



DOI: 10.15393/j2.art.2019.5042

УДК 628.3, 630*8

Статья

Исследование методов обработки осадков сточных вод петрозаводских очистных сооружений

Графова Елена Олеговна

канд. техн. наук, доцент, Петрозаводский государственный университет (Российская Федерация), jethel@rambler.ru

Паршин Никита Витальевич

аспирант, Петрозаводский государственный университет (Российская Федерация), hicks92@mail.ru

Получена: 25 декабря 2019 / Принята: 3 января 2020 / Опубликовано: 14 января 2020

Аннотация: В крупных населённых пунктах по всей России, в том числе и в Карелии, процесс обработки осадков сточных вод ещё не решён или решён частично. Существующие технологические схемы обработки осадков часто не являются эффективными и не соответствуют наилучшим доступным технологиям. В результате возникает переполнение осадками объектов размещения отходов и растут огромные площади для складирования осадка, выводимые из народного пользования. Сам осадок как ценный продукт навсегда остаётся невостребованным. Промышленные стоки г. Петрозаводска составляют 10—20 % суммарного расхода городских сточных вод. Выпуск очищенных стоков осуществляется в Петрозаводскую губу Онежского озера в объёме в среднем 130000 м³/сут. Ориентировочно объём образования обезвоженного осадка составляет 13000—16000 т/год. Наиболее популярные применяемые варианты обработки осадков сточных вод: компостирование в открытых буртах и компостирование с предварительным нагревом; химическая стабилизация; термическая сушка; сжигание. С точки зрения капитальных затрат и стоимости эксплуатации экономически эффективным определён метод компостирования в открытых буртах. Прочие рассматриваемые варианты технологий обеспечивают более высокий уровень стабилизации осадка и отличаются меньшей потребностью в площадях, но капитальные затраты на их реализацию и расходы на эксплуатацию выше, чем для технологии компостирования в открытых буртах. Расход осадка на компостирование составляет 600—700 м³ на одну иловую площадку в месяц. При проведении исследований в течение года динамика температурных показателей не выявила

различий по температуре между компостируемыми смесями, заложенными в летний, зимний и демисезонный периоды года. Осадок смешивается с древесной корой в соотношении 1 : 1 по массе содержания сухого вещества. Также процесс обработки можно интенсифицировать, дополнив его системой перемешивания и предварительным нагревом грунта, что гарантированно обеспечит требуемый уровень обеззараживания компоста. При этом сокращается период вызревания компоста на 3—4 месяца. Получаемый почвогрунт реализуется при благоустройстве городских территорий. Анализ на наличие тяжёлых металлов и радиоактивных элементов подтвердил отсутствие превышений. По итогам проверки получен сертификат соответствия, дающий право на реализацию продукта.

Ключевые слова: коммунальный осадок сточных вод, компостирование, бурты, иловые карты, утилизация.

DOI: 10.15393/j2.art.2019.5042

Article

Research of methods for the waste water sludge treatment technology of petrozavodsky treatment facilities

Elena O. Grafova

Candidate of Engineering, Petrozavodsk State University (Russian Federation), jethel@rambler.ru

Nikita V. Parshin

Graduate student, Petrozavodsk State University (Russian Federation), hicks92@mail.ru

Received: 25 December 2019 / Accepted: 3 January 2020 / Published: 14 January 2020

Abstract: In large Russian settlements, including settlements in Karelia, the problem of treating sewage sludge has not yet been solved or has been partially solved. Existing sludge treatment schemes are often not efficient and do not correspond to the best available technologies. As a result, waste disposal facilities are congested with sludge and huge areas for sediment storage are withdrawn from public use. The sludge itself, as a valuable product, remains unclaimed forever. Industrial effluents from Petrozavodsk account for 10 - 20% of the total urban wastewater discharge. The effluent is discharged into the Petrozavodsk Bay of Lake Onega in an average volume of 130,000 m³ / day. Approximately, the volume of formation of dehydrated sludge is 13 000 – 16 000 tons / year. The most popular wastewater sludge treatment options are composting in open piles and composting with preheating; chemical stabilization; thermal drying; burning. From the point of view of capital costs and operating costs, the method of composting in open piles is defined as cost-effective. The other technology options under consideration provide a higher level of sediment stabilization and are characterized by a lower need for areas, but the capital costs for their implementation and operating costs are higher than for the open composting technology. The sediment consumption for composting is 600 - 700 cubic meters per sludge site per month. One year research showed that the dynamics of temperature indicators did not reveal differences in temperature between compostable mixtures embedded in the summer, winter and demi-season periods of the year. The sludge is mixed with bark in a ratio of 1: 1 by weight of the dry matter content. Also, the treatment process can be intensified by supplementing it with a mixing system and preliminary heating of the soil, which provides the required level of compost disinfection. At the same time, the compost ripening period is reduced by 3-4 months. The resulting soil is implemented during the improvement of urban areas. Analysis for the presence of heavy

metals and radioactive elements showed that their maximum allowable concentrations have not been exceeded.

Keywords: municipal sewage sludge, composting, heap, sludge shift, waste.

1. Введение

Обработка сточных вод в крупных населённых пунктах по всей России, в том числе и в Карелии, находится под жёстким контролем природоохранных служб и оценивается как удовлетворительная, но вопрос обработки осадков всё ещё не решён или решён частично. Существующие технологические схемы обработки осадков часто не являются эффективными и не соответствуют наилучшим доступным технологиям. В результате возникает переполнение осадками объектов размещения отходов и растут огромные площади для складирования осадка, выводимые из народного пользования. Сам осадок как ценный продукт навсегда остаётся невостребованным. В такой ситуации оказался и г. Петрозаводск.

Целью обработки осадков сточных вод является получение стабильного (не загнивающего) и безопасного для окружающей среды осадка, занимающего минимальные объёмы [23]. Утилизация осадков сточных вод и избыточного активного ила часто связана с использованием их в сельском хозяйстве в качестве удобрения [25], [29], что обусловлено достаточно большим содержанием в них биогенных элементов. Для этого органические осадки канализационных очистных сооружений подвергают стабилизации, уплотнению, обезвоживанию и обеззараживанию. Стабилизация, в результате которой осадок теряет склонность к загниванию, как правило, осуществляется биологическими способами в анаэробных и аэробных условиях [2].

С учётом количества обрабатываемых сточных вод объёмы предварительно обезвреженных осадков, которые необходимо складировать, достигают огромных масштабов. На очистных сооружениях г. Петрозаводска в сутки на иловые карты отгружается около 70 м^3 осадка при его влажности приблизительно 65 %. Постоянное расширение площади под складирование осадка привело к заполнению выведенной площадки, при этом поиск новых участков складирования оказался весьма затруднительным.

В настоящее время использование традиционных в России полумер — обезвоживание и складирование осадка — является не только опасным с экологической точки зрения, но и нерентабельным. Необходимо модернизировать технологию обработки осадка до получения готового продукта, востребованного на рынке, хотя бы в масштабах города, района, региона. Для этого необходимо более подробно рассмотреть состав городских осадков сточных вод. В органических осадках сточных вод содержатся разнообразные органические вещества, основу которых составляют белки, жиры и углеводы. Например, органическая часть активного ила на 50—70 % представлена белками, содержание жиров и углеводов соответственно достигает 20 % и 8 %. В сыром осадке белков примерно в два раза меньше, а углеводов в 2,5—3 раза больше, чем в активном иле. В целом твёрдая фаза осадков содержит в среднем 70—75 % органических веществ. Органическая часть осадков быстро загнивает, выделяя различные газообразные продукты [22]. Среди них следует отметить присутствие двуокиси углерода, аммиака, сероводорода, метана, меркаптанов. Также для городов промышленных регионов характерно присутствие в осадках сточных вод значительного количества

соединений тяжёлых металлов [2]. Эти металлы встречаются и в осадках сточных вод городов, не имеющих соответствующих предприятий. Так, содержание меди и цинка во многом определяется рассеянными источниками загрязнений. Поскольку тяжёлые металлы при определённых концентрациях проявляют токсикологические свойства, это является главным препятствием для дальнейшей утилизации этих осадков. Основная специфика таких отходов — их двухкомпонентность: система состоит из органической и минеральной составляющих (80 % и 20 % соответственно в свежих отходах и до 20 % и 80 % в отходах после длительного хранения). Возврат органоминеральной массы осадка в окружающую среду невозможен без предварительного обеззараживания и обработки [28].

Таким образом, образующиеся на городских канализационных очистных сооружениях органические осадки с экологической точки зрения являются не безопасными для окружающей среды вследствие особенностей своего состава и свойств. К ним следует отнести микробную заражённость осадка патогенными микроорганизмами и яйцами гельминтов, возможное содержание в осадках соединений тяжёлых металлов, выделение в атмосферу, в результате быстро развивающихся анаэробных биологических процессов, разнообразных газообразных продуктов, в том числе токсичных. Всё это вызывает необходимость в специальной обработке осадков с последующей их утилизацией.

Выбор оптимальной схемы обработки осадков сточных вод является важным экологическим и экономическим аспектом для эффективной и стабильной работы водоснабжающего предприятия [27].

2. Материалы и методы

2.1. Описание существующей технологии

Канализационные очистные сооружения г. Петрозаводска обеспечивают очистку бытовых и промышленных стоков города. Промышленные стоки составляют 10—20 % суммарного расхода сточных вод. Выпуск очищенных стоков осуществляется в Петрозаводскую губу Онежского озера в объёме в среднем 130000 м³/сут.

Ориентировочно объём образования обезвоженного осадка составляет 13000—16000 т/год. Обезвоженный осадок содержит около 25 % сухого вещества, что соответствует приблизительно 3300—4000 т сухого вещества в год.

Схема обработки осадков следующая (рисунок 1). Сырой осадок из первичных отстойников подаётся при помощи шнекового насоса на аэробную стабилизацию. Суточная подача сырого осадка на стабилизацию составляет 300—400 м³/сут. Расчётное содержание сухого вещества 5 %. Сырой осадок в объёме около 1000 м³/сут. возвращается в смесительную камеру перед первичными отстойниками, чтобы повысить содержание летучих жирных кислот, необходимых для процесса удаления биогенных элементов. Дополнительно в смесительную камеру перед первичными отстойниками подаётся около 20 % избыточного ила с участка биологической очистки. Избыточный ил в объёме порядка 1000 м³/сут. откачивается

из главного трубопровода возвратного ила. Около 20 % этого объёма перекачивается к первичным отстойникам, а остальное — на аэробную стабилизацию. Аэробная стабилизация проходит в двух параллельных бетонных резервуарах при помощи диффузоров. В один из резервуаров поступает сырой осадок и избыточный ил в соотношении 1 : 2, а во второй — только избыточный ил. Время выдержки осадка в резервуарах составляет около трёх дней.

Далее осуществляется перекачка осадка с аэробной стабилизации на ленточные уплотнители, где обезвоживаемый осадок уплотняется. Уплотнённый осадок под действием собственного веса выгружается из уплотнителя на расположенный под ним ленточный фильтр-прессе. Для улучшения водоотдачи перед обезвоживанием в осадок добавляется раствор катионного полимера марки Grinlaif.

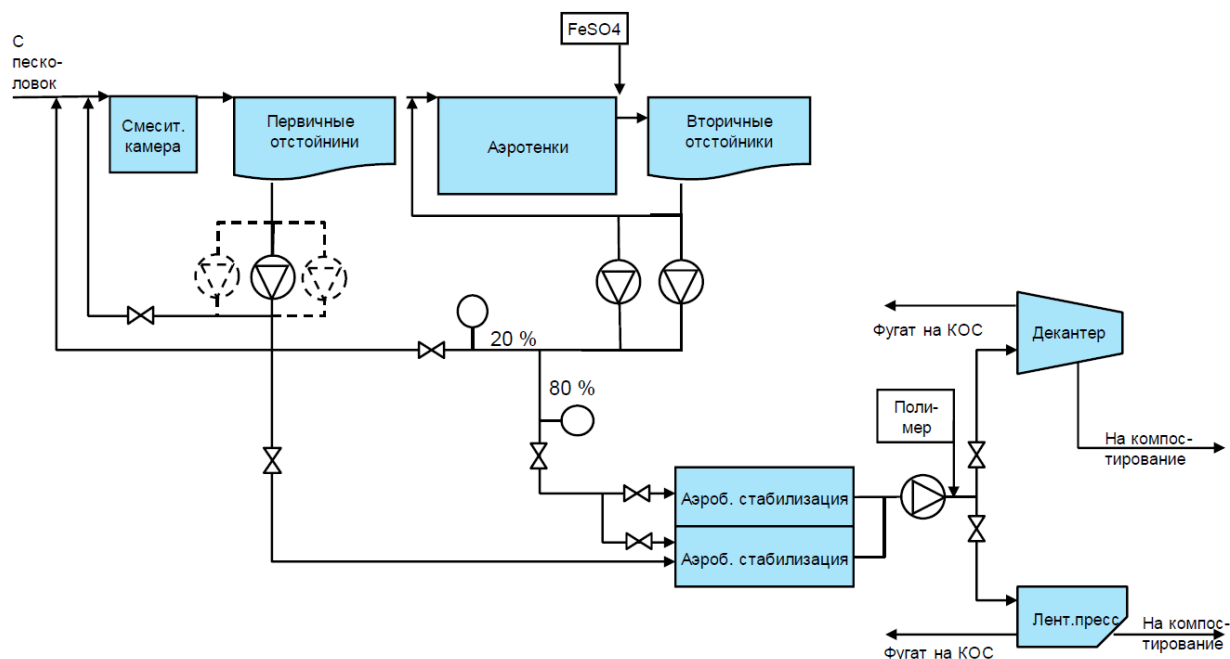


Рисунок 1. Технологическая схема действующей системы обработки осадка

Figure 1. Technological scheme of the existing sludge treatment system

2.2. Сравнительная характеристика вариантов технологии обработки

На сегодняшний момент популярностью пользуются следующие методы обработки осадка, которые могут применяться обособленно или в различных сочетаниях, в зависимости от доступных путей утилизации конечного продукта: влажное анаэробное сбраживание (не обезвоженный осадок); сухое анаэробное сбраживание (обезвоженный осадок); тоннельное компостирование; компостирование в открытых буртах; термическая сушка; сжигание; химическая стабилизация, например, с использованием извести или окисляющих веществ [24].

Наиболее популярные применяемые варианты обработки осадков сточных вод:

1. Компостирование в открытых буртах и компостирование с предварительным нагревом.
2. Химическая стабилизация.

3. Термическая сушка.

4. Сжигание.

Рассмотрим особенности данных технологий.

2.2.1. Компостирование в открытых буртах

Процесс компостирования может быть реализован в специальных реакторах, в сооружениях тоннельного типа либо в открытых буртах. В реакторах или тоннелях условия протекания процесса (температуру, влажность, аэрацию) можно контролировать. После компостирования в реакторе или тоннеле материал подлежит дополнительной стабилизации в открытых буртах. Компост вызревает в открытых буртах и превращается в стабильный конечный продукт. При хорошо налаженном процессе температура внутри буртов поднимается до 60—65 °С, что обеспечивает необходимое обезвреживание. Для надлежащего регулирования технологического режима необходимо контролировать температуру осадков в буртах. Обезвоженный из фильтр-пресса осадок смешивается с наполнителем, например, древесной стружкой или корой, чтобы компостируемая масса была достаточно пористой и хорошо вентилировалась. Осадок смешивается с наполнителем при помощи фронтального погрузчика, в процессе формирования буртов. Дальнейшее перемешивание осуществляется при помощи грядового грунтосмесителя.

Требуемое количество наполнителя составляет около 50 % по массе и 1 : 1 по содержанию сухого вещества. При использовании древесной стружки около половины материала наполнителя можно извлечь из полученного компоста путём просеивания и использовать повторно. Остальная часть материала разлагается в процессе компостирования. В процессе компостирования материал в буртах ворошат при помощи специальной техники, чтобы регулировать температуру, аэрацию и его влажность. Общая продолжительность выдержки материала в буртах составляет 9—10 месяцев, включая активную фазу протяжённостью 3—4 месяца и около 6 месяцев на вызревание компоста. Активная фаза осуществляется в буртах шириной 3,6 м, которые удобно ворошить мешалкой. По окончании активной фазы из материала, при помощи колёсного погрузчика, формируют бурты шириной 6 м для вызревания. Конечный продукт пригоден для использования в озеленении [1].

2.2.2. Химическая стабилизация

Процесс стабилизации усиливается при помощи химического гидролиза. В осадок добавляют оксид или диоксид кальция CaO (CaO_2) и перуксусную кислоту $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_3$ при помощи передвижной стабилизационной установки, которая перемещается обычным трактором. Осадок, прошедший химическую стабилизацию, гигиенически безопасен и удобен в обращении. Конечный продукт химической стабилизации подходит для применения в качестве удобрения в сельском хозяйстве.

Химическая стабилизация путём добавления извести и перуксусной кислоты позволяет повысить рН осадка до уровня, при котором прекращается жизнедеятельность

микроорганизмов, и поддерживать водородный показатель $pH > 12$ приблизительно в течение одного часа. При использовании перуксусной кислоты достигается лучший эффект стабилизации и сокращается время вызревания компоста, в сравнении с традиционной схемой стабилизации известью. Обеззараживание осадка достигается за счёт повышенных значений pH и температуры. Температура зависит от содержания сухого вещества в осадке и дозы извести. После химической стабилизации продукт вызревает в буртах за 3—4 месяца, что на 6 месяцев быстрее, чем при обычном компостировании в буртах. Соответственно, площадь, занимаемую буртами для компостирования, можно сократить вдвое. В случае химической стабилизации весь процесс компостирования можно осуществлять в небольших буртах шириной 3,6 м. При этом отпадает необходимость переформирования малых буртов в большие для вызревания компоста.

2.2.3. Термическая сушка

При термической сушке из обезвоженного осадка испаряется вода, а содержание сухого вещества в нём, которое первоначально составляет порядка 25 %, увеличивается до 80—95 %. При этом объём осадка уменьшается приблизительно до одной четверти первоначального объёма. Процесс высушивания проходит при температуре 80—150 °С, в зависимости от выбранной технологии и источника тепла.

С учётом степени сухости осадка необходимо принимать во внимание следующие обстоятельства:

- для подачи осадка, содержащего 15—40 % сухого вещества, можно использовать поршневой насос, шнековый или ленточный транспортёр;
- при концентрации сухого вещества в осадке менее 70 % он находится в твёрдом состоянии и его можно перемещать шнековым или ленточным транспортёром;
- концентрация сухого вещества в осадке 50—65 % соответствует «вязкой фазе», которую следует избегать, т. к. осадок имеет липкую консистенцию и не удобен в обращении.

Используется несколько технологий термической сушки: технология контактной сушки и технология конвекционной сушки. При контактной сушке осадок соприкасается с нагретой поверхностью, образующийся при этом пар удаляется из сушильной установки воздушным потоком. Примером контактной сушки являются дисковые и мембранные сушильные установки. В процессе конвекционной сушки осадок контактирует с нагретым газом (воздухом). Примеры конвекционной сушки: ленточные и барабанные сушильные установки, а также установки с псевдоожиженным слоем и с активным вентилированием не нагретым воздухом.

2.2.4. Сжигание

Распространённым способом утилизации осадка сточных вод является его сжигание [26]. Сжигание — это термическое окисление (горение) осадка в условиях избытка кислорода. При сжигании объём конечного продукта минимален, поскольку органические вещества осадка

полностью окисляются, а осадок превращается в золу. Этот процесс гарантированно уничтожает потенциально опасные компоненты осадка. Сжигание — один из самых дорогостоящих вариантов обработки осадка.

Существует два подхода к сжиганию осадка — отдельное сжигание (моноинсинерация) осадка сточных вод или совместное сжигание (например, в сочетании с твёрдыми отходами, углём или торфом). Из известных технологий сжигания наибольшее распространение получили печи с псевдоожиженным слоем и колосниковыми решётками. В последние годы наиболее востребованной технологией моноинсинерации стало сжигание в стационарных печах с псевдоожиженным слоем.

Обычно при сжигании осадка стремятся обеспечить автотермическое горение материала, т. е. такие условия, при которых в систему не нужно вводить дополнительную энергию из внешних источников (кроме энергии для запуска процесса). Для автотермического горения осадок перед сжиганием должен пройти термическую сушку. Типичные значения теплотворной способности осадка для автотермического сжигания находятся в диапазоне от 4,8 до 6,5 МДж/кг. Предельным значением для автотермического сжигания считается 3,5 МДж/кг. Теплотворная способность осадка зависит от таких факторов, как содержание сухого вещества и зольность. Потребность в подаче дополнительного топлива можно уменьшить, используя эффективные системы рекуперации тепла (например, использовать тепло дымовых газов для подогрева воздуха горения и/или утилизировать тепло для подсушивания осадка).

При сжигании образуется зола двух видов — подовая и летучая (зольная пыль). Подовую золу можно использовать как добавку при производстве цемента или (в ограниченном объёме) в дорожном строительстве. Зольная пыль, которая выделяется в процессе очистки дымовых газов, относится к категории опасных отходов, захоронение которых весьма затруднительно.

Технологический процесс выглядит следующим образом: подсушенный осадок подаётся при помощи шнековых транспортёров в печь с псевдоожиженным слоем. Из подсушенного осадка испаряются остатки воды. После этого осадок воспламеняется под действием высокой температуры и в присутствии воздуха, и в зоне сжигания происходит полное выгорание летучих веществ. На выходе процесса сжигания получают золу и дымовые газы. В печи поддерживается температура в диапазоне 800—900 °С, чтобы минимизировать выбросы в атмосферу. Время выдержки перед первыми устройствами охлаждения дымовых газов составляет около трёх секунд. Процесс сжигания проходит в полностью автотермическом режиме. Перед подачей в камеры сгорания печей воздух нагревается до температуры 550 °С в подогревателях, работающих на излишках тепла предварительной сушки и дымовых газов.

2.3. Технологические параметры процесса обработки осадка

Для оценки технологического процесса обработки осадка определены система показателей и основные технологические параметры совместного биотермического обезвреживания и переработки осадков сточных вод и твёрдых бытовых отходов в условиях естественной

и принудительной аэрации в штабелях (буртах). Применение этой технологии позволяет улучшить условия утилизации осадков и бытовых отходов в сельскохозяйственном производстве [29]. На эффективность процесса компостирования влияют такие факторы, как температура, подача кислорода (т. е. аэрация), влажность, pH, соотношение C/N, размер частиц и степень уплотнения [6], [9]. Более детальное рассмотрение данных параметров позволит оценить их значимость для процесса обезвреживания, в том числе компостирования.

Частота ворошения. В процессе компостирования наиболее распространённой процедурой аэрации является переворачивание компостного материала. Это делает компостирующий материал легкодоступным для микробиологической утилизации и, таким образом, приводит к выбросам газа [12]. Хотя улучшение аэрации на ранних стадиях деградации органических веществ приводит к сокращению продолжительности стабилизации отходов, избыточная аэрация или превращение могут привести к потере жизненно важных компонентов компостирования [1]. Существует тесная связь между частотой ворошения и некоторыми физико-химическими переменными, которые могут использоваться в качестве показателей зрелости компоста [11]. Например, частота ворошения влияет на общий азот, pH, влажность, соотношение C/N, сухое вещество, общий углерод и температуру компостного слоя [3]. Смешивание компостируемых материалов предотвращает уплотнение, что может привести к плохой пористости и низкому распределению воздуха в компостном слое [8]. Различные авторы сообщают о разных режимах ворошения, которые варьируются от одного раза в день до еженедельного ворошения компостного сырья. Возможен режим периодического ворошения (каждые 4—5 дней) в течение трёх месяцев компостирования [16]. При сравнении влияния двух различных режимов ворошения на популяцию компостных бактерий трёхдневный режим ворошения привёл к значительному увеличению популяции аэробных бактерий в компостных кучах, в то время как ежедневное перемешивание не привело к значительному увеличению популяции бактерий [1].

Температура. Температура является одним из основных параметров мониторинга процесса компостирования [20]. Значительный температурный градиент возникает в компостной куче из-за нелинейных балансов массы и энергии [21]. Компостирование является экзотермическим процессом, который зависит от начальной температуры и биоразлагаемости субстратов [7]. Температура в процессе компостирования может повышаться в результате ускоренной биodeградации органического вещества микроорганизмами [13]. Однако эффективность процесса компостирования снижается по мере повышения температуры [17]. Динамику температуры в процессе компостирования можно разделить на четыре фазы: мезофильную, термофильную, охлаждающую и стадию созревания [3]. Также рассматриваются две стадии динамики температуры, а именно термофильная стадия (активная фаза) и стадия созревания (характеризующаяся падением температуры) [8]. В активной фазе компостирования преобладают бактерии. Компостирование при температурах выше 55 °C способствует устранению паразитов, патогенов и обеспечивает максимальные санитарные условия [14]. Если термофильная фаза длится более трёх дней, компост будет свободен от семян сорняков

и патогенов, следовательно, будут выполнены санитарные требования [21]. Хотя в работе [3] отмечено, что термофильная фаза должна длиться неделю для полной элиминации патогенов. Изучено, что температуры между 52 и 60 °С поддерживают самую большую термофильную деятельность в компостируемых системах [19]. Оптимальной температурой для компостирования является 40—65 °С. Высокий уровень термофильной активности наблюдается при температуре 54 °С [15]. Высокая температура и высокое количество аммиака также могут ингибировать рост и активность нитрифицирующих бактерий в термофильной фазе, а чрезмерное тепло может уничтожить термофильные микробные популяции. Температура компоста не должна превышать 60—65 °С, т.к. произойдёт гибель микроорганизмов, что приведёт к прекращению процесса [5]. Температура более 65 °С может инактивировать грибы, актиномицеты и большинство бактерий, которые необходимы для деградации на термофильных стадиях; это позволяет развиваться только спорообразующим бактериям. Избыточное тепло во время компостирования может вызвать пожар [3].

Соотношение углерода и азота. Во время компостирования микробы разрушают органические соединения, чтобы получить энергию для метаболизма и питательные вещества (такие как N, P, K) для поддержания своей популяции [3]. Углерод (C), азот (N), фосфор (P) и калий (K) являются основными питательными веществами, необходимыми микроорганизмам, участвующим в компостировании. Однако углерод и азот являются наиболее важными: углерод используется в качестве источника энергии, а азот используется для построения клеточной структуры [3], [5]. При ограничении количества азота рост микроорганизмов уменьшается и приводит к медленному разложению имеющейся органики. Если количество азота превышает потребности микробной популяции, то его избыток улетучивается в виде аммиачного газа. Таким образом, отношение C/N является показателем степени разложения органического вещества; т.к. углерод теряется как CO₂ при биоокислении [8]. Во время компостирования коэффициент C/N уменьшается и причиной этому является то, что скорость минерализации органического азота ниже, чем у органического углерода. Регулирование сырья таким образом, чтобы соотношение соответствовало C/N = 25—30: 1, типично для активного компостирования [4]. Соотношение C/N означает, что микроорганизмы используют доступный углерод в 30—35 раз быстрее, чем скорость, с которой они преобразуют. При более низком соотношении C/N азот будет в избытке и начнёт испаряться в виде аммиачного газа с возникающим нежелательным запахом. Более низкое соотношение C/N высвобождает огромное количество растворимой основной соли, что делает почву неблагоприятной для роста растений [1]. Добавление большого разнообразия сыпучих наполнителей (например, шелуха риса, деревянная щепа, опилки и раковины арахиса) к органическому материалу увеличивает пористость смеси и коэффициент C/N исходного сырья во время компостирования [21]. Совместное компостирование навоза с такими наполнителями является мерой контроля запаха из-за поглощения избыточной влаги [5]. Сыпучий наполнитель в процессе компостирования разлагается, при этом снижается отношение C/N [8].

Увлажнённость. Содержание влаги является критическим параметром в процессе компостирования. Он влияет на скорость поглощения кислорода, свободное воздушное пространство, микробную активность и температуру процесса. Оптимальная увлажнённость, необходимая для биологической активности при компостировании, составляет от 40 до 70 % от массы компоста. По мере увеличения увлажнённости скорость диффузии газа снижается, а скорость поглощения кислорода становится недостаточной для удовлетворения метаболических потребностей микроорганизмов. Процесс компостирования может в конечном итоге стать анаэробным из-за ограниченной активности. Также существует обратная связь между влажностью и температурой; по мере повышения температуры влажность уменьшается. Влажность является полезным средством измерения других важных факторов, таких как наличие воды, что может замедлить микробную активность в диапазоне низкой влажности. Во время компостирования уровень влажности жизненно важен для распределения растворимых питательных веществ, необходимых для микробной метаболической активности. Потеря влаги в процессе компостирования может считаться сильным показателем скорости разложения. Оптимальным для компостирования считается содержание влаги 70 %, в особенности для птичьего помёта и пшеничной соломы. Однако когда содержание влаги превышает 60 %, движение кислорода затруднено, потому что поровые пространства закрыты и процесс имеет тенденцию к анаэробизму [16].

Электропроводность. Электропроводность отражает солёность компоста [8]. В процессе компостирования концентрация солей неизбежно возрастает вследствие разложения сложного органического вещества [3]. Также электропроводность может увеличиваться за счёт образования минеральных солей, таких как ионы аммония и фосфаты, путём трансформации органического вещества. Испарение аммиака и осаждение минеральных солей могут привести к уменьшению электропроводности [4]. Для поддержания роста растений значение электропроводности зрелого компоста должно быть очень низко. С этой целью различные авторы приняли разные ограничения для электропроводности.

В качестве предельного значения электропроводности для компоста, применяемого к почве, приняты 4 мСм/см. [21]. Некоторые авторы указывают диапазон < 3,5 мСм/м в качестве предельного значения для безопасного применения компоста в сельском хозяйстве [10]. Также в качестве критерия, который должен быть соблюден до использования компоста для внесения поправок в органическую почву, указан максимальный уровень электропроводности в 3 мСм/см [6]. Компост с высоким значением электропроводности вызовет отрицательный эффект для роста растения [1]. Однако для использования компоста с высоким значением электропроводности в растениеводстве его необходимо хорошо перемешать с почвой или другими материалами с низкой электропроводностью, прежде чем его можно будет применять. Это связано с тем, что солёность может оказывать негативное влияние на прорастание семян или рост растений, особенно на стадии рассады [11].

Аэрация. Аэрация является важным фактором, влияющим на компостирование [3]. По сути, компостирование — это аэробный процесс, в котором потребляется O_2 и выделяются

газообразные H_2O и CO_2 . На динамику микробной популяции в компосте влияют уровень O_2 и скорость аэрации. Аэрация помогает поддерживать температуру компоста для термофильного разложения органических отходов. Влияние скорости воздушного потока на скорость разложения органического вещества, распределение температуры и других параметров в компостирующей массе во многом зависит от времени, состояния окружающей среды и местоположения в компостирующей массе. Аэрация обеспечивает достаточное количество O_2 , необходимое для окисления органического материала, и испаряет избыточную влагу из субстрата. Она является основным фактором, влияющим на стабильность компоста, а также на физико-химические характеристики (влажность, содержание органического вещества, температуру и pH) компоста. Недостаточная аэрация может привести к анаэробным условиям, а чрезмерная аэрация — к чрезмерному охлаждению, тем самым нарушая термофильные условия, необходимые для оптимальных скоростей разложения. Увеличение интенсивности аэрации обычно приводит к более высокой скорости испарения и более быстрой сушке компоста и охлаждению крупного компоста. Для обеспечения адекватной аэрации компостного сырья некоторыми авторами использовались различные режимы обработки. В работе [9] сообщается о ежедневном ворошении при компостировании свиного навоза для обеспечения подачи кислорода, а также для поддержания аэробных условий в компостных материалах. При принудительной аэрации происходит окисление углерода до CO_2 при выделении тепла; также происходит поглощение азота (N) и других биогенных элементов в качестве питательных веществ, необходимых для микробного роста, размножения и метаболических реакций. При принудительном компостировании буртов перфорированная труба, расположенная под компостной кучей, используется для активации воздушного потока в материал и подачи O_2 микроорганизмам. При корреляции зависимости между уровнем аэрации и pH более высокая концентрация приводит к снижению концентрации органических кислот в компосте и быстрому разложению кислот, что приводит к увеличению pH.

pH. Уровень pH является важным параметром процесса компостирования. Он влияет на микробную деятельность во время компостирования [10]. На ранних стадиях компостирования уровень pH снижается, а на более поздних стадиях повышается [18]. При оптимальных условиях после первоначального снижения уровень pH поднимается от кислотного до нейтрального диапазона, если разложение органических кислот произошло полностью. При низких уровнях pH, таких как pH = 5, наблюдается снижение микробной активности. Диапазон pH 7—8 является оптимальным для компостирования [3]. Минерализация соединений азота и фосфора может стать причиной уменьшения pH. Увеличение pH может быть результатом накопления аммиака в результате деградации белков, при этом подщелачивание органического вещества может препятствовать выживанию микроорганизмов, чувствительных к pH, способствующих санитарии. Диапазон pH 7,5—8,5 при компостировании поддерживает микробное разложение органических материалов; pH 6,7—9 поддерживает хорошую микробную активность. Оптимальные значения pH варьируются от 5,5 до 8; pH зрелого компоста должен находиться в диапазоне 6,0—8,5.

Размер частиц. Распределение частиц по размерам конечного компоста важно, потому что оно определяет газо- и водообмен, и особенно водоудерживающую способность [21]. Размер частиц оказывает большое влияние на поддержание адекватной пористости для правильной аэрации. Размер частиц субстрата для компостирования не должен быть слишком большим, т. к. они будут медленно разлагаться. Размер частиц также не должен быть слишком мал, т. к. они могут образовывать компактную массу и уменьшать пористость компостной подложки. Основным методом определения распределения частиц по размерам является просеивание.

3. Результаты

3.1. Качественное сравнение вариантов технологических решений

Качественное и финансовое сравнение рассматриваемых вариантов технологических решений выполнено в рамках работы с финской компанией Rõугу Finland Oy и позволило оценить популярные технологии и определить оптимальный вариант для существующих условий (таблица 1). Рассматриваемые технологии используются на практике давно и внедрены на множестве объектов в нашей стране и за рубежом. Рассматриваются технологии обработки, реализация которых позволит обеспечить получение стабильного конечного продукта в соответствии с нормативными требованиями Российской Федерации. Сжигание осадка в рассматриваемых объёмах нецелесообразно, в связи с чем качественная оценка проведена без учёта данной технологии.

Также произведена финансовая оценка капитальных и эксплуатационных затрат на внедрение рассматриваемых технологий обработки (таблица 2).

3.2. Исследование технологии компостирования осадков сточных вод

Исследование технологии компостирования осадков сточных вод проведено на серии буртов в течение одного года. Контроль качества компостирования регулировался замерами температуры. На рисунке 2 представлены результаты активной фазы термофильного процесса буртов. По окончании процесса обработки определены качественные и санитарно-эпидемиологические характеристики полученного продукта.

Исследования качества конечного продукта компостирования осадка Петрозаводских канализационных очистных сооружений, выполненные аккредитованной лабораторией, представлены в таблице 3.

Таблица 1. Сравнительный анализ технологий обработки осадка

Table 1. Comparative analysis of sludge treatment technologies

Преимущества	Недостатки
1	2
<i>Компостирование в открытых буртах</i>	
Возможность применения техники, которая уже эксплуатируется на сооружениях	Большое количество конечного продукта
Возможность хранения конечного продукта на открытых площадках	Конечный продукт менее стабилен, чем при использовании других методов
Конечный продукт пригоден для использования в озеленении	Возможны проблемы в связи с возникновением неприятного запаха
Технология соответствует НДТ	Самая большая потребность в площадях
Умеренные капитальные затраты	
Низкие эксплуатационные затраты	
Техническая простота	
<i>Компостирование в открытых буртах, с дополнительным перемешиванием и предварительным нагревом</i>	
Меньшая потребность в площадях для компостирования, что обеспечивает большую гибкость эксплуатации	Необходимо принять меры на уровне эксплуатации для соблюдения требований НДТ
Возможность применения техники, которая уже эксплуатируется на сооружениях	Высокий уровень эксплуатационных затрат
Обеспечивается обеззараживание и стабилизация конечного продукта	Большое количество конечного продукта
Конечный продукт пригоден для использования в озеленении	Возможны проблемы в связи с возникновением неприятного запаха
Хранение конечного продукта на открытых площадках	Высокий уровень капитальных затрат
<i>Химическая стабилизация</i>	
Конечный продукт пригоден для использования в качестве кондиционирующей добавки к почвам	Зависимость от доступности химических реагентов
Снижение количества конечного продукта	Обычно применяется на небольших КОС
Более короткий период вызревания и снижается потребность в площадях	Необходимость хранения конечного продукта в помещении
Умеренные капитальные затраты	Высокий уровень эксплуатационных затрат
Техническая простота	
Возможность контроля запахов	

Продолжение таблицы 1

Continuation Table 1

1	2
<i>Термическая сушка</i>	
Наименьшее количество конечного продукта	Высокий уровень капитальных затрат
Возможность контроля запахов	Техническая сложность системы
Конечный продукт пригоден для использования в качестве кондиционирующей добавки к почвам	Высокий уровень эксплуатационных затрат (при отсутствии источника дешевого газа или жидкого топлива)
	Концентрация сточной жидкости
	Хранение конечного продукта в помещении

Таблица 2. Финансовая оценка капитальных и эксплуатационных затрат

Table 2. Financial assessment of capital and operating costs

Технология	Компости- рование	Компости- рование с предвари- тельным нагревом	Химическая стабилизация	Термическая сушка	Сжигание
Капитальные затраты	136 950 000	340 050 000	237 375 000	361 788 000	1 394300 000
Экспл. затраты/год					
Тепло				32 850 000	0
Электроэнергия				5 307 000	2 467 000
Реагенты			21 540 000	1 752 000	4 285 000
Водоснабжение				58 000	234 000
Сточные воды				197 000	29 000
Оплата труда	1 950 000	1 950 000	1 950 000	4 015 000	5 329 000
Наполнитель для компоста	83 000	83 000	83 000		
Топливо для техники просеивания	2 753 000	2 753 000	2 236 000		
Транспортировка продукта	5 235 000	5 235 000	5 235 000	1 511 000	190 000
Техническое обслу- живание и запчасти	2 498 000	3 000 000	3 503 000	4 256 000	38 022 000
Плата за размещение конечного продукта				2 028 000	18 476 000
Итого экспл. затраты	12 519 000	27 969 000	34 547 000	53 194 000	70 251 000

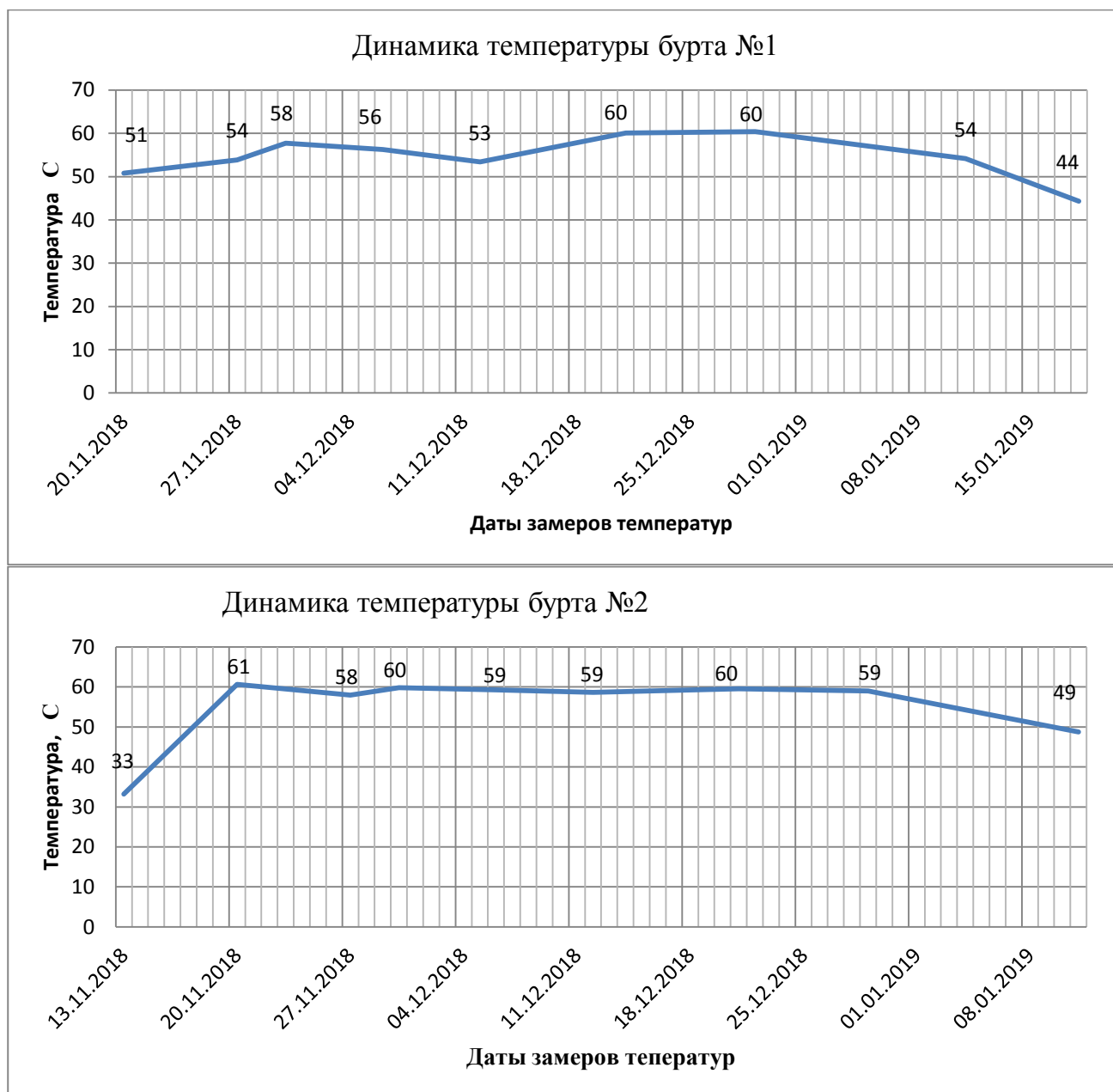


Рисунок 2. Динамика температуры компостируемой смеси буртов № 1 и № 2

Figure 2. Temperature dynamics of the composted mixture heaps No. 1 and No. 2

Таблица 3. Качество конечного продукта компостирования

Table 3. Quality of the final composting product

	Наименование показателя	Единицы измерения	ПДК и нормы	Результат испытаний
1	Массовая доля влаги	%	не более 70	10
2	Размер частиц	мм	не более 50	45
3	рН	ед., рН	6,0—8,0	7,7
4	Свинец	мг/кг	не более 130	27
5	Кадмий	мг/кг	не более 2,0	1,9
6	Ртуть	мг/кг	не более 2,1	0,01
7	Никель, мышьяк	мг/кг	не более 80,2	0
8	Цинк	мг/кг	не более 220	204
9	Медь	мг/кг	не более 132	107
10	ГХЦГ (группа изомеров), ДДТ	мг/кг	не более 0,1	> 0,005
11	Азот аммонийный	мг/кг		177
12	Азот нитритов	мг/кг	не более	0,11
13	Азот нитратов	мг/кг	не более	> 23
14	Фосфат-ион	мг/кг	не более	> 25
15	Индекс санитарно-показательных микроорганизмов (колиформы)	клеток/г	1—9	2
16	Индекс санитарно-показательных микроорганизмов (энтеробактерии)	клеток/г	1—9	не обнаружено
17	Наличие патогенных и болезнетворных микроорганизмов	клеток/г	не допускается	не обнаружено
18	Наличие жизнеспособных яиц и личинок гельминтов (нематод), личинок синантропных мух и тли	экз./кг	не допускается	не обнаружено
19	Наличие кишечных патогенных простейших	экз./100 г	не допускается	не обнаружено

4. Обсуждение и заключение

С точки зрения капитальных затрат и стоимости эксплуатации наиболее экономичным методом обработки осадка является компостирование. При корректной реализации этот метод соответствует наилучшим доступным технологиям. Получаемый конечный продукт отвечает всем требованиям в отношении качества и санитарной безопасности, пригоден для использования в благоустройстве и озеленении, востребован на рынке. Данная технология уже частично внедрена на канализационных очистных сооружениях и одобряется населением города. Прочие рассматриваемые варианты технологий обеспечивают более высокий уровень стабилизации осадка и отличаются меньшей потребностью в площадях, но капитальные затраты на их реализацию и расходы на эксплуатацию выше, чем для технологии компостирования в открытых буртах. Также процесс обработки возможно интенсифицировать, дополнив его системой перемешивания и предварительным нагревом грунта, что гарантированно обеспечит требуемый уровень обеззараживания компоста. При этом сокращается период вызревания компоста на 3—4 месяца. Таким образом, повысится гибкость использования компостных площадок; появится возможность проводить стабилизацию в буртах с шириной основания 3,6 м, без формирования буртов большей ширины. Однако внедрение такой схемы потребует более высоких капитальных и эксплуатационных затрат.

Химическая стабилизация во многом подобна процессу компостирования с предварительным нагревом. При химической стабилизации обеззараживание осадка достигается за счёт повышенного уровня pH в процессе обработки. Процесс вызревания занимает 3—4 месяца. Конечный продукт химической стабилизации используется в озеленении и благоустройстве, подобно компосту, полученному традиционным способом в открытых буртах.

Термическая сушка требует значительно больших затрат, чем компостирование или химическая стабилизация. Объём и масса осадка после термической сушки значительно снижаются, что уменьшает затраты на его транспортировку. Тем не менее этот эффект не компенсирует повышенный уровень капитальных затрат на строительство системы термической сушки и расходов на её эксплуатацию. Конечный продукт термической сушки может использоваться в качестве кондиционирующей добавки к почвогрунту.

Технология сжигания — наиболее дорогостоящее решение по сравнению с другими методами обработки осадка, и связанные с ним затраты столь высоки, что внедрение этой схемы не может быть признано экономически целесообразным. Также зола, получаемая после сжигания осадка, относится к отходам с высоким классом опасности.

В процессе исследований и внедрения на городских канализационных очистных сооружениях технологии компостирования осадка сточных вод были достигнуты положительные результаты.

Расход осадка на компостирование стабильно составляет 600—700 м³ на одну иловую площадку в месяц. Выход готового продукта (почвогрунта) составляет около 700 м³ в месяц

с одной иловой площадки. Осадок смешивается с древесной корой в соотношении 1 : 1 по массе содержания сухого вещества.

Динамика температурных показателей не выявила особых различий по температуре между компостируемыми смесями, заложенными в летний, зимний и демисезонный периоды года. В свою очередь, данный факт свидетельствует о том, что круглогодичное компостирование осадка сточных вод является приемлемым в условиях Карелии на площадках под открытым небом. Готовый продукт проходит ежеквартальный анализ на микробную обсеменённость и наличие патогенной микрофлоры. Анализ на наличие тяжёлых металлов и радиоактивных элементов подтвердил отсутствие превышений. По итогам проверки получен сертификат соответствия, дающий право на реализацию продукта.



Рисунок 3. Перекладка бурта на иловой карте

Figure 3. Relocation of a heap on the sludge shift

В связи с переводом осадка сточных вод как отхода из 5-го в 4-й класс опасности значительно возрастает стоимость его перевозки для захоронения, в то время как использование получаемого почвогрунта реализуется при благоустройстве городских территорий по конкурентной цене.

Список литературы

1. *Awasthi M. K., Pandey A. K., Khan J., Bundela P. S., Wong J. W. C., Selvam A.* Evaluation of thermophilic fungal consortium for organic municipal solid waste composting // *Bioresour. Technol.* 2014. P. 214—221.
2. *Bialobrzewski I., Miks-Krajnik M., Dach J., Markowski M., Czekała W., Gluchowska K.* Model of the sewage sludge-straw composting process integrating different heat generation capacities of mesophilic and thermophilic microorganisms // *Waste Manage.* 2015. No. 43. P. 72—83.
3. *Chen Z., Zhang S., Wen Q., Zheng J.* Effect of aeration rate on composting of penicillin mycelial dreg // *J. Env. Sci.* 2015. No. 37. P. 172—178.
4. *Huang G. F., Wong, J. W. C., Wu Q. T., Nagar B. B.* Effect of C/N on composting of pig manure with sawdust // *Waste Manage.* 2004. No. 24. P. 805—813.
5. *Imbeah M.* Composting piggery waste, a review // *Bioresour. Technol.* 1998. No. 63. P. 197—203.
6. *Juarez M. F., Praehauser B., Walter A., Insam H., Franke-Whittle I. H.* Cocomposting of biowaste and wood ash, influence on a microbially driven-process // *Waste Manage.* 2015. No. 46. P. 155—164.
7. *Kulikowska D.* Kinetics of organic matter removal and humification progress during sewage sludge composting // *Waste Manage.* 2016. No. 49. P. 196—203.
8. *Lazcano C., Gomez-Brand on M., Domínguez J.* Comparison of the effectiveness of composting and vermicomposting for the biological stabilization of cattle manure // *Chemosphere.* 2008. No. 72. P. 1013—1019.
9. *Li Z., Lu H., Ren L., He L.* Experimental and modeling approaches for food waste composting: a review // *Chemosphere.* 2013. No. 93. P. 1247—1257.
10. *Mohammad M., Alam M., Kabbashi N. A., Ahsan A.* Effective composting of oil palm industrial waste by filamentous fungi, a review // *Resour. Conserv. Recycl.* 2012. No. 58. P. 69—78.
11. *Ogunwande G. A., Osunade J. A., Adekalu K. O., Ogunjimi L. A. O.* Nitrogen loss in chicken compost as affected by carbon to nitrogen ratio and turning frequency // *Bioresour. Technol.* 2008. No. 99 (16). P. 7495—7503.
12. *Parkinson R., Gibbs P., Burchett S., Misselbrook T.* Effect of turning regime and seasonal weather conditions on nitrogen and phosphorus losses during aerobic composting of cattle manure // *Bioresour. Technol.* 2004. No. 91 (2). P. 171—178.
13. *Raut M. P., William S. M. P. P., Bhattacharyya J. K., Chakrabarti T., Devotta S.* Microbial dynamics and enzyme activities during rapid composting of municipal solid waste e a compost maturity analysis perspective // *Bioresour. Technol.* 2008. No. 99. P. 6512—6519.
14. *Ravindran B., Sekaran G.* Bacterial composting of animal fleshing generated from tannery industries // *Waste Manage.* 2010. № 30. P. 2622—2630.
15. *Rich N., Bharti A.* Assessment of different types of in-vessel composters and its effect on stabilization of MSW compost // *Int. Res. J. Eng. Technol.* 2015. No. 2 (3). P. 1—6.

16. *Ros M., Klammer S., Knapp B., Alchberger K., Insam H.* Long term effects of compost amendment of soil on functional and structural diversity and microbial activity // *Soil Use Manage.* 2006. No. 22. P. 209—218.
17. *Ryckeboer J., Mergaert J., Coosemans J., Deprins K., Swings J.* Microbiological aspects of biowaste during composting in a monitored compost bin // *J. Appl. Microbiol.* 2003. No. 94. P. 127—137.
18. *Turan N. G.* The effects of natural zeolite on salinity level of poultry litter compost // *Bioresour. Technol.* 2008. No. 99. P. 2097—2101.
19. *Vuorinen A. H., Saharinen M. H.* Evolution of microbiological and chemical parameters during manure and straw co-composting in a drum composting system // *Agric. Ecosyst. Environ.* 1997. No. 66. P. 19—29.
20. *Xiu-lan Z., Bi-qiong L., Jiu-pai N. I., De-ti X. I. E.* Effect of four crop straws on transformation of organic matter during sewage sludge composting // *J. Integr. Agric.* 2016. No. 15. P. 232—240.
21. *Zhang H., Li C., Li G., Zang B., Yang Q.* Effect of spent air reusing (SAR) on maturity and greenhouse gas emissions during municipal solid waste MSW composting with different pile height // *Procedia Environ. Sci.* 2012. No. 16. P. 59—69.
22. *Гвоздев В. Д., Ксенофонтов Б. С.* Очистка производственных сточных вод и утилизация осадков. М.: Химия, 1988. 99 с.
23. *Голубовская Э. К.* Биологические основы очистки воды: Учебное пособие для студентов строительных специальностей вузов. М.: Высш. шк., 1978. 268 с.
24. *Данилович Д. А., Ванюшина А. Я.* Анаэробное сбраживание: ключевая технология обработки осадков городских сточных вод // *Водоснабжение и санитарная техника.* 2013. № 10. С. 58—67.
25. *Евилевич А. З.* Утилизация осадков сточных вод. М.: Стройиздат, 1979. 87 с.
26. *Зайнуллин Р. Р., Галяутдинов А. А.* Необходимость сжигания осадков сточных вод // *Международный научный журнал «Инновационная наука».* 2016. № 6.
27. *Ксенофонтов Б. С.* Исследование процесса перемешивания в псевдосжиженном слое или свободном потоке жидкости при наложении электромагнитного поля и разработка смесителя: Дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08. Калинин: Калинин. политехн. ин-т, 1980. 149 с.
28. *Медведев Г. П.* Канализация городов ФРГ. Л.: Стройиздат, 1982. 168 с.
29. *Туровский И. С.* Обработка осадков сточных вод. М.: Стройиздат, 1982. 223 с.

References

1. *Awasthi M. K., Pandey A. K., Khan J., Bundela P. S., Wong J. W. C., Selvam A.* Evaluation of thermophilic fungal consortium for organic municipal solid waste composting // *Bioresour. Technol.* 2014. P. 214—221.

2. *Bialobrzewski I., Miks-Krajnik M., Dach J., Markowski M., Czekała W., Gluchowska K.* Model of the sewage sludge-straw composting process integrating different heat generation capacities of mesophilic and thermophilic microorganisms // *Waste Manage.* 2015. No. 43. P. 72—83.
3. *Chen Z., Zhang S., Wen Q., Zheng J.* Effect of aeration rate on composting of penicillin mycelial dreg // *J. Env. Sci.* 2015. No. 37. P. 172—178.
4. *Huang G. F., Wong, J. W. C., Wu Q. T., Nagar B. B.* Effect of C/N on composting of pig manure with sawdust // *Waste Manage.* 2004. No. 24. P. 805—813.
5. *Imbeah M.* Composting piggery waste, a review // *Bioresour. Technol.* 1998. No. 63. P. 197—203.
6. *Juarez M. F., Praehauser B., Walter A., Insam H., Franke-Whittle I. H.* Cocomposting of biowaste and wood ash, influence on a microbially driven-process // *Waste Manage.* 2015. No. 46. P. 155—164.
7. *Kulikowska D.* Kinetics of organic matter removal and humification progress during sewage sludge composting // *Waste Manage.* 2016. No. 49. P. 196—203.
8. *Lazcano C., Gomez-Brand on M., Domínguez J.* Comparison of the effectiveness of composting and vermicomposting for the biological stabilization of cattle manure // *Chemosphere.* 2008. No. 72. P. 1013—1019.
9. *Li Z., Lu H., Ren L., He L.* Experimental and modeling approaches for food waste composting: a review // *Chemosphere.* 2013. No. 93. P. 1247—1257.
10. *Mohammad M., Alam M., Kabbashi N. A., Ahsan A.* Effective composting of oil palm industrial waste by filamentous fungi, a review // *Resour. Conserv. Recycl.* 2012. No. 58. P. 69—78.
11. *Ogunwande G. A., Osunade J. A., Adekalu K. O., Ogunjimi L. A. O.* Nitrogen loss in chicken compost as affected by carbon to nitrogen ratio and turning frequency // *Bioresour. Technol.* 2008. No. 99 (16). P. 7495—7503.
12. *Parkinson R., Gibbs P., Burchett S., Misselbrook T.* Effect of turning regime and seasonal weather conditions on nitrogen and phosphorus losses during aerobic composting of cattle manure // *Bioresour. Technol.* 2004. No. 91 (2). P. 171—178.
13. *Raut M. P., William S. M. P. P., Bhattacharyya J. K., Chakrabarti T., Devotta S.* Microbial dynamics and enzyme activities during rapid composting of municipal solid waste e a compost maturity analysis perspective // *Bioresour. Technol.* 2008. No. 99. P. 6512—6519.
14. *Ravindran B., Sekaran G.* Bacterial composting of animal fleshing generated from tannery industries // *Waste Manage.* 2010. № 30. P. 2622—2630.
15. *Rich N., Bharti A.* Assessment of different types of in-vessel composters and its effect on stabilization of MSW compost // *Int. Res. J. Eng. Technol.* 2015. No. 2 (3). P. 1—6.
16. *Ros M., Klammer S., Knapp B., Alchberger K., Insam H.* Long term effects of compost amendment of soil on functional and structural diversity and microbial activity // *Soil Use Manage.* 2006. No. 22. P. 209—218.

17. *Ryckeboer J., Mergaert J., Coosemans J., Deprins K., Swings J.* Microbiological aspects of biowaste during composting in a monitored compost bin // *J. Appl. Microbiol.* 2003. No. 94. P. 127—137.
18. *Turan N. G.* The effects of natural zeolite on salinity level of poultry litter compost // *Bioresour. Technol.* 2008. No. 99. P. 2097—2101.
19. *Vuorinen A. H., Saharinen M. H.* Evolution of microbiological and chemical parameters during manure and straw co-composting in a drum composting system // *Agric. Ecosyst. Environ.* 1997. No. 66. P. 19—29.
20. *Xiu-lan Z., Bi-qiong L., Jiu-pai N. I., De-ti X. I. E.* Effect of four crop straws on transformation of organic matter during sewage sludge composting // *J. Integr. Agric.* 2016. No. 15. P. 232—240.
21. *Zhang H., Li C., Li G., Zang B., Yang Q.* Effect of spent air reusing (SAR) on maturity and greenhouse gas emissions during municipal solid waste MSW composting with different pile height // *Procedia Environ. Sci.* 2012. No. 16. P. 59—69.
22. *Gvozdev V. D., Ksenofontov B. S.* Industrial wastewater treatment and sludge management. Moscow: Chimija, 1988. 99 p. (In Russ.)
23. *Golubovskaja Je. K.* The biological basis of water purification. Textbook for students of construction specialties of universities. Moscow: Vysshaja shkola, 1978. 268 p. (In Russ.)
24. *Danilovich D. A., Vanjushina A. Ja.* Anaerobic digestion is a key technology for urban wastewater sludge treatment // *Water supply and sanitary equipment.* 2013. No. 10. P. 58—67.
25. *Evilevich A. Z.* Disposal of sewage sludge. Moscow: Strojizdat, 1979. 87 p. (In Russ.)
26. *Zajnullin R. R., Galjautdinov A. A.* The need for burning sewage sludge. International Scientific // *Journal «Innovatsionnaja nauka».* 2016. No. 6. (In Russ.)
27. *Ksenofontov B. S.* Investigation of the mixing process in a fluidized bed or a free flow of liquid when applying an electromagnetic field and the development of a mixer: The dissertation for the degree of candidate. tech. science. Kalinin: Kalinin Polytechnic Institute, 1980. 149 p. (In Russ.)
28. *Medvedev G. P.* Sewer cities in Germany. Leningrad: Strojizdat, 1982. 68 p. (In Russ.)
29. *Turovskij I. S.* Wastewater sludge treatment. Moscow: Strojizdat, 1982. 223 p. (In Russ.)