

*В.С. Валиев, Д.В. Иванов, Р.Р. Шагидуллин**Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, water-rf@mail.ru*

СПОСОБЫ УТИЛИЗАЦИИ ОСАДКОВ ГОРОДСКИХ СТОЧНЫХ ВОД (ОБЗОР)

В обзоре рассматриваются различные технологии обработки и утилизации осадков сточных вод, образуемых на биологических очистных сооружениях городов и населенных пунктов. Анализируются их достоинства и недостатки, обобщен опыт их применения в мировой и отечественной практике.

Ключевые слова: осадки сточных вод; утилизация; обеззараживание; обезвоживание; иловые поля.

DOI: 10.24411/2411-7374-2020-10034

Ежегодно в Российской Федерации на муниципальных сооружениях по очистке сточных вод образуется более 100 млн. м³ осадков при средней влажности 96%. На станциях аэрации крупных городов технология обработки осадков сточных вод (ОСВ) в большинстве случаев представляет собой его минерализацию в метантенках или аэробных стабилизаторах с дальнейшим механическим обезвоживанием или подсушиванием на иловых картах. На последний способ приходится 98% всех образуемых осадков. Продолжительность обезвоживания осадков в естественных условиях с влажности 98% до 75% составляет 90-110 суток.

Основным направлением использования обезвоженных ОСВ является применение их в качестве удобрений. Однако, в основном из-за высокой насыщенности ионами тяжелых металлов, поступающих со сточными водами промышленных предприятий, использование осадков в сельском хозяйстве весьма ограничено, а часто вообще невозможно. Поэтому подсушенные ОСВ остаются на иловых картах, занимая площади, необходимые для полноценного обезвоживания вновь образуемых на очистных сооружениях осадков. Такое положение со временем приводит к сокращению свободных площадей иловых карт. Для вновь образующегося осадка требуется отчуждение все новых и новых территорий. Преимущественно эти земли находятся в городской черте.

Если представить, что подобная ситуация складывается на большинстве крупных станций аэрации России, то становится понятной вся острота данной проблемы. В связи с этим уже давно назрели вопросы интенсификации процессов обезвоживания, обеззараживания, очистки и утилизации ОСВ, а также решения проблемы рекультивации земель, занятых иловыми картами.

Поиск оптимальных технологических решений и алгоритмов утилизации осадков, уже размещенных на иловых полях, неизбежно сталкивается с необходимостью учета конкретных показателей, характеризующих их состав и свойства, а также условия размещения, поэтому единого универсального подхода к решению проблемы не существует. Вместе с этим, готовые технологии обезвоживания, очистки и обеззараживания позволяют выбирать и комбинировать различные подходы под конкретные ситуации.

В настоящем обзоре рассматриваются различные этапы и технологические способы обработки ОСВ, осуществляемые в том числе на последних звеньях очистки – иловых площадках.

Сушка и биотермическое обеззараживание ОСВ на иловых площадках

ОСВ представляют собой биологически опасные отходы, содержащие широкий спектр патогенных микроорганизмов, паразитов (яиц гельминтов, цист простейших, вирусов и др.). Обеззараживание ОСВ, как правило, тесно связано с их обезвоживанием.

Для обеззараживания ОСВ могут применяться термический (прогревание, сушка, сжигание), биотермический (компостирование), химический (обработка химическими веществами) и биологический (уничтожение микроорганизмов простейшими, грибами и растениями) методы, а также различные физические воздействия (радиация, токи высокой частоты, ультразвуковые колебания, ультрафиолетовое излучение и т.п.). Практическое применение получили лишь термический, биотермический и химический методы обеззараживания осадков.

На сегодняшний день эффективными технологиями обезвоживания считаются методы, исполь-

зующие шнековые дегидраторы и декантерные центрифуги, а для кондиционирования осадков применяют органические флокулянты.

В процессе коагуляции осадков, последующего их обезвоживания и прогрева до 60°C происходит резкое снижение числа микроорганизмов и практически полная деформация и гибель яиц гельминтов. Обработка при более высоких температурах (пастеризация, термосушка) позволяет уничтожить в осадках не только яйца гельминтов и патогенные микроорганизмы, но и вирусы.

Наиболее распространенным методом термического обеззараживания является пастеризация. На очистных сооружениях водоотведения первичный осадок и избыточный ил нагревают в резервуаре для обеззараживания до температуры 65–100 °C. Время обработки при 65 °C составляет 30 минут, при 70 °C – 25 минут, при 80 °C – 10 минут.

При проведении биотермического процесса в аэробных условиях компостирование осадка осуществляется с наполнителями: твердыми бытовыми отходами, опилками, листвой, корой, сухим осадком сточных вод. При биотермической обработке смеси ОСВ и твердых бытовых отходов последние перед компостированием подвергаются сортировке и дроблению, из них извлекаются черные и цветные металлы. Если компостирование смеси твердых бытовых отходов и осадков производится на мусороперерабатывающих заводах, то в этом случае могут применяться аппараты – ферментаторы, биобарабаны, а также штабелеры с механизацией всех работ, связанных с эксплуатацией штабелей (Яковлев, 1974).

Для обезвреживания и одновременной сушки активного ила могут применяться распылительные сушилки и сушилки-грануляторы, каталитические генераторы тепла с мягким режимом сушки, предотвращающим спекание органических веществ (Туровский, 1988).

Для компостирования механически обезвоженных или подсушенных на иловых площадках ОСВ применяют различные технологии и оборудование: в штабелях на площадках с использованием бульдозеров, экскаваторов, смесителей двухвальных плужкового типа, либо другого оборудования и механизмов; в траншеях с использованием оборудования для перемешивания, гомогенизации и насыщения воздухом; в биобарабанах, ферментаторах и пр. При применении указанных технологий продолжительность процесса компостирования осадков с наполнителями составляет от 2–12 суток (механизированные методы) до 3–6 месяцев (компостирование в штабелях).

Наиболее простой метод – полевое компостирование, которое уже много лет используется в

сельском хозяйстве. В последние годы большой интерес вызывает применяемая в ряде стран технология разведения червей на отходах – вермикомпостирование. Эта технология основана на способности червей заглатывать и в процессе своей жизнедеятельности перерабатывать большое количество органических остатков из отходов.

Известна гибридная технология, сочетающая компостирование и реагентную обработку. Сырой осадок вместе с реагентами (полимерным флокулянт – для повышения эффективности фильтрации, стабилизатором – для подавления процесса гниения органической части, дезинфекантом – для подавления запаха и микрофлоры осадка; специальным реагентом – для связывания солей тяжелых металлов, обеспечивающими связывание их подвижных форм, дезинфекцию, стабилизацию осадков) закачивается в геотубы, где хранится не менее года. Обезвоживание осадка осуществляется за счет «выдавливания» влаги из геотуб. В результате сушки или зимнего вымораживания в течение нескольких лет происходит уменьшение объема осадка до остаточной влажности порядка 60%. В течение длительного времени в них происходят процессы биологического компостирования и химической нейтрализации с большей эффективностью, чем в обычных условиях. Обработка и хранение геотуб позволяет сократить площади складирования и объемы ОСВ. После завершения процесса контейнер разрезается, а обезвоженный материал вывозится для дальнейшего размещения/применения. Из контейнеров могут создаваться искусственные сооружения с поверхностным перекрытием и озеленением склонов.

Достоинством методов биотермического обеззараживания и компостирования является сохранение ценного органического компонента для последующего использования обработанного осадка в качестве удобрения, а также достаточно высокая эффективность, дешевизна и доступность сопровождения (Будыкина, 2012).

В ряде случаев некоторые патогенные организмы демонстрируют способность к выживанию (например, полиовирус и бычий парвовирус) (Trajano et al., 2018), отмечается активное выделение газов, в том числе усиление запаха в процессе сушки (Yin et al., 2018), в определенных температурных диапазонах в процессе нагревания происходит катализ биохимических реакций, не происходящих в нормальных условиях, с образованием метаболитов различных веществ, в некоторых случаях, достаточно токсичных (Wang et al., 2017). Сушка осадка методом геотубирования требует достаточно длительного времени, на практике указываются периоды до 5 лет (Будыкина, 2012).

Реагентные способы обеззараживания

Реагентная обработка ОСВ проводится не столько для разрушения органической части субстрата, сколько в целях обеззараживания, стабилизации и уплотнения осадка, не требующих больших капиталовложений. Самым широко используемым и наиболее дешевым реагентом является негашеная известь СаО. Обработка известью проводится исходя из соотношения 10-30% к общему объему субстрата в зависимости от метода обработки, состава осадка и продолжительности процесса.

При обработке известью одновременно увеличивается щелочность среды ($\text{pH} > 8$), останавливается процесс кислого брожения, являющийся источником неприятного запаха, гибнут практически все патогенные микроорганизмы, в том числе сальмонеллы, яйца гельминтов и даже вирусы. Показано, что повышение рН до 12 с последующим выделением аммиака инактивирует полиовирус и бычий парвовирус в течение 30 минут (Koch, Strauch, 1981).

Кроме того, образование нерастворимых форм соединений при обработке известью способствует коагуляции и уплотнению осадка (кондиционированию), что ускоряет осаждение и улучшает фильтруемость. В сочетании с известью может применяться трехвалентное хлорное железо, что также способствует образованию хлопьев с высокоразвитой поверхностью и более эффективно осажению осадка за счет соосаждения. При этом происходит разрыв сольватных оболочек и изменение форм связи воды, что способствует изменению структуры осадка и улучшению его водоотдающих свойств. В качестве коагулянтов используют также сульфаты железа и алюминия. Для кратковременного обеззараживания жидких осадков можно применять сильные окислители – перекисные соединения и хлор.

Способ обеззараживания ОСВ негашеной известью применяют на очистных сооружениях в Финляндии, Германии, Швеции, США и других странах. Для перемешивания осадка с известью используют шнековые насосы с плунжерными смесителями, лопастные смесители и другое оборудование (Janas, Zawadzka, Cichowicz, 2018).

Для обеззараживания ОСВ используют также химические вещества, которые применяют обычно для удобрения почвы и уничтожения вредных почвенных микроорганизмов или сорняков. К таким веществам относятся аммиак (аммиачная вода), тиазон, карбатион, формальдегид и др.

Применение безводного аммиака более эффективно, так как для обеззараживания ОСВ требуется меньший расход аммиака, что связано с эк-

зотермической реакцией при его растворении. Применение безводного аммиака позволяет получить обеззараженный осадок меньшей влажности. Обеззараживание ОСВ безводным аммиаком достигается при дозе 3% (по аммиаку) массы осадка и экспозиции 10 суток. Опыт использования аммиака с целью уничтожения яиц аскарид в ОСВ из иловых площадок описан в работе (Чефранова, Бухтояров, Ястребов, 1978).

Тиазон оказывает губительное действие не только на яйца гельминтов, но и на патогенные бактерии, в том числе туберкулеза, на яйца и личинки мух. Это обеспечивает получение эпидемиологически безопасного, пригодного для удобрения осадка, внесение которого в почву позволяет дополнительно осуществлять основную функцию тиазона, то есть уничтожать в почве возбудителей инфекций, плесени, фитонематоды и сорняки. Овицидное действие тиазона основано на блокировании дыхательных ферментов зародышей яиц гельминтов продуктами распада, получаемыми в процессе гидролиза тиазона.

Доза тиазона, обеспечивающая дегельминтизацию ОСВ, составляет 0.25-0.30% массы осадка при перемешивании в двухроторном смесителе с зетообразными лопастями или в ленточном растворосмесителе периодичности действия в течение 60 минут с последующей выдержкой под пленкой в течение 7-10 суток в буртах, устраиваемых на площадках с твердым покрытием.

Использование синтетических органических препаратов тиазона или дазомета в соотношении 0.2-2.0% к общей массе при выдержке не менее 3 суток также позволяет эффективно обезвреживать ОСВ способом опрыскивания (дождевания). При температуре 20-25°C тиазон разрушается и выветривается за 15-18 дней, но при пониженной температуре и влажности этот срок увеличивается до 25 дней и более. Поэтому после обработки тиазоном, обладающим неизбирательной фунгицидной, нематоцидной и инсектицидной активностью, осадки должны выдерживаться до 30 суток в буртах, покрытых пленкой, на площадках с твердым покрытием.

Применение извести, аммиачной воды, тиазона, формальдегида и мочевины позволяет использовать двойное их действие – на осадки и почву, что приводит к снижению эксплуатационных затрат на обеззараживание ОСВ и подготовку их к утилизации в качестве удобрения. Остаточное содержание указанных веществ предотвращает реактивацию микроорганизмов и поддерживает стабильность осадков.

Результаты обеззараживания необходимо контролировать в лабораторных условиях при прове-

дении агрохимических исследований на присутствие в осадках жизнеспособных яиц гельминтов, патогенных энтеробактерий, а также на содержание подвижных форм фосфора, калия и тяжелых металлов (свинца, кадмия, хрома, меди, никеля, ртути, цинка) (Прикладная экобиотехнология, 2010).

Для контроля эффективности обеззараживания ОСВ существует целый ряд показателей безопасности, однако не все из них нормируются из-за отсутствия дешевых методов определения, сложности анализа разных групп патогенов и паразитов. Поэтому методы обеззараживания, широко используемые в настоящее время, по мере развития аналитического контроля могут быть пересмотрены. В этой связи также отметим, что в настоящее время в качестве нормируемых показателей используются: содержание яиц гельминтов, мезофильных аэробных и факультативно анаэробных микроорганизмов, количество колиформных, термотолерантных колиформных бактерий, наличие патогенных микроорганизмов (МУК 4.2.1884-04; МУК 4.2.796-99). Основными требованиями биологической безопасности ОСВ являются отсутствие патогенов, яиц гельминтов, при допустимом содержании санитарно-показательных микроорганизмов колиформных и термотолерантных колиформных бактерий на уровне 10^2 – 10^3 кл/г (ГОСТ Р 17.4.3.07-2001; СанПиН 3.2.3215-14).

В последние годы на рынке появляются биотехнологичные реагенты ферментно-микробиологического типа, представляющие собой комбинированные растворы аминокислотных комплексов, часто с соединениями меди, способных дезинфицировать микробную флору и связывать соли тяжелых металлов в нерастворимые соединения, а также бактериальных культур, дрожжевых грибов и ферментов (гидролаз), вызывающих ускорение разложения органических остатков, их гумификацию и минерализацию. Это, например, препараты «Биофокс-Оксидол», «Гумиком», ОМК «Русэкотех» или органо-минеральный комплекс «Амида».

Практическое использование подобных препаратов показывает их высокую эффективность в эксперименте, однако непредсказуемо в конкретных эксплуатационных условиях иловых площадок, что затрудняет их правильное дозирование и прогнозирование получаемого эффекта.

Реагентные способы являют собой эффективные и быстрые способы обеззараживания, при которых происходит более интенсивное и быстрое разложение органического материала осадка, но при этом сопровождающееся выделением большого количества зловонных органических аминов

и сульфидов. Вместе с этим, достигается более скорое компостирование субстрата с прекращением выделения запаховых веществ (перегнивание) и сохранением ценности органических компонент.

Ряд активно используемых реагентов, например тиазон, формальдегид и особенно аммиак являются токсичными веществами, требующими осторожного обращения. Кроме того, аммиак взрывоопасен. Для предотвращения загрязнения почв и грунтовых вод азотом необходимо устанавливать дозу внесения обеззараженного осадка в почву. Доза внесения осадков, обработанных другими веществами, также должна устанавливаться с учетом их действия. К недостаткам этого метода обеззараживания можно отнести также большой расход требуемых реагентов. Для снижения дозы реагентов оптимальный результат достигается при комбинировании применения реагентов с термохимическими или термомеханическими методами обеззараживания.

По мнению участников экспертно-технологического Совета РАВВ (Отчет ..., 2016), использование тиазона проблематично, так как этот препарат, являясь пестицидом, отсутствует в «Каталоге пестицидов и агрохимикатов, разрешенных на территории РФ» Министерством сельского хозяйства РФ, кроме того, промышленное его производство отсутствует.

Анаэробное сбраживание с получением биогаза

Биогаз производится методом анаэробного сбраживания в специальных сооружениях – метантенках. Полученный газ состоит из 55-75% метана и 25-45% углекислого газа, поэтому нуждается в дополнительной очистке перед дальнейшим использованием.

Теплота сгорания 1 м³ биогаза достигает 22 МДж (в топливе – 6.1 кВт·ч), что эквивалентно сгоранию 0.6 л бензина, 0.85 л спирта, 1.75 кг дров или выработке 2 кВт ч электроэнергии. В США, Великобритании, Канаде наряду со множеством небольших установок действуют крупные биогазовые заводы. Правительства некоторых стран предоставляют налоговые льготы для производителей биогаза. Так, в Дании на этих условиях эксплуатируется 18 биогазовых заводов, способных ежегодно перерабатывать 1.2 млн. т биомассы (75% отходов животноводства и 25% других органических отходов). В фермерских хозяйствах ЕС, Канады, Австралии действуют установки производительностью 100-200 м³ биогаза в сутки. В Китае эксплуатируется более 5 млн. семейных биогазовых установок, производящих суммарно около 1.3 млрд. м³ биогаза. В Индии также действует несколько миллионов установок, в последние годы здесь ежегодно вводится 5-6 тысяч неболь-

ших установок по выработке биогаза (Malhotra, Garg, 2019).

Достоинства анаэробного сбраживания заключаются в наиболее полном использовании энергетического потенциала сточных вод, обеспечении экологически замкнутой энергетической системы, получении ценного и востребованного продукта (сжиженный метан). В настоящее время наблюдается всплеск интереса исследователей (особенно в азиатско-тихоокеанском регионе) к усовершенствованию технологии, что предопределяет ее активное использование в будущем (Lu et al., 2019; Mian, Liu, Fu, 2019).

Недостатки процесса аэробного сбраживания известны. Процесс достаточно медленный, поэтому основное применение данный способ нашел в небольших фермерских хозяйствах и на семейных биогазовых установках производительностью не более 50-100 м³/сут., так как более мощная производительная система требует вложения значительных средств в технологический контроль и сопровождение. Режим сбраживания ОСВ с высоким содержанием промышленных стоков проходит неустойчиво.

Сжигание

Сжигание ОСВ применяется, если их утилизация невозможна или экономически нецелесообразна, и осуществляется в специальных печах в кислородной среде. Перед сжиганием необходимо стремиться к максимальному снижению влажности осадков путём их механического обезвоживания. Горению обезвоженных осадков предшествует эндотермический процесс их тепловой подготовки, включающий прогрев материала, испарение влаги и выделение летучих веществ. В качестве топочных устройств для сжигания осадков сточных вод применяют многоподовые печи, печи с кипящим слоем инертного носителя (чаще всего это песок), а также барабанные печи, слоевые и камерные топки.

Печи с кипящим слоем инертного носителя обладают важным достоинством – в них отсутствует контакт горячих газов с движущимися механическими частями. Здесь обеспечивается полная дедорация газов сжигания, но потери тепла значительны. Осадок подаётся в слой инертного материала – обычно песка, поддерживаемого во взвешенном состоянии восходящим потоком воздуха, который инжектируется у дна через распределительную решётку с многочисленными дефлекторами. Глубина инертного слоя в состоянии покоя составляет 0.5-0.8 м. Благодаря перемешиванию инертного материала осадок легче разбивается на мелкие частицы.

Сгорание большей части высушенных очень

мелких частиц и беззольных веществ заканчивается в свободной зоне над псевдоожиженным слоем, где температура достигает 300 °С, т.е. на 100-200 °С выше, чем в слое.

Печи с псевдоожиженным слоем можно легко выключать на ночь; они потребляют очень мало топлива при повторном пуске частично из-за небольшого объёма нагреваемой камеры, частично потому, что масса огнеупорной футеровки и масса песка поддерживают высокую температуру по всей камере в течение длительного времени после остановки печи.

Сжигание осадка дает возможность получить положительный баланс энергии и эффективно использовать теплотворную способность осадка. Основным фактором, побуждающим к использованию сжигания, является тот факт, что количество образующегося на городских очистных сооружениях осадка несоизмеримо велико по сравнению со свободными площадями, на которых осадок может подвергаться утилизации или другой обработке (например, компостированию) (Насыров, Маврин, Шайхиев, 2015). Сжигание позволяет быстро сократить объем осадка до минимума, а зола может быть использована при подготовке техногенных грунтов для планировочных работ, как добавка в бетоны, в кирпич.

В силу того, что процесс сжигания осуществляется на воздухе с активным газоотведением, то происходит выброс в атмосферу значительных количеств продуктов горения, что создает дополнительную нагрузку на окружающую природную среду. В результате сжигания полностью разлагается ценное органическое вещество, что делает остаток непригодным для сельскохозяйственного использования. Попытка России перенести зарубежный опыт сжигания ОСВ на отечественную почву (строительство мусоросжигательных заводов) оказалась неэффективной: объем твердой фазы снизился всего на 20% при одновременном выбросе в атмосферный воздух большого количества газообразных токсичных веществ и продуктов сгорания (Дрозд, 2014). Дымовые газы, полученные при сжигании осадка по традиционным технологиям, подлежат сложной очистке, т.к. в них в больших количествах присутствуют СО, SO_x, NO_x, бензпирены, диоксины, фураны, пары металлов и др.

При использовании печи кипящего слоя из кварцевого песка можно резко снизить вредные выбросы и получать энергию на отопление и выработку электроэнергии, однако такие установки значительно более сложны и громоздки, с большим набором вспомогательного оборудования и требуют квалифицированного сопровождения.

Термокаталитическое окисление

Технология, разработанная в Институте катализа Сибирского отделения РАН (Реховская, Макарова, 2016), основана на печи кипящего слоя, в которой кипящий слой состоит из смеси кварцевого песка и зернистого катализатора.

Присутствие в реакционной системе катализатора позволяет: снизить температуру реакции с 1000-1200°C (при классическом сжигании) до 500-750°C при термокатализе; значительно снизить требования к термохимическим свойствам конструкционных материалов аппаратов (не требуется тяжёлая обмуровка котла) и снизить их эрозийный износ; уменьшить потери тепла через стенки аппаратов; значительно облегчить запуск системы в работу и управление процессом; снизить взрывоопасность устройств; достичь высокой (до 10^8 ккал/м³ час) теплонапряженности объема топочного пространства и, следовательно, значительно снизить габариты, вес и металлоемкость конструкций; ликвидировать или резко снизить выбросы токсичных продуктов в атмосферу. В отходящих газах практически отсутствуют продукты неполного сгорания (оксид углерода, бензпирены, диоксины и фураны), а также оксиды серы.

По сравнению с традиционной печью кипящего слоя с кварцевым песком, при термокаталитическом окислении осадка объем печи уменьшается более чем в 12 раз, вес реактора уменьшается в 15 раз, при влажности осадка 75% выделяется дополнительное тепло. Расход электроэнергии на дутьевое оборудование уменьшается на 30%. Промышленные партии катализаторов производятся в ЗАО «Щелковский катализаторный завод», г. Щелково.

Недостатки этого метода характерны для всех методов сжигания, но в значительно меньших масштабах, а при оснащении установок термокатализа эффективными устройствами для очистки дымовых газов и обеспечении безусловным выполнением нормативов содержания загрязняющих веществ в дымовых газах он сводит загрязнение воздуха к минимуму.

Жидкофазное окисление

Жидкофазное окисление (метод Циммермана) получило распространение за рубежом и наиболее широко применяется в США. Сущность метода состоит в окислении органической части осадка кислородом воздуха при поддержании в аппарате высоких температуры и давления, которое осуществляется без горения (Mian, Liu, Fu, 2019). При жидкофазном окислении в нагретую до 180-300 °C суспензию подается воздух под давлением, при котором вода испаряется не полно-

стью. До начала процесса окислитель (кислород воздуха) находится в газообразном состоянии, а «горючее» (органические загрязнения) в жидком (раствор) или твердом (суспензия) состоянии. Как правило, органические загрязнения таких продуктов как осадки сточных вод легко окисляются. Плохо окисляются вещества, легко отгоняемые с водяным паром и нерастворимые в воде. Поэтому взаимодействие в процессе идет лишь в результате диффузии и растворения кислорода в воде. Повышение давления ускоряет процесс и глубину окисления вследствие увеличения растворимости в воде кислорода. Жидкофазное окисление осуществляется как на катализаторах, так и без них.

Метод жидкофазного окисления имеет ряд преимуществ перед сжиганием, а именно: возможно обезвреживание субстратов с высокой влажностью и жидкостей; продукты окисления остаются в сточной воде, но при этом не содержат вредных веществ; не загрязняется воздух; метод легко контролируется и безопасен для обслуживающего персонала.

К недостаткам можно отнести неполное окисление некоторых органических веществ; значительную стоимость оборудования и очень высокую коррозию в кислых средах.

Технологии с применением низкотемпературной плазмы

Технология предназначена для переработки широкого спектра отходов, в том числе и ОСВ, в низкотемпературной плазме, которая образуется в плазмотроне путем воздействия электрической дуги на воздушный поток при температуре до 5000 °C. Основное устройство системы – плазмотрон, создающий плотную (с давлением порядка атмосферного) низкотемпературную плазму. Холодный газ непрерывным потоком продувают через область, где горит стационарный разряд; газ нагревается, ионизируется, превращается в плазму, которая вытекает из области разряда в виде плазменной струи.

Это экологически высокоэффективная технология, выброс вредных газов значительно ниже других способов сжигания, на выходе получается безопасный стеклованный шлак.

Способ отличает высокий расход и стоимость сопровождающих материалов: электроды (замена каждые 100 часов), металлургический кокс или антрацит, обеспечивающий равномерность температурного поля в зоне газификации реактора, 93-95% кислород, генерируемый кислородной станцией во избежание увеличения концентрации азота в синтез-газе, гидрокарбонат натрия и сорбент для очистки синтез-газа, газ и электроэнергия для поддержания работоспособности оборудования.

Кроме того, технология не имеет примеров практического применения в РФ. Экспериментальная установка по плазмохимической переработке экологически опасных отходов находится в ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша», г. Москва. Эксплуатация установок сопряжена с промышленными рисками, а именно: использование адсорбционной кислородной станции; в синтез-газе содержится свободный водород – вещество взрывоопасное в сочетании с кислородом; высокая температура в донной части реактора (~1600 °C); высокая себестоимость; низкий КПД преобразования электрической энергии в тепловую энергию газового потока; ограничение по времени работы из-за значительной эрозии поверхности анода (100-500 часов в зависимости от материала); потребность в наличии существенных электрических мощностей; технология не предполагает выработки собственной электроэнергии и не обеспечивает резервного энергоснабжения в нештатной ситуации.

Целесообразно использование лишь для переработки высокотоксичных, радиоактивных и других высокоопасных отходов.

Пиролиз

Пиролиз – процесс высокотемпературной (800-1000 °C) обработки осадков сточных вод без доступа воздуха (иногда с регулируемой подачей кислорода), в результате которого из органического вещества осадка образуются твердый углеродный остаток – кокс и горючий газ – синтетический газ. Следует особо отметить, что в настоящее время считаются перспективными комбинированные технологии, объединяющие использование биотермического обеззараживания, анаэробного сбраживания и пиролиза в единый технологический цикл с максимальным выходом полезных компонентов на его этапах, свидетельством чему является огромное число публикаций на эту тему в последние годы (Hernández, Okonta, Freeman, 2017; Jinet et al., 2017; Li et al., 2018; Morgano et al., 2018).

Достоинством технологии пиролизной обработки является достаточно высокая экологичность; процесс бескислородный с высокими температурами, который исключает образование диоксинов, тяжелые металлы в твердом остатке находятся в связанной форме, особенно это касается таких поллютантов как ртуть, кадмий и свинец (Zhang et al., 2018).

Процесс пиролиза имеет ряд преимуществ по сравнению с другими методами (Забелкин, Грачев, Башкиров, 2011). При пиролизе происходит термическая стерилизация и образуются производные продукты (газ, жидкость, твердый углистый остаток), которые могут быть использованы

как топливо или как сырьё для нефтехимического производства, при производстве керамзита, бетона (Забелкин, 2011; Zabelkin, 2016). Кроме того, в процессе пиролиза тяжёлые металлы (например, ртуть и кадмий) могут быть отделены вместе с углистым остатком (Karayildirim et al., 2006; Kim, Parker, 2008). В настоящее время данная технология широко применяется и активно развивается во многих развитых странах (Xiao et al., 2019).

В числе недостатков способа: низкие по сравнению с биогазом показатели по возможным объемам генерации электрической энергии; высокие требования к исходному сырью по влажности; необходима сушка сырья до влажности не более 15%; высокое общее энергопотребление комплекса (пиролиз 25 кВт, сушка 20 кВт). Для функционирования комплекса требуется энергоснабжение от других источников.

Взрывные камеры для утилизации осадков

Практически все системы по термической переработке ОСВ объединяет один недостаток – большое потребление топлива, обеспечивающего необходимые температуры для сжигания осадка. Решить такую проблему может применение взрывной камеры. Во время взрыва температура в замкнутом пространстве достигает 2500-5000 °C, что значительно превышает показатели многопоровых печей и пиролизных установок. Кроме того, давление на один кг взрывчатого вещества достигает 20-50 ГПа. Таким образом, взрывная камера позволяет производить сушку, прессование и сжигание осадка с иловых площадок, используя энергию взрыва в качестве главного источника. Однако следует иметь в виду, что выбор такой системы предусматривает применение взрывчатых веществ термического разложения в сильной ударной волне утилизируемых материалов и учитывать это обстоятельство при размещении и проектировании системы утилизации ОСВ этой технологией.

Процесс утилизации выглядит следующим образом:

- ил направляется в камеру и осуществляется взрыв;
- газовоздушная смесь очищается, накапливается твердый осадок, который перемещается к месту хранения;
- производится отбор избыточного тепла для его последующего применения (например, для обогрева зданий);
- накопленный жидкий остаток перемещается на дальнейшую утилизацию.

Основной проблемой применения взрывных камер является опасность их воздействия на окружающие предметы во время взрыва. Поэтому при

создании таких систем стоит учитывать прочность и термоустойчивость всей конструкции. В остальном же применение взрывных камер отличают такие преимущества как возможность переработки осадка любой влажности, высокая эффективность сжигания и обеззараживания, низкий уровень запыленности отходящих газов.

Депонирование обезвоженного осадка

Депонирование механически обезвоженных осадков разработано в двух вариантах: складирование в специально подготовленный котлован или создание надземных холмов ландшафтного обустройства.

Разработанными методами предусмотрено максимально возможное предотвращение отрицательного влияния складированного осадка на окружающую среду. По периметру котлована в грунте обустраивается ограждающая стена из глиноцементного замка, предотвращающая фильтрацию загрязненных вод в подземные горизонты.

Кроме противofiltrационной стены в целях экологической безопасности дно котлована выстилается ковровым покрытием из бентонитовых глин (бентоматов), которое после поливки водой разбухает, приобретая вязкую консистенцию, создавая водонепроницаемый слой.

На период строительства котлована организуется водопонижение, часть скважин которого сохраняется и после захоронения осадка для осуществления контроля за состоянием подземных вод.

Укладка осадка в котлован производится экскаваторами, располагаемыми по краям котлована. В случае большой ширины котлована по дну прокладываются железобетонные ряжи для прохода экскаватора, которые впоследствии так и остаются в осадке. Осадок поверху засыпается слоем песка, на который накладывается бентоматовый замок. Для окончательной рекультивации бентонитовый слой засыпают защитным слоем песка и растительным слоем земли, в последующем засеваемый травой.

Для предотвращения вторичного выделения газов в теле захороненного осадка устраиваются специальные скважины, оборудованные на оголовках газовыми биофильтрами, или возможно послойное известкование укладываемого осадка.

В качестве альтернативы котлованному депонированию, особенно при высоком расположении грунтовых вод, разработан вариант создания обвалованных насыпных холмов, представляющих озелененные ландшафтные парковые объекты. В этом варианте осадок складировается выше уровня поверхности земли, а основания холмов закладываются выше максимального паводкового уровня

во избежание подтопления участков депонирования в периоды высоких паводков.

Захоронение осадка производится без добавления грунта послойно: 2 м осадка и 1 м песка в качестве перекрытия. Общая высота холмов 12-15 м, поверх последнего песчаного слоя укладывается противofiltrационный слой из глины толщиной 0.5 м и слой грунта, на который высевается трава и высаживается кустарниковая растительность. В результате образуется пологий террасный холм с крутизной откосов 7.5-9°, покрытый растительностью. Предотвращение загрязнения окружающей среды возможными водными или газовыми выбросами в этом варианте предусмотрено теми же способами, что и в первом.

Подобное депонирование ГУП «Институт Мосводоканал НИИ-проект» разработал и частично внедрил при высвобождении от осадка городской территории «Марьинский парк».

Преимущества способа: минимальные затраты; нет дополнительной нагрузки на экологическую ситуацию, в дальнейшем она будет только улучшаться; отсутствует проблема транспортировки и размещения сложного оборудования для утилизации.

При этом процесс подобного депонирования очень длительный, рассчитан минимум на 10-15 лет и в течение этого времени дальнейшая рекультивация и какое-либо иное использование земель размещения таких захоронений невозможна. Необходимо предварительное обезвоживание и даже сушка осадка.

Сброс осадка в накопители

В качестве накопителей используют грунт, подземные пустоты, море и т.п.

При закачке в грунт осадок в жидком состоянии закачивается в пористую подпочвенную зону, отделённую сплошным пластом глины. Прежде чем использовать этот метод, необходимо провести серьёзные геологические изыскания. Буровые скважины должны быть полностью изолированы, чтобы предотвратить загрязнение водоносных слоёв, через которые они проходят. Глубина инъекции принимается от 100 до 4000 м, давление – 7 МПа. Эту технологию рекомендуется использовать для осадков, которые очень трудно обрабатывать. Безопасность её применения не всегда гарантирована.

При закачке в подземные пустоты используются отработанные выработки различных рудников или шахт, пройденные, как правило, в плотных устойчивых породах (глины, гипсы, каменная соль, глинистые сланцы и т.п.), а также специально сооружаемые хранилища. Способы разработки пустот разнообразны. Применяют, например, ме-

тод камуфлетных взрывов в пластичных глинистых породах, выщелачивание или размыв в отложениях каменной соли.

Сброс осадка в море может быть осуществлён выгрузкой его с барж или лихтеров на определенном расстоянии от берега или путём использования длинных и сильно заглубленных подводных труб. Сбросу в море предшествуют длительные и тщательные исследования поверхностных и глубинных течений. Учитывая, что деструкция патогенных микробов и разрушение органических веществ в морской воде протекают медленно, требуются серьёзные бактериологические, биологические и технологические исследования.

Из сбрасываемого в море осадка все плавающие вещества должны быть удалены; осадок должен иметь стабильные физические, химические и биологические свойства. Предварительное смешение осадка с морской водой способствует его погружению. Таким путём г. Лос-Анджелес сбрасывает значительную часть сброженного осадка от обработки сточных вод в Тихий океан; илопровод длиной более 10 км проложен на глубине 70 м по морскому дну.

Из европейских стран до 24% всех образующихся объемов осадков сбрасывает в море Великобритания, при этом активно использует их в сельском хозяйстве (53%), а сжигает лишь 7%. Швейцария также широко использует ОСВ в сельском хозяйстве (до 50%), сжигая до 20% их объема, остальное размещается на свалках. Лидерами по сжиганию осадка являются Австрия и Дания (31 и 36%), отмечается рост этой тенденции в Германии и Швейцарии. При этом в европейских странах в целом предпочтение отдается утилизации осадков на свалках и полигонах ТБО, а также их использованию в сельском хозяйстве в качестве органоминерального удобрения.

Почвенная утилизация ОСВ – один из способов, который позволит решить ряд проблем: предотвратить загрязнение биосферы; ликвидировать угрозу дефицита пресной воды; увеличить производство и применение органических удобрений; превратить очистные сооружения в рентабельные самокупаемые предприятия. Эффективное использование осадков в настоящее время находится в неудовлетворительном состоянии, хотя ОСВ обладают полезными составляющими. Например, 10 млн. т ОСВ по содержанию сухого вещества, основных элементов питания растений и удобрительной ценности равноценны примерно 50 млн. т навоза. Для сохранения почвенного плодородия объемы внесения традиционных видов органических удобрений недостаточны. Их дефицит особенно велик в пригородных хозяйствах. Остро-

дефицитный баланс питательных веществ, в том числе азота и фосфора, приводит к истощению почвенного плодородия и снижению продуктивности выращиваемых культур.

Для безопасности экосистемы особенно важным является совершенствование приемов и методов возврата органического вещества осадков. Однако применение осадков на удобрения сдерживается наличием в них тяжелых металлов (Utilization ..., 1984; Vallier, 1988; Strauss, 1986a,b) и возможным загрязнением почв и продукции, то есть эта проблема имеет разноплановые аспекты и неотделима от экологических последствий и сохранения почв. При неграмотной почвенной утилизации ОСВ могут стать источником загрязнения почв, сельскохозяйственных культур опасными химическими веществами и тяжелыми металлами, поэтому решение проблемы безопасного применения ОСВ в качестве органо-минерального удобрения в разных почвенно-экологических условиях заключается в дифференцированном подходе к оценке доз внесения, влияния на почву, растения, грунтовые воды. В настоящее время эколого-экономический подход к использованию природных ресурсов требует довести утилизацию отдельных видов органических отходов до 95–100%, расширить использование осадков, скопившихся вблизи очистных сооружений.

Если рассматривать утилизацию ОСВ как компонента при производстве дорожного покрытия, то в экологическом плане отходы IV класса опасности размещаются в дорожном полотне, асфальтобетонное покрытие которого также соответствует IV классу опасности. Для производства 1 м³ асфальтобетонной смеси можно утилизировать до 200 кг сухого ОСВ в качестве аналога минерального порошка с получением качественного материала, соответствующего нормативным требованиям к асфальтобетону (Дрозд, 2014).

Так как асфальтобетон состоит из щебня, песка, минерального порошка и битума, а водоканалы являются собственниками первых трех компонентов: щебень – заменяемая загрузка биофильтров; песок и депонированный осадок – отходы песколовок и иловых площадок, то для превращения этих отходов в асфальтобетон нужен только дорожный битум, содержание которого составляет всего 6–7% от объема асфальтобетона (Дрозд, 2014).

Заключение

Универсального и общедоступного способа утилизации осадка городских сточных вод не существует, у каждого способа есть свои достоинства и недостатки, которые необходимо учитывать

при утилизации осадка в конкретных условиях. Вместе с этим, наиболее перспективными способами утилизации (при наличии гарантированного контроля и развитии мер по очистке и обеззараживанию) являются методы, обеспечивающие рекуперацию органического и минерального вещества, освоение малопродуктивных земель, укрепление склонов, оврагов, балок, рекультивацию земель на выработках и карьерах, озеленение свалок, выращивание лесных и полевых культур.

Основной задачей при реализации любого из сценариев рекультивации иловых полей является обезвоживание осадка. Главной проблемой осадков городских сточных вод является их сильная увлажненность, благодаря чему возможно сохранение патогенов и возникновение антисанитарных очагов, а также загрязненность тяжелыми металлами.

Состав осадка даже в пределах иловых полей одних и тех же очистных сооружений может достаточно сильно различаться, как по влажности, так и по концентрации загрязняющих веществ, в связи с чем, применительно к разным участкам, возможно комбинированное и/или поэтапное использование нескольких вариантов утилизации осадка, что в совокупности позволит обеспечить общую рекультивацию всей территории расположения иловых отвалов.

Список литературы

- Будыкина Т.А. Переработка осадков сточных вод. М.: Креативная экономика, 2012. 188 с.
- ГОСТ Р 17.4.3.07-2001. Охрана природы. Почвы. Требования к свойствам осадков сточных вод при использовании их в качестве удобрений.
- Дрозд Г.Я. Новые технологии утилизации осадков – путь к малоотходным канализационным очистным сооружениям // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. 2014. №3. С. 20–29.
- Забелкин С.А. Переработка древесины в жидкое топливо и его энергетическое использование: Дисс. ... канд. техн. наук. Казань, 2011. 232 с.
- Забелкин С.А., Грачев А.Н., Башкиров В.Н. Переработка древесины в жидкое топливо и его энергетическое использование // Вестник Казанского технологического ун-та. 2011. №24. С. 39–42.
- МУК 4.2.1884-04. Методы контроля. Биологические и микробиологические факторы. Санитарно-микробиологический и санитарно-паразитологический анализ воды поверхностных водных объектов.
- МУК 4.2.796-99. Методы санитарно-паразитологических исследований.
- Насыров И.А., Маврин Г.В., Шайхиев И.Г. Проблемы утилизации иловых осадков очистных сооружений // Вестник технологического университета. 2015. Т. 18, №19. С. 257–258.
- Отчет ОС_1-05062016 от 05.06.2016 г «О заседании Секции переработки осадков сточных вод Экспертно-технологического Совета (ЭТС) РАВВ».
- Прикладная экиотехнология. Учебное пособие: в 2 т. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010. Т. 1. 629 с.; Т. 2. 485 с.
- Реховская Е.О., Макарова А.С. Технология термokatалитического окисления осадков сточных вод // Молодой ученый. 2016. №19. С. 210–212.
- Руководство по безопасному использованию сточных вод и экскрементов в сельском хозяйстве и аквакультуре. Женева, 1992. 216 с.
- СанПиН 3.2.3215-14. Профилактика паразитарных болезней на территории Российской Федерации.
- Туровский И.С. Обработка осадка сточных вод. М: Стройиздат, 1988. 146 с.
- Чефранова Ю.А., Бухтояров А.И., Ястребов Е.Е. Опыт применения аммиака с целью уничтожения яиц аскарид в осадке сточных вод с иловых площадок // Гигиена и санитария. 1978. №4. С. 100–102.
- Яковлев С.В. Водоотведение и очистка сточных вод. М.: Стройиздат, 1974. 480 с.
- EPA-822-R-08-018. Targeted national sewage sludge survey: statistical analysis report.
- Hernández A.B., Okonta F., Freeman N. Thermal decomposition of sewage sludge under N₂, CO₂ and air: gas characterization and kinetic analysis // Journal of environmental management. 2017. V. 196. P. 560–568.
- Janas M., Zawadzka A., Cichowicz R. The influence of selected factors on leaching of metals from sewage sludge // Environmental science and pollution research. 2018. V. 25. P. 33240–33248.
- Jin Z., Chang F., Meng F., Wang C., Meng Y., Liu X., Wu J., Zuo J., Wang K. Sustainable pyrolytic sludge-char preparation on improvement of closed-loop sewage sludge treatment: Characterization and combined in-situ application // Chemosphere. 2017. V. 184. P. 1043–1053. doi: 10.1016/j.chemosphere.2017.06.029.
- Karayildirim T., Yanik J., Yuksel M., Bockhorn H. Characterization of products from pyrolysis of waste sludges // Fuel. 2006. V. 85. P. 1498–1508.
- Kim Y., Parker W. A technical and economic evaluation of pyrolysis of sewage sludge for the production of biooil // Bioresources technology. 2008. V. 99. P. 1409–1416.
- Koch K., Strauch D. Removal of polio- and parvovirus in sewage-sludge by lime-treatment (author's transl.) // Zentralblatt für bakteriologie, mikrobiologie, und hygiene. Series B. 1981. V. 174. P. 335–347.
- Li C., Wang X., Zhang G., Li J., Li Z., Yu G., Wang Y. A process combining hydrothermal pretreatment, anaerobic digestion and pyrolysis for sewage sludge dewatering and co-production of biogas and biochar: Pilot-scale verification // Bioresources technology. 2018. V. 254. P. 187–193. DOI: 10.1016/j.biortech.2018.01.045.
- Lu Y., Xu Y., Dong B., Dai X. Effects of free nitrous acid and nitrite on two-phase anaerobic digestion of waste activated sludge: a preliminary study // Science of total environment. 2019. V. 654. P. 1064–1071. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.11.033.
- Malhotra M., Garg A. Performance of non-catalytic thermal hydrolysis and wet oxidation for sewage sludge degradation under moderate operating conditions // Journal of environmental management. 2019. 238. P. 72–83. doi: 10.1016/j.jenvman.2019.02.094.
- Mian M.M., Liu G., Fu B. Conversion of sewage sludge into environmental catalyst and microbial fuel cell electrode material // Science of total environment. 2019. 17. P. 525–539. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.02.200.
- Morgano M.T., Leibold H., Richter F., Stapf D., Seifert H. Screw pyrolysis technology for sewage sludge treatment // Waste management. 2018. V. 73. P. 487–495. doi: 10.1016/j.wasman.2017.05.049
- Research programme on recycling sewage sludge to

agricultural land. Rationale and objectivities – ROAME statement for 2002/03 to 2007/08. UK, 2002.

30. Strauss M. Wastewater and excreta use in India // Dubendorf. International Reference Center of Waste Disposal. 1986a. P. 113–127.

31. Strauss M. Wastewater use in Tunisia // Dubendorf. International Reference Center of Waste Disposal. 1986b. P. 97–112.

32. Tideström H. Swedish regulation on the use of sewage sludge in agriculture: why is it important to use sludge as a fertilizer in agriculture? // Specialty conference on management and fate of toxic organics in sludge applied to land. Copenhagen, 1997.

33. Trajano D.G.S., Dias E., Ebdon J., Taylor H. Assessment of recommended approaches for containment and safe handling of human excreta in emergency settings // PLoS One. 2018. V. 13(7). e0201344. doi: 10.1371/journal.pone.0201344.

34. Utilization of sewage sludge on land: rates of application and long-term effect of metals. D. Reidel publishing company, 1984. 229 p.

35. Vallier R. Utilisation des boues d'épuration en agriculture conséquences sur la chaîne alimentaire // Review Suisse d'Agriculture. 1988. V. 20, № 4. P. 228–239.

36. Wang L.F., Qian C., Jiang J.K., Ye X.D., Yu H.Q. Response of extracellular polymeric substances to thermal treatment in sludge dewatering process // Environmental pollution. 2017. V. 231(Pt 2). P. 1388–1392. doi: 10.1016/j.envpol.2017.08.119.

37. Xiao K., Guan R., Yang J., Li H., Yu Z., Liang S., Yu W., Hu J., Hou H., Liu B. Effects of red mud on emission control of NO_x precursors during sludge pyrolysis: A protein model compound study // Waste management. 2019. V. 85. P. 452–463. doi: 10.1016/j.wasman.2019.01.014

38. Yin Z., Hoffmann M., Jiang S. Sludge disinfection using electrical thermal treatment: the role of ohmic heating // Science of total environment. 2018. V. 615. P. 262–271. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.175.

39. Zabelkin S. Application of the water-insoluble pyrolysis oil fraction as an organic binder // Construction and building materials. 2016. V. 102. P. 59–64. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.164.

40. Zhang Y.F., Zhang S.Y., Mao Q., Li H., Wang C.W., Jiang F.H., Lyu J.F. Volatility and partitioning of Cd and Pb during sewage sludge thermal conversion // Waste management. 2018. V. 75. P. 333–339. doi: 10.1016/j.wasman.2020.02.044.

References

1. Budykina T.A. Pererabotka osadkov stochnyh vod [Sewage sludge treatment]. M.: Kreativnaya ekonomika, 2012. 188 p.

2. GOST R 17.4.3.07-2001. Oхрана природы. Почвы. Требования к свойствам осадков сточных вод при использовании в качестве удобрений [Nature protection. Soils. Requirements for the properties of sewage sludge when used as fertilizer].

3. Drozd G.Ya. Novye tekhnologii utilizatsii osadkov – put' k malootodnym kanalizatsionnym ochestnym sooruzheniyam [New technologies for disposal of sludge – the way to low-waste sewage treatment facilities] // Vodoochestka. Vodopodgotovka. Vodosnabzhenie [Water purification. Water treatment. Water supply]. 2014. № 3. P. 20–29.

4. Zabelkin S.A. Pererabotka drevesiny v zhidkoe toplivo i ego energeticheskoe ispol'zovanie [Processing of wood into liquid fuel and its energy use]: Summary of PhD (Cand. of Technics). Kazan', 2011. 232 p.

5. Zabelkin S.A., Grachev A.N., Bashkirov V.N. Pererabotka drevesiny v zhidkoe toplivo i ego energeticheskoe ispol'zovanie [Wood processing into liquid fuel and its energy

use] // Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo un-ta [Bulletin of Kazan Technological University]. 2011. № 24. P. 39–42.

6. MUK 4.2.1884-04. Metody kontrolya. Biologicheskie i mikrobiologicheskie faktory. Sanitarno-mikrobiologicheskij i sanitarno-parazitologicheskij analiz vody poverhnostnyh vodnyh ob'ektov [Control methods. Biological and microbiological factors. Sanitary-microbiological and sanitary-parasitological analysis of surface water bodies].

7. MUK 4.2.796-99. Metody sanitarno-parazitologicheskikh issledovanij [Methods of sanitary and parasitological research].

8. Nasyrov I.A., Mavrin G.V., Shajiev I.G. Problemy utilizatsii ilovyh osadkov ochestnyh sooruzhenij [Problems of utilization of sludge sediments of treatment facilities] // Vestnik tekhnologicheskogo universiteta [Bulletin of Technological University]. 2015. Vol. 18, № 19. P. 257–258.

9. Otchet OS_1-05062016 ot 05.06.2016 «O zasedanii Sekcii pererabotki osadkov stochnyh vod Ekspertno-tekhnologicheskogo Soveta (ETS) RAVV» [Report OS_1-05062016 dated 06.05.2016 «On the meeting of the Sewage Sludge Processing Section of the Expert and Technological Council (ETC) RAVV»].

10. Prikladnaya ekobiotehnologiya. Uchebnoe posobie [Applied ecobiotechnology. Tutorial]: v 2 t. M.: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2010. Vol. 1. 629 p.; Vol. 2. 485 p.

11. Rekhovskaya E.O., Makarova A.S. Tekhnologiya termokataliticheskogo okisleniya osadkov stochnyh vod [Technology of thermocatalytic oxidation of sewage sludge] // Molodoy uchenyj [Young scientist]. 2016. № 19. P. 210–212.

12. Rukovodstvo po bezopasnomu ispol'zovaniyu stochnyh vod i ekskrementov v sel'skom hozyajstve i akvakulture [Guidance on the safe use of wastewater and excreta in agriculture and aquaculture]. Geneva, 1992. 216 p.

13. SanPiN 3.2.3215-14. Profilaktika parazitarnykh boleznej na territorii Rossijskoj Federatsii [Prevention of parasitic diseases on the territory of the Russian Federation].

14. Turovskij I.S. Obrabotka osadka stochnyh vod [Sewage sludge treatment]. M.: Strojizdat, 1988. 146 p.

15. Chefranova Yu.A., Buhtoyarov A.I., Yastrebov E.E. Opyt primeneniya ammiaka s cel'yu unichtozheniya yaic askarid v osadke stochnyh vod s ilovyh ploshchadok [Experience of using ammonia for the destruction of ascaris eggs in sewage sludge from sludge pads] // Gigiena i sanitariya [Hygiene and sanitation]. 1978. № 4. P. 100–102.

16. Yakovlev S.V. Vodootvedenie i ochestka stochnyh vod [Wastewater and wastewater treatment]. M.: Strojizdat, 1974. 480 p.

17. EPA-822-R-08-018. Targeted national sewage sludge survey: statistical analysis report.

18. Hernández A.B., Okonta F., Freeman N. Thermal decomposition of sewage sludge under N₂, CO₂ and air: gas characterization and kinetic analysis // Journal of environmental management. 2017. Vol. 196. P. 560–568.

19. Janas M., Zawadzka A., Cichowicz R. The influence of selected factors on leaching of metals from sewage sludge // Environmental science and pollution research. 2018. Vol. 25. P. 33240–33248.

20. Jin Z., Chang F., Meng F., Wang C., Meng Y., Liu X., Wu J., Zuo J., Wang K. Sustainable pyrolytic sludge-char preparation on improvement of closed-loop sewage sludge treatment: Characterization and combined in-situ application // Chemosphere. 2017. Vol. 184. P. 1043–1053. doi: 10.1016/j.chemosphere.2017.06.029.

21. Karayildirim T., Yanik J., Yuksel M., Bockhorn H. Characterization of products from pyrolysis of waste sludges // Fuel. 2006. Vol. 85. P. 1498–1508.

22. Kim Y., Parker W. A technical and economic evaluation of pyrolysis of sewage sludge for the production of biooil //

Bioresources technology. 2008. Vol. 99. P. 1409–1416.

23. Koch K., Strauch D. Removal of polio- and parvovirus in sewage-sludge by lime-treatment (author's transl.) // Zentralblatt für bakteriologie, mikrobiologie, und hygiene. Series B. 1981. Vol. 174. P. 335–347.

24. Li C., Wang X., Zhang G., Li J., Li Z., Yu G., Wang Y. A process combining hydrothermal pretreatment, anaerobic digestion and pyrolysis for sewage sludge dewatering and co-production of biogas and biochar: Pilot-scale verification // Bioresources technology. 2018. Vol. 254. P. 187–193. doi: 10.1016/j.biortech.2018.01.045.

25. Lu Y., Xu Y., Dong B., Dai X. Effects of free nitrous acid and nitrite on two-phase anaerobic digestion of waste activated sludge: a preliminary study // Science of total environment. 2019. Vol. 654. P. 1064–1071. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.11.033.

26. Malhotra M., Garg A. Performance of non-catalytic thermal hydrolysis and wet oxidation for sewage sludge degradation under moderate operating conditions // Journal of environmental management. 2019. Vol. 238. P. 72–83. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.02.094.

27. Mian M.M., Liu G., Fu B. Conversion of sewage sludge into environmental catalyst and microbial fuel cell electrode material // Science of total environment. 2019. Vol. 17. P. 525–539. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.02.200.

28. Morgano M.T., Leibold H., Richter F., Stapf D., Seifert H. Screw pyrolysis technology for sewage sludge treatment // Waste management. 2018. Vol. 73. P. 487–495. doi: 10.1016/j.wasman.2017.05.049.

29. Research programme on recycling sewage sludge to agricultural land. Rationale and objectivities – ROAME statement for 2002/03 to 2007/08. UK, 2002.

30. Strauss M. Wastewater and excreta use in India // Dubendorf. International Reference Center of Waste Disposal. 1986a. P. 113–127.

31. Strauss M. Wastewater use in Tunisia // Dubendorf. International Reference Center of Waste Disposal. 1986b. P. 97–112.

32. Tideström H. Swedish regulation on the use of sewage sludge in agriculture: why is it important to use sludge as a fertilizer in agriculture? // Specialty conference on management and fate of toxic organics in sludge applied to land. Copenhagen, 1997.

33. Trajano D.G.S., Dias E., Ebdon J., Taylor H. Assessment

of recommended approaches for containment and safe handling of human excreta in emergency settings // PLoS One. 2018. Vol. 13(7). e0201344. doi: 10.1371/journal.pone.0201344.

34. Utilization of sewage sludge on land: rates of application and long-term effect of metals. D. Reidel publishing company, 1984. 229 p.

35. Vallier R. Utilisation des boues d'épuration en agriculture: conséquences sur la chaîne alimentaire // Review Suisse d'Agriculture. 1988. Vol. 20, № 4. P. 228–239.

36. Wang L.F., Qian C., Jiang J.K., Ye X.D., Yu H.Q. Response of extracellular polymeric substances to thermal treatment in sludge dewatering process // Environmental pollution. 2017. Vol. 231(Pt 2). P. 1388–1392. doi: 10.1016/j.envpol.2017.08.119.

37. Xiao K., Guan R., Yang J., Li H., Yu Z., Liang S., Yu W., Hu J., Hou H., Liu B. Effects of red mud on emission control of NOx precursors during sludge pyrolysis: A protein model compound study // Waste management. 2019. V. 85. P. 452–463. doi: 10.1016/j.wasman.2019.01.014.

38. Yin Z., Hoffmann M., Jiang S. Sludge disinfection using electrical thermal treatment: the role of ohmic heating // Science of total environment. 2018. Vol. 615. P. 262–271. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.175.

39. Zabelkin S. Application of the water-insoluble pyrolysis oil fraction as an organic binder // Construction and building materials. 2016. Vol. 102. P. 59–64. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.164.

40. Zhang Y.F., Zhang S.Y., Mao Q., Li H., Wang C.W., Jiang F.H., Lyu J.F. Volatility and partitioning of Cd and Pb during sewage sludge thermal conversion // Waste management. 2018. Vol. 75. P. 333–339. doi: 10.1016/j.wasman.2020.02.044.

Valiev V.S., Ivanov D.V., Shagidullin R.R. **Methods for urban wastewater sludge disposal (review).**

The review examines technologies for the treatment and utilization of sewage sludge generated at biological treatment facilities in cities and towns. Their advantages and disadvantages are analyzed, the experience of their practical application in various countries of the world is summarized.

Keywords: sewage sludge; recycling; disinfection; dehydration; sewage sludge fields.

Информация об авторах

Валиев Всеволод Сергеевич, старший научный сотрудник, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, 420087, Россия, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: podrost@mail.ru.

Иванов Дмитрий Владимирович, кандидат биологических наук, зам. директора по научной работе, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, 420087, Россия, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: water-rf@mail.ru.

Шагидуллин Рифгат Роальдович, доктор химических наук, член-корреспондент АН РТ, директор, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, 420087, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: shagidullin_@mail.ru.

Information about the authors

Vsevolod S. Valiev, Senior Researcher, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Daurskaya st., Kazan, Russia, 420087, E-mail: podrost@mail.ru.

Dmitrii V. Ivanov, Ph.D. in Biology, Deputy Director, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Daurskaya st., Kazan, Russia, 420087, E-mail: water-rf@mail.ru.

Rifgat R. Shagidullin, D.Sc. in Chemistry, Corresponding Member of Tatarstan Academy of Sciences, Director, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Daurskaya st., Kazan, 420087, Russia, E-mail: shagidullin_@mail.ru.