены на рис. 2. Исследовался осадок, образцы которого прокаливали при различных температурах с изотермической выдержкой – 1 ч. Как показали результаты анализа, основной фазой ОСВ является песок в структуре кварца, также присутствуют в небольших количествах такие соединения, как сульфат кальция и фосфат алюминия.

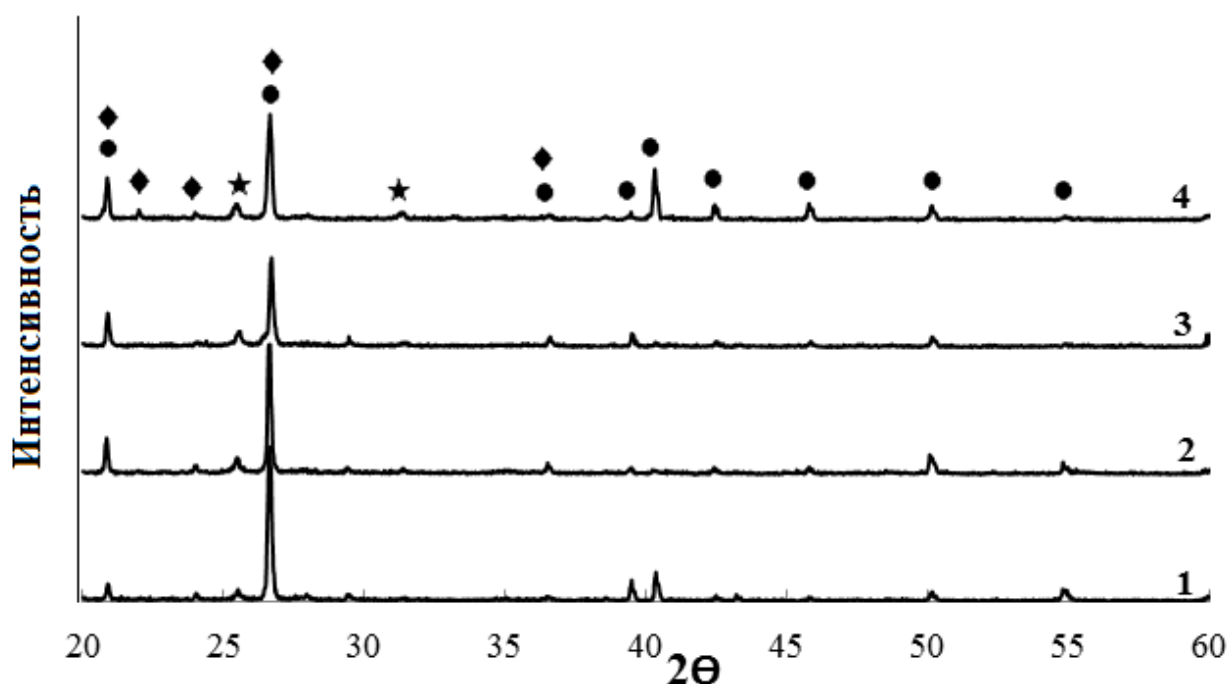


Рис. 2. Рентгенограммы исследуемого образца активного ила при различных температурах термической обработки: 1 – 400°C, 2 – 500°C, 3 – 600°C, 4 – 800°C, где: ● – SiO_2 (кварц), ◆ – $\text{AlPO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (берлинит), ★ – CaSO_4 .

Согласно предложенному алгоритму, далее был определен качественный и количественный химический состав осадка, представленный в таблице 1. Исследования показали, что содержание тяжелых металлов в ОСВ не превышает установленных допустимых значений. Показатели биологической безопасности также соответствуют нормативным требованиям. Таким образом, можно отнести данный осадок к малоопасным.

Таблица 1. Результаты анализа состава и свойств осадков, образующихся после биологической очистки городских сточных вод

№	Наименование показателя	Символ	Единица измерения	Значение	Допустимое значение*	Метод/Документ
1	2	3	4	5	6	7
1	Агрегатное состояние			твердый	твердый ¹⁾	
2	Массовая доля влаги	W	%	38	не нормируется	ГОСТ 26713-83
3	Реакция среды	pH	ед. pH	6,7	5,5–8,5 ³⁾	ГОСТ 27979-88
4	Массовая доля золы (минеральные вещества)	З	% на сух. в-во	54	не более 80 ³⁾	ГОСТ 26714-85
5	Потери при прокаливании (органические вещества)	ППП		36	не менее 20	
6	Массовая доля общего азота	N		1,8	не менее 0,6 ⁴⁾	ГОСТ 26715-83
7	Массовая доля общего фосфора	P ₂ O ₅		2,8	не менее 1,5 ⁴⁾	ГОСТ 26717-85
8	Массовая доля общего кремния	SiO ₂		30,0	не нормируется	Гравиметрия
9	Массовая доля общего алюминия	Al ₂ O ₃		4,74		Атомно-эмиссионная спектрометрия (АЭС)
10	Массовая доля общего магния	MgO		0,65		АЭС
11	Массовая доля общего кальция	CaO		6,04		АЭС
12	Массовая доля общего калия	K ₂ O		0,86		АЭС
13	Массовая доля общего железа	Fe ₂ O ₃		2,88		АЭС
14	Массовая доля натрия	Na ₂ O		0,36		АЭС
15	Массовая доля титана	TiO ₂		0,24		АЭС
16	Массовая доля марганца	MnO		0,040		АЭС
17	Ртуть	Hg	мг/кг сух. вещества	1,0	не более ^{3), 4)} 7,5	Вольтамперометрия
18	Хром	Cr		350	500	Спектрофотометрия
19	Свинец	Pb		120	250	Вольтамперометрия
20	Кадмий	Cd		15	15	Вольтамперометрия
21	Никель	Ni		67	200	Вольтамперометрия
22	Медь	Cu		250	750	Вольтамперометрия
23	Цинк	Zn		880	1750	Вольтамперометрия
24	Мышьяк	As		8,5	10	Вольтамперометрия
25	Удельная активность техногенных радионуклидов	ACs/45 + ASr/30	Отн. ед.	< 1	не более 1 ⁵⁾	МУК 2.6.1.1194-03
26	Эффективная активность естественных радионуклидов	ЕРН	Бк/кг	15,0 ± 5,3	300	ГОСТ 30108-94
27	Бактерии группы кишечной палочки, индекс	БГКП	Клеток/г	1	для чистых почв ⁶⁾ : не более 10	МУ по санитарно-микробиологическому исследованию почвы № 2293-81
28	Патогенные микроорганизмы	-	Клеток/г	не обнаружены	отсутствие ⁶⁾	МУ по санитарно-микробиологическому исследованию почвы № 2293-81

КРИТЕРИИ ВЫБОРА СПОСОБА УТИЛИЗАЦИИ ОТХОДОВ

29	Жизнеспособные яйца гельминтов и цисты простейших	-	Экз./100г	не обнаружены	отсутствие	МУК 4.2.796-99
30	Наличие жизнеспособных личинок и куколок синантропных мух	-	Экз. с площади 20 x 20 см	не обнаружены	отсутствие ⁶⁾	МУ по борьбе с мухами N 852-70 22 VII-70 г.
31	БПК _п водной вытяжки (1 : 1)	БПК	мг O ₂ /дм ³	1000	не более 5000 ²⁾	ПНДФ 14.1:2:3:4. 123-97
32	ХПК водной вытяжки (1 : 1)	ХПК	мг/дм ³	1660	не более 5000 ²⁾	НДП 10.1:2:3.73-01
33	Нефтепродукты		г/кг сух. в-ва	0,43	не более 30	ПНДФ 16.1.41-04
34	Фитотоксичность	-	-	Не оказывает угнетающего действия на рост и развитие растений		СанПиН 2.1.7.573-96
35	Класс опасности:			IV	не ниже III ^{1), 2)}	Критерии отнесения опасных отходов к классу опасности для окр. прир. среды, Моства, Приказ МПР РФ 1 № 51 от 15.06.2001 г.

Примечания: *Допустимое значения определяли по: СанПиН 2.1.7.1322-03¹⁾, СП 2.1.7.1038-01²⁾, ГОСТ Р 17.43.07-2001³⁾, СанПиН 2.1.7.573-96⁴⁾, НРБ-99⁵⁾, СанПиН 2.1.7.1287-03⁶⁾

Далее, согласно алгоритму, необходимо установить энергоемкость осадка. Это позволяет сделать термогравиметрический и дифференциально-термический анализ. По его результатам, представленным на рис. 3, видно, что потеря массы в температурном диапазоне от 25 до 250 °С составляет 5%, от 250 до 450°С – 12%, от 450 до 850°С – 5%. Итоговая потеря массы в диапазоне от 25 до 850°С – 22%. Ярко выраженный эндоэффект, максимум которого находится на 150°С, по-видимому, связан с удалением воды. Экзоэффект при 300°С вызван разложением органической части образца. Наличие небольших пиков экзо- и эндоэффектов в интервале температур от 450 до 700°С свидетельствует о многокомпонентном составе осадка, в котором в рассматриваемом интервале температур происходят реакции разложения различных компонентов смеси и начало кристаллизации.

Резюмируя данную часть исследования, можно сказать, что изучаемый осадок имеет высокую энергоемкость.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен обобщенный алгоритм безопасного обращения с осадками, образующимися после биологической очистки городских сточных вод (рис. 1).

В соответствии с ГОСТ Р 17.4.3.07-2001 и СанПиН 2.1.7.573-96, исследуемый осадок может быть использован в качестве органического удобрения в сельском хозяйстве, зеленом строительстве, лесоразведении, при благоустройстве территорий, для биологической рекультивации нарушенных земель, рекультивации полигонов твердых коммунальных отходов и полигонов

промышленных отходов. Целесообразно также применение осадка при производстве почвогрунтов.

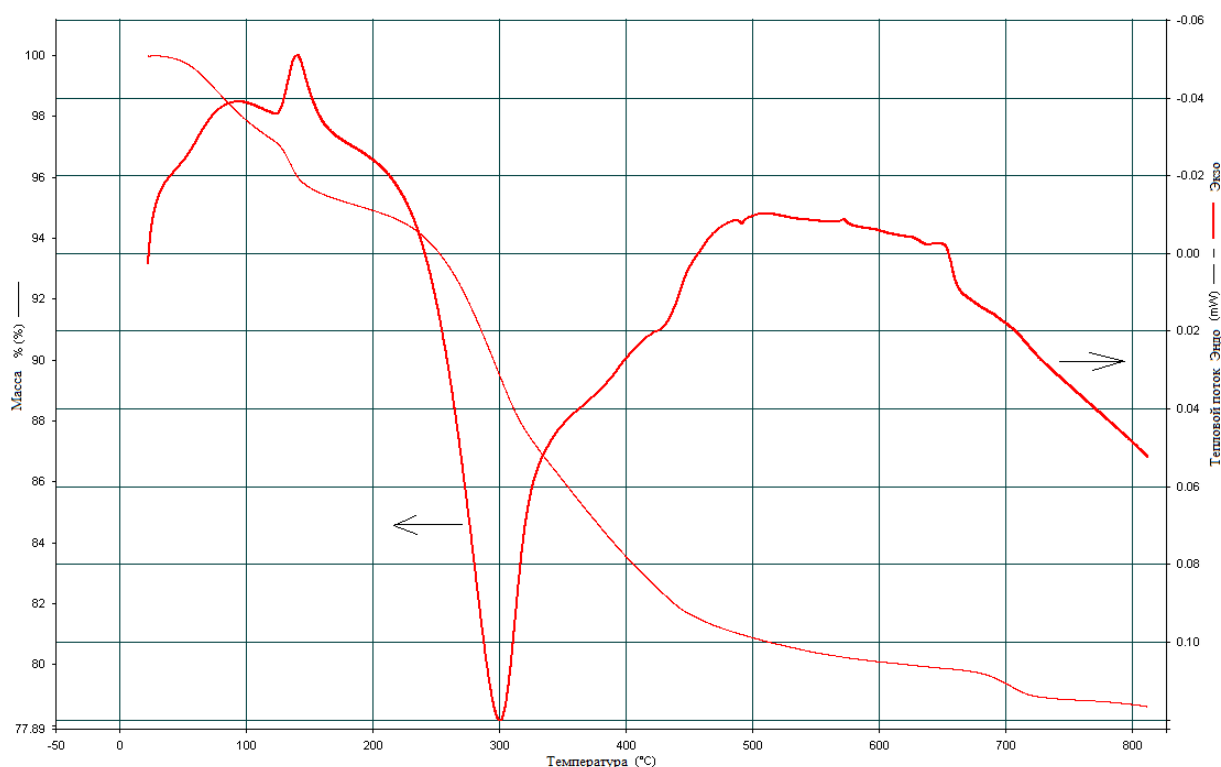


Рис. 3. Дериватограмма образца ОСВ в интервале температур от 25 до 850°C.

Кроме того, следует отметить, что в соответствии с СП 2.1.7.1038-01. 2.1.7. «Почва, очистка населенных мест, отходы производства и потребления, санитарная охрана почвы. Гигиенические требования к устройству и содержанию полигонов для твердых бытовых отходов. Санитарные правила» и СанПиН 2.1.7.1322-03 «Гигиенические требования к размещению и обезвреживанию отходов производства и потребления», химически и биологически безопасные осадки, как малоопасные, могут:

- временно складироваться на территории предприятия, и за его пределами в виде специально спланированных отвалов и хранилищ;
- приниматься на полигоны твердых коммунальных отходов в количестве до 30% от их массы при согласовании в установленном порядке;
- использоваться для технической рекультивации нарушенных земель, в том числе карьеров, совместно с инертными материалами - грунтом, строительными отходами и т.п. на основе соответствующих проектов рекультивации.

Кроме того, исследуемый осадок обладает высокой энергоемкостью, поэтому может быть рекомендован для изготовления энергобрикетов.

Список литературы:

1. Chen G., Wang X., Li J. et al. // Science of the Total Environment. 2019. V. 647. P. 1433. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.08.104.

2. *Lupeiko T.G., Gorbunova M.O., Bayan E.M.* // Russian J. Appl. Chem. 2004. V. 77. No. 1. P. 79. DOI: 10.1023/B:RJAC.0000024581.96351.d7.
3. *Баян Е.М., Лупейко Т.Г., Горбунова М.О.* // Экология и промышленность России. 2018. Т. 22. № 1. С. 50. DOI: 10.18412/1816-0395-2018-1-50-55.
4. *Ben Hassen Trabelsi A., Zayoud R., Zaafour K.* Sewage Sludge as Source of Energy: Experimental and Numerical Investigations of Thermochemical Conversion of Sewage Sludge via Pyrolysis. In: Kallel A., Ksibi M., Ben Dhia H., Khélifi N. (eds) Recent Advances in Environmental Science from the Euro-Mediterranean and Surrounding Regions. EMCEI 2017. Advances in Science, Technology & Innovation. Springer, Cham., 2018. DOI: 10.1007/978-3-319-70548-4_452.
5. *Liu Y.-J., Gu J., Liu Y.* // Bioresource Technology. 2018. V. 269. P. 513. DOI: 10.1016/j.biortech.2018.08.104.
6. *Liu Y., Tay J.-H.* // Biotechnology Advances. 2001. V. 19. No. 2. P. 97. DOI: 10.1016/S0734-9750(00)00066-5.
7. *Metcalfe E., Eddy H.* Wastewater engineering: treatment and resource recovery. 5th ed. New York, NY: McGraw-Hill Education, 2014.
8. *Manara P., Zabaniotou A.* // Renewable and Sustainable Energy Rev. 2012. V. 16. No. 5. P. 2566. DOI: 10.1016/j.rser.2012.01.074.
9. *Vassilev S.V., Baxter D., Andersen L.K., Vassileva C.G., Morgan T.J.* // Fuel. 2012. V. 94. P. 1. DOI: 10.1016/j.fuel.2011.09.030.
10. *Sharma B., Sarkar A., Singh P., Singh R.P.* // Waste Management. V. 64. P. 117. DOI: 10.1016/j.wasman.2017.03.002.
11. *Börjesson G., Kätterer T.* // Nutrient Cycling in Agroecosystems. 2018. V. 112. No. 3. P. 369. DOI: 10.1007/s10705-019-09988-x.
12. *Kominko H., Gorazda K., Wzorek Z., Wojtas K.* // Waste and Biomass Valorization. 2018. V. 9. No. 10. P. 1817. DOI: 10.1007/s12649-017-9942-9.
13. *Мерзлая Г.Е., Афанасьев Р.А.* // Химическая безопасность. 2018. Т. 2. № 1. С. 180. DOI: 10.25514/CHS.2018.1.12892.
14. *Chung H.I., Lee Y.S.* // KSCE Journal of Civil Engineering. 2006. V. 10. No. 4. P. 255. DOI: 10.1007/BF02830779.
15. *Chen Y., Yuan L., Xu C.* // Environmental Earth Sciences. 2017. V. 26. P. 226. DOI: 10.1007/s11356-015-5618-9.
16. *Verlicchi P., Zambello E.* // Science of the Total Environment. 2015. V. 238. P. 750. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.08.108.
17. Council Directive of 12 June 1986 on the protection of the environment, and in particular of the soil, when sewage sludge is used in agriculture (86/278/EEC). <http://data.europa.eu/eli/dir/1986/278/2018-07-04> (дата обращения 29.09.2019).
18. *Barakat M.A.* // Arabian Journal of Chemistry. 2011. V. 4. No. 4. P. 361. DOI: 10.1016/j.arabjc.2010.07.019.
19. *Świerczek L., Cieřlik B.M., Konieczka P.* // Journal of Cleaner Production. 2018. V. 200. P. 342. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.07.188.
20. *Krejcirikova B., Ottosen L.M., Kirkelund G.M., Rode C., Peuhkuri R.* // Journal of Building Engineering. 2019. V. 21. P. 396. DOI: 10.1016/j.jobee.2018.10.021.
21. *Mu'azu N.D., Jarrah N., Zubair M., Alagha O.* // Int. J. Environ. Res. Public Health. 2017. V. 14. P. 10. DOI: 10.3390/ijerph14101094.
22. *Коченкова А.А.* // Приоритетные научные направления: от теории к практике. 2016. № 28. С. 141.

23. *Liu X., Xu Q., Wang D. et al.* // *Bioresour. Technol.* 2018. V. 268. P. 230. DOI: 10.1016/j.biortech.2018.07.109.
24. *Chanaka Udayanga W.D., Veksha A., Giannis A. et al.* // *Fuel*. 2018. V. 226. P. 721. DOI: 10.1016/j.fuel.2018.04.045.
25. *Syed-Hassan S.S.A., Wang Y., Hu S., Su S., Xiang J.* // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. V. 80. P. 888. DOI: 10.1016/j.rser.2017.05.262.
26. *Samolada M.C., Zabaniotou A.A.* // *Waste Management*. 2014. V. 34. No. 2. P. 411. DOI: 10.1016/j.wasman.2013.11.003.
27. *Fu F., Wang Q.* // *Journal of Environmental Management*. 2011. V. 92. No. 3. P. 407. DOI: 10.1016/j.jenvman.2010.11.011.
28. *Ширинкина Е.С., Вайсман Я.И., Курило О.Н.* // *Экология и промышленность России*. 2018. Т. 22. № 7. С. 54. DOI: 10.18412/1816-0395-2018-7-54-58.
29. *Янин Е.П.* // *Ресурсосберегающие технологии*. 2006. № 24. С. 3.
30. *Staf M., Buryan P.* // *Chemical Papers*. 2016. V. 70. No. 11. P. 1479. DOI: 10.1016/j.rser.2006.05.014.
31. *Mininni G., Blanch A.R., Lucena F., Berselli S.* // *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 2015. V. 22. No. 10. P. 61. DOI: 10.1007/s11356-014-3132-0.
32. *Kuryntseva P., Galitskaya P., Selivanovskaya S.* // *Waste Management*. 2016. V. 58. P. 90. DOI: 10.1016/j.wasman.2016.09.031.
33. *Градова Н.Б., Баурина М.М., Эль-Регистан Г.И. и др.* // *Бутлеровские сообщения*. 2017. Т. 50. № 5. P. 46.
34. *Czapluk B., Rutkowski R., Rybak J.* // *Environment Protection Engineering*. 2018. V. 44. P. 1. DOI: 10.5277/epe180112.
35. *Валетов Д.С., Кащенко О.В.* // *Academy*. 2018. № 12 (39).
<https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-metodov-utilizatsii-osadkov-gorodskih-stochnyh-vod>
(дата обращения: 22.09.2019).
36. *Шарафиев Р.Г., Ахмадиев Г.М.* // *Бюллетень науки и практики*. 2018. Т. 4. № 5. С. 197.
<http://www.bulletennauki.com/sharafiev> (дата обращения 15.09.2019).

References:

1. *Chen G., Wang X., Li J. et al.* // *Science of the Total Environment*. 2019. V. 647. P. 1433. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.08.104.
2. *Lupeiko T.G., Gorbunova M.O., Bayan E.M.* // *Russian J. Appl. Chem.* 2004. V. 77. No. 1. P. 79. DOI: 10.1023/B:RJAC.0000024581.96351.d7.
3. *Bayan E.M., Lupeyko T.G., Gorbunova M.O.* // *Ekologia i promyslennost' Rossii [Ecology and Industry of Russia]*. 2018. V. 22. No. 1. P. 50 [in Russian]. DOI: 10.18412/1816-0395-2018-1-50-55.
4. *Ben Hassen Trabelsi A., Zayoud R., Zaafour K.* *Sewage Sludge as Source of Energy: Experimental and Numerical Investigations of Thermochemical Conversion of Sewage Sludge via Pyrolysis*. In: Kallel A., Ksibi M., Ben Dhia H., Khélifi N. (eds) *Recent Advances in Environmental Science from the Euro-Mediterranean and Surrounding Regions. EMCEI 2017. Advances in Science, Technology & Innovation*. Springer, Cham., 2018. DOI:10.1007/978-3-319-70548-4_452.
5. *Liu Y.-J., Gu J., Liu Y.* // *Bioresource Technology*. 2018. V. 269, P. 513. DOI: 10.1016/j.biortech.2018.08.104.
6. *Liu Y., Tay J.-H.* // *Biotechnology Advances*. 2001. V. 19. No. 2. P. 97. DOI: 10.1016/S0734-9750(00)00066-5.

7. *Metcalf E., Eddy H.* Wastewater engineering: treatment and resource recovery. 5th ed. New York, NY: McGraw-Hill Education, 2014.
8. *Manara P, Zabaniotou A.* // Renewable and Sustainable Energy Rev. 2012. V. 16. No. 5. P. 2566. DOI: 10.1016/j.rser.2012.01.074.
9. *Vassilev S.V., Baxter D., Andersen L.K., Vassileva C.G., Morgan T.J.* // Fuel. 2012. V. 94. P. 1. DOI: 10.1016/j.fuel.2011.09.030.
10. *Sharma B., Sarkar A., Singh P., Singh R.P.* // Waste Management. V. 64. P. 117. DOI: 10.1016/j.wasman.2017.03.002.
11. *Börjesson G., Kätterer T.* // Nutrient Cycling in Agroecosystems. 2018. V. 112. No. 3. P. 369. DOI: 10.1007/s10705-019-09988-x.
12. *Kominko H., Gorazda K., Wzorek Z., Wojtas K.* // Waste and Biomass Valorization. 2018. V. 9. No. 10. P. 1817. DOI: 10.1007/s12649-017-9942-9.
13. *Merzlaya G.E., Afanasiev R.A.* // Him. bezop. 2018. V. 2. No. 1. P. 180. DOI: 10.25514/CHS.2018.1.12892.
14. *Chung H.I., Lee Y.S.* // KSCE Journal of Civil Engineering. 2006. V. 10. No. 4. P. 255. DOI: 10.1007/BF02830779.
15. *Chen Y., Yuan L., Xu C.* // Environmental Earth Sciences. 2017. V. 26. P. 226. DOI: 10.1007/s11356-015-5618-9.
16. *Verlicchi P., Zambello E.* // Science of the Total Environment. 2015. V. 238. P. 750. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.08.108.
17. Council Directive of 12 June 1986 on the protection of the environment, and in particular of the soil, when sewage sludge is used in agriculture (86/278/EEC). <http://data.europa.eu/eli/dir/1986/278/2018-07-04> (accessed 29.09.2019).
18. *Barakat M.A.* // Arabian Journal of Chemistry. 2011. V. 4. No. 4. P. 361. DOI: 10.1016/j.arabjc.2010.07.019.
19. *Świerczek L., Cieřlik B.M., Konieczka P.* // Journal of Cleaner Production. 2018. V. 200. P. 342. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.07.188.
20. *Krejcirikova B., Ottosen L.M., Kirkelund G.M., Rode C., Peuhkuri R.* // Journal of Building Engineering. 2019. V. 21. P. 396. DOI: 10.1016/j.jobbe.2018.10.021.
21. *Mu'azu N.D., Jarrah N., Zubair M., Alagha O.* // Int. J. Environ. Res. Public Health. 2017. V. 14. P. 10. DOI: 10.3390/ijerph14101094.
22. *Kochetkova A.A.* // Prioritetnye nauchnye napravleniya: ot teorii k praktike [Priority areas of research: from theory to practice]. 2016. No. 28. P. 141 [in Russian].
23. *Liu X., Xu Q., Wang D. et al.* // Bioresour. Technol. 2018. V. 268. P. 230. DOI: 10.1016/j.biortech.2018.07.109.
24. *Chanaka Udayanga W.D., Veksha A., Giannis A. et al.* // Fuel. 2018. V. 226. P. 721. DOI: 10.1016/j.fuel.2018.04.045.
25. *Syed-Hassan S.S.A., Wang Y., Hu S., Su S., Xiang J.* // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. V. 80. P. 888. DOI: 10.1016/j.rser.2017.05.262.
26. *Samolada M.C., Zabaniotou A.A.* // Waste Management. 2014. V. 34. No. 2. P. 411. DOI: 10.1016/j.wasman.2013.11.003.
27. *Fu F., Wang Q.* // Journal of Environmental Management. 2011. V. 92. No. 3. P. 407. DOI: 10.1016/j.jenvman.2010.11.011.
28. *Shirinkina E.S., Vajsman Ya.I., Kurilo O.N.* // Ekologia i promyshlennost' Rossii [Ecology and Industry of Russia]. 2018. V. 22. No. 7. P. 54 [in Russian]. DOI: 10.18412/1816-0395-2018-7-54-58.
29. *Yanin E.P.* // Resursosberegayushchie tekhnologii [Resource-saving technologies]. 2006. No. 24. P. 3 [in Russian].

30. *Staf M., Buryan P.* // Chemical Papers. 2016. V. 70. No. 11. P. 1479. DOI: 10.1016/j.rser.2006.05.014.
31. *Mininni G., Blanch A.R., Lucena F., Berselli S.* // Environ. Sci. Pollut. Res. Int. 2015. V. 22. No. 10. P. 61. DOI: 10.1007/s11356-014-3132-0.
32. *Kuryntseva P., Galitskaya P., Selivanovskaya S.* // Waste Management. 2016. V. 58. P. 90. DOI: 10.1016/j.wasman.2016.09.031.
33. *Gradova N.B., Baurina M.M., El-Registan G.I. et al.* // Butlerovskyye soobshchenia [Butlerov Communications]. 2017. V. 50. No. 5. P. 46 [in Russian].
34. *Czapluk B., Rutkowski R., Rybak J.* // Environment Protection Engineering. 2018. V. 44. P. 1. DOI: 10.5277/epe180112.
35. *Valetov D.S., Kashchenko O.V.* // Academy. 2018. № 12 (39).
<https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-metodov-utilizatsii-osadkov-gorodskih-stochnyh-vod> (accessed 22.09.2019) [in Russian].
36. *Sharafiev R., Akhmadiev G.* // Byulleten' nauki i tekhniki [Bulletin of Science and Practice]. 2018. V. 4. No. 5. P. 197 [in Russian]. <http://www.bulletennauki.com/sharafiev> (accessed 15.09.2019).