

The paper describes the principal provisions of the method of optimizing the ratio of land in different types of agricultural landscapes of non-Chernozem zone of Russia. Structural criteria for assessing the degree of degradation of the natural environment of agricultural systems are described.

УДК 628.381

Белов С. Г., Дмухайло Е. И., Новосельцева А. Г.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ АЭРОБНОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ ОСАДКОВ СТОЧНЫХ ВОД С ИХ ПОЛЕДУЮЩЕЙ УТИЛИЗАЦИЕЙ

Введение. В области очистки сточных вод наиболее значительное место, как по стоимостным, так и объемным показателям занимает переработка и ликвидация осадков сточных вод (ОСВ), с целью обеспечения определенной степени их концентрирования, стабилизации, окончательного уплотнения и обеззараживания. После этого осадки могут быть дополнительно обезвожены и депонированы или перерабатываться методом вермикомпостирования в смеси с другими органическими и твердыми отходами с целью получения биогаза и биомассы дождевых червей, при условии исключения токсичности и других санитарно-технических рисков.

Значительный объем жидких ОСВ накапливается на первичной стадии отстаивания, а остальные обусловлены приростом биомассы за счет биологического окисления углеродосодержащих компонентов сточных вод.

Необходимо учитывать, что в действительности не существует никакого обобщенного «сырого осадка», а имеется целый ряд осадков в виде различных суспензий с содержанием твердых компонентов от 0,5 до 10%, обусловленными их различными характеристиками и степенью обработки.

Стабилизация осадков достигается путем разложения органической его части до простых соединений в аэробных или анаэробных условиях. Эффект стабилизации ОСВ может быть получен различными методами – биологическим, химическим, физическим, а также их сочетанием. Основными расчетными параметрами процесса являются продолжительность стабилизации и расход воздуха. Наибольшее распространение получили методы биологической анаэробной и аэробной стабилизации. При небольших количествах осадков применяются септики, двухъярусные отстойники и осветлители-перегнватели, в которых процесс разложения органики происходит экстенсивно под влиянием внешних условий. Интенсивный процесс минерализации требует специальных условий, обеспечивающих их общее масштабирование и оптимизацию работы всех его стадий. Для его осуществления применяют аэробные стабилизаторы (минерализаторы) и метантенки. Так как в результате аэробного окисления выде-

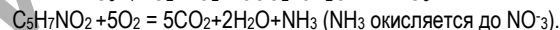
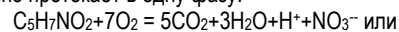
ляется больше энергии, чем при анаэробном сбраживании, аэробный процесс является более скоростным, чем анаэробный [1]. Сравнительная характеристика этих процессов приведена в таблице 1.

Описание процесса. Процесс аэробной стабилизации (АС) осадков заключается в окислении органической части осадка микроорганизмами в присутствии растворенного кислорода воздуха при аэрации в течение нескольких суток в специальных резервуарах. Целью АС является предотвращение загнивания осадка, сопровождающего неприятными зловонными выбросами при одновременном сокращении числа патогенных микроорганизмов.

Обычно для АС используют прямоугольные или круглые резервуары, оборудованные по типу аэротенков различными аэраторами (пнеumo, механическими, гидромеханическими, струйными). АС обычно работает в непрерывном режиме, в периодическом режиме – на сооружениях небольшой производительности.

Процесс АС осадка подобен очистке сточных вод в аэротенках активным илом, который интенсивно растет, наращивая биомассу, за счет имеющего питательного субстрата, а затем самоокисляется, образуя один вид осадка.

АС обычно протекает в одну фазу:



Однако NH₃ может соединяться с CO₂, образуя бикарбонат аммония, при этом щелочность повышается. Первая реакция связана с образованием нитратов и увеличением кислотности, снижение pH может сопровождаться ингибированием нитрифицирующих бактерий.

Обычно АС применяется для обработки избыточного активного ила, так как для стабилизации осадка первичных отстойников требуется большая продолжительность и большее количество кислорода, чем для активного ила.

Продолжительность стабилизации смеси активного ила с осадком первичных отстойников зависит от количества питательного субстрата и степени его распада. Процесс продолжается до истощения субстрата. Отстаивание и уплотнение аэробносброженных

Таблица 1

Наименование	Аэробные стабилизаторы	Метантенки
Продукты распада	CO ₂ , H ₂ O, NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺ , H ₂ O, CH ₄ , CO ₂
Энергия, доступная бактериям (на 1 моль глюкозы, Дж.)	2721	146
Скорость распада	выше	ниже
Уменьшение беззольного вещества	меньше	больше
БПК ₅ иловой воды, мг/л	50-500	500-3000
Отношение беззольного вещества к сухому веществу	выше	ниже
Запах	отсутствует	отсутствует
Фильтруемость	ниже	выше

Белов Сергей Григорьевич, к. т. н., доцент, заведующий кафедрой водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов Брестского государственного технического университета.

Дмухайло Е. И., инженер кафедры водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов Брестского государственного технического университета.

Новосельцева Анна Геннадьевна, ассистент кафедры водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

осадков происходит в специально выделенной зоне отстаивания или в отстойниках (не более 5 часов). Иловая вода направляется в аэротенки, ее БПК принимается около 100 мг/л, ХПК 360-670 мг/л. Влажность уплотненного осадка – 96,5–98,5%. Процесс АС осадка осуществляется в сооружениях открытого типа.

В последнее время разработано и применяется аэробное сбраживание в закрытых резервуарах, в мезо- и термофильных режимах [1, 2, 3].

Основные технологические параметры. Потребление кислорода при АС зависит от количества и характеристики обрабатываемых осадков, температуры процесса, интенсивности перемешивания, продолжительности процесса и способа обработки. Для АС смеси активного ила и сырого осадка первичных отстойников расход кислорода примерно в 9 раз выше, чем для стабилизации лишь одного активного ила. Значительно больше кислорода требуется в начальной стадии процесса стабилизации.

Расход кислорода для полной нитрификации составляет около 2 кгO₂/кг органического вещества осадка. Соответственно расход воздуха составляет 1–2 м³/ч и более на 1 м³ стабилизируемого осадка в зависимости от его концентрации. Скорость потребления кислорода при АС зависит от возраста активного ила и температуры, чем меньше возраст ила, тем выше скорость потребления кислорода. Снижение температуры с 20°C до 10°C требует увеличения расхода воздуха почти в 2 раза.

Удельный расход кислорода для аэрации (кгO₂/кг органического вещества) определяется по формуле:

$$q = (0,94 + 0,016t) / (1 + 0,108t),$$

где t – возраст ила, сут.

Расход воздуха для аэрации определяется аналогично, как для аэротенков:

$$D = 1000 q S_0 / K_1 K_2 K_m (C_p - C),$$

где S_0 – концентрация беззольного вещества, поступающего на стабилизацию ила, кг/м³;

C – концентрация кислорода в стабилизаторе, 1–2 мг/л.

Значение остальных коэффициентов определяется как для аэротенков [2].

При стабилизации смеси осадка из первичных отстойников и активного ила параметр q рассчитывается по формуле:

$$q_{см} = q(1 + 0,4B),$$

где B – отношение беззольного вещества осадка к количеству беззольного вещества смеси.

Опыт эксплуатации сооружений по АС осадков показывает, что распад беззольного вещества зависит от продолжительности аэрации, и в основном завершается в неуплотненном иле за 7–10 суток, а в смеси осадка и уплотненного активного ила – за 10–15 суток (при температуре 20°C).

Степень распада можно увеличить путем повышения температуры процесса стабилизации и введения в стабилизаторы биогенных добавок. Процесс АС приводит к сокращению численности патогенной микрофлоры. В зависимости от продолжительности аэрации и режима работы стабилизаторов, снижение числа кишечных палочек составляет 70–99%, наблюдается также инaktivация вирусов.

Для стабилизации активного ила в реакторе-вытеснителе требуется время:

$$t_{выт} = [(8-10) + 0,02(20 - T_a)(t+5)] 1,08^{20-T_c},$$

где T_a , T_c – расчетная температура в аэротенке и стабилизаторе (принимается равной 8–35°C);

t – возраст ила, сут.

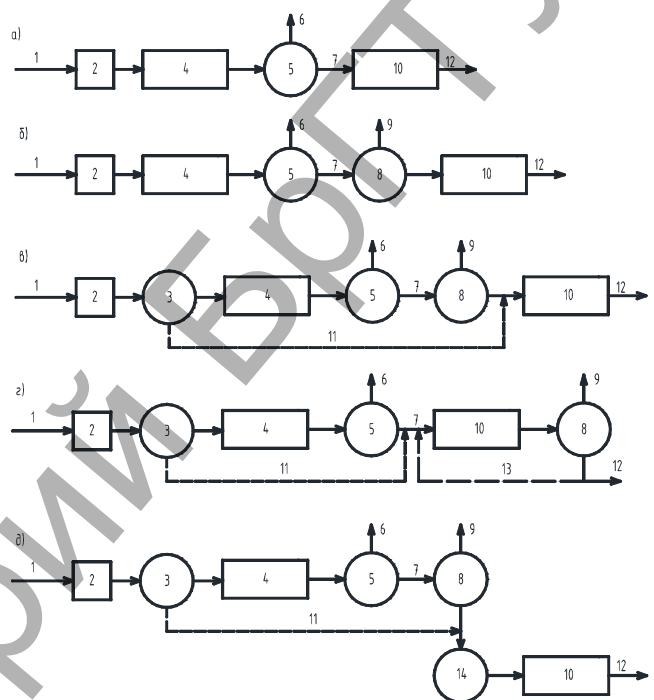
При стабилизации смеси осадка из первичных отстойников (сырого осадка) и активного ила параметр $t_{см}$ определяют по формуле:

$$t_{см} = t_{выт} + 2B.$$

Для сокращения содержания в стабилизированном осадке патогенных микроорганизмов и вирусов целесообразно увеличить продолжительность стабилизации. В этом случае вместо термина аэробная стабилизация применяется термин «аэробное сбраживание». При этом продолжительность процесса должна составлять

60 сут. при температуре 15°C или 20 сут при температуре 20°C. Увеличение температуры до 25°C сокращает продолжительность аэробного сбраживания до 16 сут. После аэробного сбраживания уплотненные осадки (с концентрацией по сухому веществу 40–50 кг/м³) могут использоваться как удобрения либо смешиваться с пищевыми отходами, соломой, опавшими листьями, низовым торфом для вермикомпостирования в присутствии земляных червей рода *Esenia foetida*. Это приводит к получению биогаза и биомассы червей, имеющих высокую коммерческую ценность и востребованность в сельском хозяйстве, рыболовстве, производстве кормов [4, 5, 6].

Технологические схемы стабилизации. Процесс непрерывной АС может осуществляться по нескольким схемам [2]:



1 – подача сточной воды; 2 – решетка и песколовка; 3 – первичный отстойник; 4 – аэротенк; 5 – вторичный отстойник; 6 – очищенные сточные воды; 7 – избыточный активный ил; 8 – уплотнитель; 9 – иловая вода; 10 – стабилизатор; 11 – осадок из первичного отстойника; 12 – стабилизированный осадок; 13 – циркуляция уплотненного осадка; 14 – метантенк

Рисунок 1 – Схемы аэробной стабилизации осадка

Наиболее простой является схема, применяемая на очистных сооружениях при отсутствии первичных отстойников. При этом избыточный активный ил поступает в аэробный стабилизатор непосредственно из вторичных отстойников или после илоуплотнителей (схемы а и б). При наличии первичных отстойников обычно проводят совместную стабилизацию осадка из первичных отстойников с уплотненным активным илом (схема в).

По схеме г в стабилизатор подают осадок из первичных отстойников и неуплотненный активный ил, далее стабилизированный осадок поступает в илоуплотнитель, а после уплотнения основная масса осадка подается в стабилизатор (рециркуляция), а меньшая часть направляется на дальнейшую обработку. По этой схеме осадок промывается большим количеством воды, что улучшает его водоотдачу.

Перспективной является схема анаэробно-аэробной обработки смеси осадка и активного ила (схема д). Мезофильное сбраживание в течение 6 суток в метантенке с последующей аэробной стабилизацией в течение 3–4 суток позволяет получить биогаз и значительно улучшить водоотдающие свойства осадка при одновременном его обеззараживании.

Контроль процесса стабилизации следует проводить по скорости потребления кислорода и ферментативной (дегидрогеназной) актив-

ности ила, которые достигают порогового значения, после чего изменяются незначительно.

АС осадков обеспечивает получение биостабильных продуктов, имеющих хорошие показатели влагоотдачи, сравнительно проста в эксплуатации и имеет невысокую строительную стоимость сооружений. Однако высокие энергетические затраты на аэрацию ограничивают применение этого процесса на очистных сооружениях производительностью более 50–100 тыс. м³/сут.

АС осадков можно проводить как в непрерывном, так и периодическом режиме. В последнем случае осадок в стабилизатор подается до его полного заполнения с одновременным аэрированием для предотвращения оседания. Перед подачей в стабилизатор рекомендуется осадок из первичных отстойников и избыточный активный ил после вторичных отстойников уплотнять в гравитационных и флотационных уплотнителях. Уплотнять его можно также после стабилизации непосредственно в стабилизаторе перед опорожнением. Аэробной стабилизации можно подвергать неуплотненный и уплотненный избыточный активный ил и его смесь с осадком первичных отстойников. При стабилизации только активного ила процесс можно рассматривать как завершающую стадию очистки сточных вод, когда при дефиците питания происходит самоокисление клеточного вещества микроорганизмов. В этом случае чем больше возраст ила, тем короче время стабилизации. При стабилизации смеси ила с осадком выделяются ферменты, катализирующие окисление экзогенных субстратов осадка. Степень распада беззольного вещества и длительность процесса зависят от соотношения количества сырого осадка и активного ила, концентрации органических веществ, интенсивности аэрации, температуры и других факторов.

Кривые на рис. 2 и 3 показывают характер распада беззольного вещества смеси осадка из первичных отстойников и избыточного активного ила, первоначально содержащей 65% беззольного вещества, в процессах мезофильной и термофильной стабилизации [1, 7].

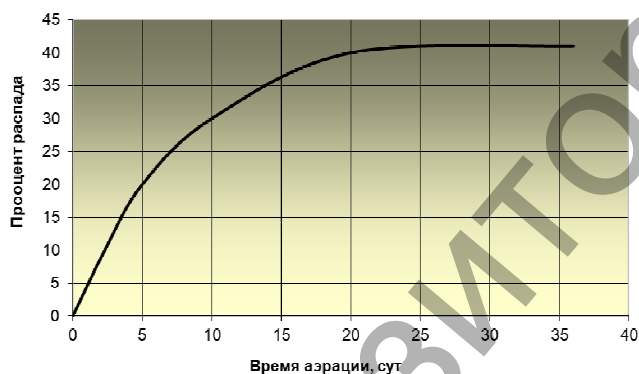


Рисунок 2 – Процент распада беззольного вещества при температуре 15 °C

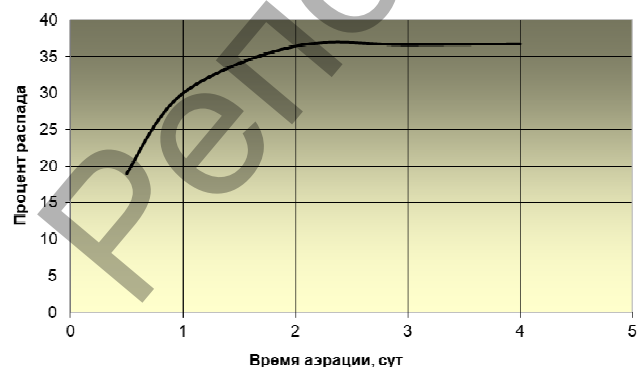


Рисунок 3 – Процент распада беззольного вещества при температуре более 50 °C

В ряде стран [3, 4] признано перспективным, как альтернативное решение метановому сбраживанию, технология аэробной термофиль-

ной стабилизации (АТС), так называемое жидкое компостирование, позволяющее достичь высокой степени минерализации и обеззараживания осадка. АТС является скоростным процессом, в котором благодаря саморазогреванию осадка происходит значительный подъем температуры за счет освобождения свободной энергии при превращении органических веществ в новые клеточные структуры.

АТС может применяться при наличии в осадках >2,5% органических веществ и использовании теплоизолированных биореакторов, оборудованных высокопроизводительными системами пневмомеханической или струйной аэрации.

Основные преимущества технологии АТС следующие:

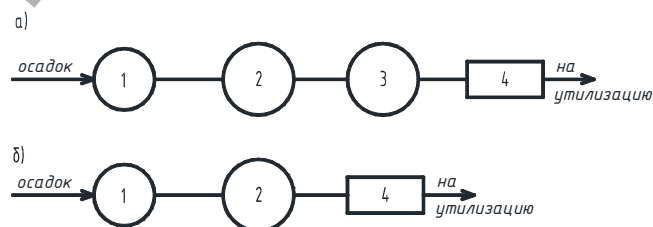
1. Значительное сокращение требуемых объемов сооружений за счет высокой скорости распада органических веществ (время процесса 0,5–3,0 сут.).
2. Высокая степень обезвреживания патогенных микроорганизмов и яиц гельминтов при $T > 50^{\circ}\text{C}$ за счет пастеризации осадка.
3. Уменьшение потребности в кислороде на 30–40% по сравнению с мезофильным процессом, поскольку в условиях термофильных температур гибнут бактерии-нитрификаторы.
4. Увеличение скорости переноса кислорода в связи со значительным повышением коэффициентов его диффузии.
5. Улучшение смешения жидкой и твердой фаз в процессах дальнейшей комплексной переработки вследствие уменьшения вязкости.

Метод АТС осадков исследования на Бортнической станции аэрации г. Киева в НИКТИ ГХ в течение 1988–1992 гг. Результаты исследований различных типов осадков приведены в таблице 2.

В результате исследований установлено, что АТС является высокоэффективным приемом стабилизации и дегельминтизации различных типов осадков, образующихся на станциях очистки городских сточных вод, и может быть рекомендована для обработки высококонцентрированных жидких органических отходов, образующихся в различных отраслях народного хозяйства.

Анализ результатов исследований показал, что степень биодеструкции органических компонентов осадка составляет 40–60%, целесообразная продолжительность обработки 1–3 сут.

Принципиальные схемы комплексной двухступенчатой обработки осадков с АТС показаны на рис. 4.



- а) двухступенчатая обработка; б) одноступенчатая обработка; 1 – сгуститель; 2 – аэробный термофильный реактор; 3 – метантек; 4 – крытая иловая площадка

Рисунок 4 – Схемы обработки осадка с аэробной термофильной стабилизацией

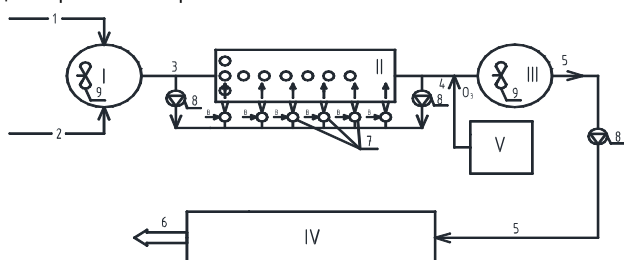
В [3] отмечаются следующие условия возникновения саморазогрева осадков при аэробной стабилизации:

1. В осадке должно быть значительное количество сбраживаемой органики, достаточной для выделения 105–126 кДж/л тепловой энергии.
2. Эффективность переноса кислорода должна превышать 10% (т. е. в биохимических реакциях должно потребляться больше 10% подаваемого кислорода).
3. Биореактор должен быть хорошо теплоизолирован.
4. Производство температуры и времени пребывания должно превышать 150 град. x сут.
5. Для процесса сбраживания может использоваться как воздух, так и кислород. Потребляемая энергия на аэрацию составляет 0,7–4,4 кВт·ч/кг окисленной органики.

Таблица 2

Проба	Продолжительность процесса - АТС, сут.	Влажность, %	Зольность, %	ХПК, гО ₂ /л	Степень биодеструкции по ХПК, %	pH
Уплотненный активный ил	-	97,9	27,6	31,8	-	7,8
То же, после стабилизации	2	98,6	29,3	19,8	38	9
Сырой осадок	-	95	26,4	49,6	-	7,4
То же, после стабилизации	2	96,8	29,9	20,4	59	8,9
Смесь сырого осадка с уплотненным активным илом	-	97,2	27,3	35,6	-	7,5
То же, после стабилизации	2	98,1	29,1	17,8	50	9
Активный ил вторичных отстойников	-	99	27,5	6,8	-	7,6
То же, после стабилизации	2	99,2	29,2	3,9	43	8,9

Кафедрой ВВиОВР БрГТУ предлагается усовершенствованная технологическая схема АТС (рис. 5), позволяющая сократить продолжительность процесса обработки осадков, снизить расход воздуха на аэрацию, повысить степень обеззараживания осадка, осуществить дальнейшую его утилизацию посредством переработки методом вермикомпостирования.



I – смеситель, II – аэробный термофильный стабилизатор, III – контактный резервуар, IV – крытая площадка для вермикомпостирования осадка, V – озонаторная установка, 1 – осадок из первичных отстойников после гравитационного уплотнения, 2 – активный ил из вторичных отстойников после флотационного уплотнения, 3 – смесь осадка и активного ила, 4 – смесь осадка и активного ила после аэробной термофильной стабилизации, 5 – озонированный осадок, 6 – вермикомпостированный осадок (биогурус), 7 – струйный аэратор (эжектор), 8 – насосы, 9 – мешалки, В – воздух

Рисунок 5 – Усовершенствованная технологическая схема аэробной термофильной стабилизации

Основной технологический процесс АТС осадка осуществляется в емкостных сооружениях закрытого типа для исключения теплопотерь, оснащенных системой струйной аэрации [8, 9].

Эжекционные струйные течения, применяемые в этой системе, позволяют интенсифицировать процессы массопередачи кислорода и перешивания. Это дает возможность увеличить удельную производительность сооружений АТС, уменьшить их габариты, материалоемкость и стоимость, сократить потребление энергии и, как следствие, улучшить экосистему.

Технология АТС в различных модификациях может быть реализована в цилиндрических сборно-монолитных ж/б емкостях объемом 50–1000 м³, разработанных БрГТУ и успешно применяемых в качестве резервуаров для воды и канализационных насосных станций.

Представляется перспективным применение цилиндрических полимерных емкостей, устанавливаемых горизонтально и оснащенных выносной системой струйной аэрации, присоединенной тангенциально к стенке резервуара. Полимерное исполнение обеспечивает

высокие антикоррозионные свойства и могут использоваться при переработке стоков и иных жидких отходов.

Другим способом интенсификации переработки является вермикомпостирование. Внесение в осадок культуры земляных червей, которыми биомасса, содержащаяся в осадке, используется в качестве питания, практикуется в Польше, Швейцарии, Японии [4].

Результаты исследований вермикомпостирования с осадками городских сточных вод, проведенных в 2018 г. ГНПО НПЦ НАН Беларуси по биоресурсам, свидетельствуют от перспективности этого направления [4, 5].

Заключение. Применение АТС, оснащенных системой струйной аэрации с последующим озонированием осадков сточных вод позволит значительно интенсифицировать процессы биодеструкции органических загрязнений и добиться получения стабильного продукта и в конечном итоге после вермикомпостирования – высокоэффективного органического удобрения – биогуруса.

Принципиальным достоинством технологии является простота конструктивных решений, высокая надежность, устойчивость работы сооружений, возможность управления технологическим процессом обработки осадка.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. «Дегремон». Технические записки по проблемам воды: в 2 т. / Под редакцией Т. А. Карюхиной, И. Н. Чурбановой. – М. : Стройиздат, 1983. – Т. 1 – 607 с.
2. Яковлев, С. В. Водоотведение и очистка сточных вод: учебник для вузов / С. В. Яковлев, Ю. В. Воронов. – М. : АСВ, 2002. – 704 с.
3. Гинака, А. И. Экологическая биотехнология / А. И. Гинака. – Ленинград : Химия, 1990. – 384 с.
4. Реконструкция и интенсификация работы канализационных очистных сооружений / Ю. В. Воронов [и др.]. – М. : Стройиздат, 1990. – 224 с.
5. Неклюдов, А. Д. Вермикомпостирование органических отходов / А. Д. Неклюдов, А. Н. Иванкин // Экологические системы и приборы. – 2005. – № 6. – С. 2–10.
6. Максимова, С. В. Технология переработки и утилизации отходов биогазовых установок при помощи биообъектов / С. В. Максимова // Экология на предприятии. – 2018. – № 4. – С. 91–96.
7. Яременко, Л. В. Обработка высококонцентрированных жидких органических отходов / Л. В. Яременко, А. В. Ершов // Водоснабжение и санитарная техника. – 1984. – № 8. – С. 22–23.
8. Попкович, Г. С. Системы аэрации сточных вод / Г. С. Попкович, Б. Н. Репин. – М. : Стройиздат, 1986. – 133 с.
9. Струйный аэратор; а. с. SU 1488262 / Е. И. Дмухайло, Н. В. Васин, С. Е. Березин. – Оpubл. 08.07.1987.

Материал поступил в редакцию 11.03.2019

BELOV S. G., DMUKHAYLO E. I., NOVOSELTSEVA A. G. Perfection of aerobic technology stabilization of drainage of sewage water from their next recycling

The article deals with the problems of treatment of sewage sludge, namely, methods of stabilization. It has been shown that aerobic stabilization is a faster process compared with anaerobic digestion; therefore, its implementation requires more compact structures. At the same time, the main attention is paid to the process of aerobic thermophilic stabilization, which allows not only to stabilize the sediment, but also to significantly disinfect it. In conclusion, an improved technological scheme of aerobic thermophilic stabilization of sewage sludge is proposed, which makes it possible to reduce the duration of the sludge treatment process, reduce air consumption for aeration, increase the degree of sludge disinfection, and further utilize it by means of vermicomposting processing.