

Водоснабжение, строительные системы охраны водных ресурсов

Научная статья
УДК 628.336.412
DOI: <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2023-3/90-104>

М.Н. Шевцов, Д.В. Мишкин, О.В. Костюк

ШЕВЦОВ МИХАИЛ НИКОЛАЕВИЧ – д.т.н., профессор, заслуженный эколог России, исполняющий обязанности заведующего кафедрой, 000458@pnu.edu.ru
МИШКИН ДЕНИС ВЛАДИМИРОВИЧ – преподаватель кафедры инженерных систем и техносферной безопасности, аспирант, 944664@mail.ru✉
КОСТЮК ОЛЬГА ВЛАДИМИРОВНА – м.н.с., Хабаровский научно-исследовательский институт эпидемиологии и микробиологии Роспотребнадзора, kostyuk.anna2004@mail.ru.
Кафедра инженерных систем и техносферной безопасности
Тихоокеанский государственный университет
Хабаровск, Россия

Конструктивно-технологические методы организации процесса энергоэффективной стабилизации осадков сточных вод

Аннотация. Рассмотрены конструктивно-технологические методы организации процесса энергоэффективной стабилизации осадков сточных вод. В качестве одного из наиболее перспективных методов обработки и утилизации осадков предложено интенсивное анаэробное сбраживание с организацией процесса в соответствии с кинетикой процессов брожения и последующим использованием сброженной массы как органического удобрения. В условиях массового строительства предприятий по очистке городских и производственных сточных вод наиболее сложной проблемой является обработка осадков. Большие объемы, бактериальная зараженность, наличие органических веществ, способных быстро гнить с выделением неприятных запахов, а также неоднородность состава и свойств осадков осложняют их обработку. Целью исследования является выбор наиболее эффективных методов и оборудования для переработки осадков сточных вод. Научная новизна заключается в предложенной авторами организации процесса энергоэффективной стабилизации осадков сточных вод при помощи инновационного самопромывного дискового фильтра.

Ключевые слова: конструктивно-технологические методы, энергоэффективная стабилизация осадков, биогаз, осадок сточных вод, метантенк, усовершенствование технологических процессов

Для цитирования: Шевцов М.Н., Мишкин Д.В., Костюк О.В. Конструктивно-технологические методы организации процесса энергоэффективной стабилизации осадков сточных вод // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2023. № 3(56). С. 90–104.

Введение

Осадки сточных вод – сложная многокомпонентная система, состоящая из органической и минеральной частей. В осадках городских сточных вод содержится большое количество микроорганизмов, в том числе патогенных, токсичных соединений, особенно ионов тяжелых металлов в концентрациях, значительно превышающих ПДК металлов в почве. Объем влажных осадков, образующихся на канализационных очистных сооружениях, составляет 0,5–1,0% объема сточной воды в зависимости от технологической схемы очистки. Качество осадков сточных вод в основном зависит от нормы водоотведения, развития и характера промышленности, эффективности работы локальных очистных сооружений предприятий, состава городских очистных сооружений. Количество осадков постоянно растет, и на сегодня они являются основным загрязнителем окружающей среды. При выборе оборудования и технологий для

очистки сточных вод существенную роль играют их состав, количество, стоимость оборудования и реагентов, экологическая безопасность.

После механической и биологической очистки образуются осадки различного вида: отходы, задерживаемые решетками (незначительное количество), сырой осадок первичных отстойников и активный ил или биопленка, образующаяся в сооружениях аэробной биологической очистки и удаляющаяся из вторичных отстойников.

Общий объем осадков составляет около 1% от объема очищаемых сточных вод. Они содержат 60–90% органических соединений и соответственно 10–40% зольной части. Основными компонентами органической части осадков являются белки, углеводы и липиды (жиры), составляющие 80–85% беззольной части осадков. Остальные 15–20% – это лигнинно-гумусовые соединения [8].

Наиболее распространенные методы утилизации осадков:

- сжигание;
- высушивание и использование в качестве строительного материала;
- захоронение;
- использование в качестве техногенного грунта в строительстве;
- использование в качестве пищевой добавки для животных (активный ил);
- использование в качестве удобрения на сельскохозяйственных полях.

Наибольшее распространение получает утилизация осадков *методом сжигания*. Осадки сжигают преимущественно в многоподовых или барабанных печах и в печах с кипящим слоем. Во время сжигания в осадке происходит окисление органических веществ и образуется зола, которую можно использовать в различных целях, например в качестве присадки к новым порциям осадков перед их обезвоживанием, что позволяет снижать расход других реагентов. Метод сжигания имеет ряд недостатков, в частности экономического характера, так как существенно зависит от содержания и состава беззольного вещества и влажности осадка. Процессу непосредственного сжигания предшествует процесс высушивания – испарение влаги из загруженного в печь осадка. То есть теплоты, выделяемой во время сгорания влажных осадков, может быть недостаточно для испарения влаги.

Осадки могут содержать соли тяжелых металлов. Во время сжигания тяжелые металлы попадают в продукты сгорания и при отсутствии очистки отходящих газов выбрасываются в атмосферу. Опыт показывает, что очищение газообразных продуктов сгорания от тяжелых металлов является дорогостоящим процессом, значительно превышающим стоимость удаления тяжелых металлов с осадков. Использование осадка в качестве строительного материала также связано с большими затратами энергии на испарение влаги. Таким образом, сжигание и использование продуктов сгорания в строительстве может быть оправдано только в случае невозможности или экономической нецелесообразности использования других методов утилизации.

Осадки сточных вод могут быть захоронены в специальных отхоохранилищах или на полигонах захоронения. Однако этот метод имеет ряд недостатков, таких как возможность загрязнения грунтовых вод и выделение вредных газов, поэтому его использование ограничено и требует внимательного контроля. Также осадки сточных вод могут быть переработаны и использованы в строительных материалах, таких как кирпичи, блоки или асфальт. Этот метод позволяет снизить количество отходов и использовать их в полезных целях. Однако перед использованием полученного грунта необходимо провести тщательное исследование состава и свойств осадка, чтобы убедиться в его безопасности для использования в строительстве. Таким образом использование метантенков становится оправданным в определенных ситуациях.

Метантенки, или метановые реакторы, используются для производства энергии из метана. Метан является одним из самых распространенных источников природного газа и может быть использован для генерации электроэнергии, отопления или привода двигателей.

Одним из главных преимуществ метантенков является их высокая эффективность и низкий уровень выбросов. По сравнению с традиционными источниками энергии, такими как уголь или нефть, использование метантенков может значительно снизить выбросы парниковых газов и других вредных веществ.

Однако необходимо учитывать и некоторые недостатки. Например, для производства метана может потребоваться значительное количество энергии, что может снизить общую эффективность процесса. Также необходимо обеспечить безопасность при хранении и транспортировке метана, так как это горючий газ. Обработка осадков в метантенках считается в России малоэффективным способом: низкая скорость брожения, значительные объемы метантенков, небольшой выход биогаза, высокие капитальные и эксплуатационные затраты, низкое качество полученных органических удобрений.

Следует отметить, что увеличение объемов стабилизации осадков является актуальной задачей. Ее решение позволяет получать большое количество экологически безопасного органического удобрения, а, следовательно, повышать конкурентоспособность сельскохозяйственных культур и дополнительно получать существенное количество альтернативного экологически безопасного газообразного топлива. Увеличения объемов переработки можно достичь путем модернизации технологий с учетом результатов последних научных исследований в области биохимии и микробиологии анаэробных процессов и разработки новых конструкций метантенков.

Метантенк представляет собой герметичный резервуар для загрузки субстрата, в верхней части которого устроена емкость для сбора газа, образующегося во время брожения. Конструкции метантенков позволяют классифицировать технологические схемы анаэробной ферментации по следующим признакам: объем реактора метантенка; температурный режим брожения; методы нагрева субстрата; методы содержания микроорганизмов, осуществляющих процесс ферментации внутри реактора; непрерывность процесса брожения; распределение процесса ферментации на ступени (зоны брожения) и т.д.

Метантенки бывают большие и сложные по конструкции (например, на городских КОС) и совсем малые, примитивные (на сельскохозяйственных предприятиях для переработки отходов животных и птицы).

В зависимости от объема реактора метантенки могут быть:

- малой производительности (объем реактора 5–20 м³);
- средней производительности (200–1000 м³);
- большой производительности (1000–10 000 м³);
- особенно большой производительности (более 10 000 м³).

В зависимости от температуры различают следующие режимы сбраживания:

- психрофильный (сбраживание проводят при температуре 20 °С);
- мезофильный (при температуре 30–35 °С);
- термофильный (при температуре 50–55 °С);
- экстратермофильный (при температуре 60 °С).

При термофильных режимах сбраживания достигается полное уничтожение яиц гельминтов, тогда как при мезофильном режиме погибает 50–80%. При психрофильном режиме обеззараживание не происходит вообще.

По методам нагревания субстрата в реакторе метантенка различают:

- реакторы с прямым подогревом паром или смешиванием субстрата с горячей водой;
- реакторы с косвенным подогревом субстрата через теплообменники (теплообменники могут быть встроены внутрь реактора, расположены отдельно от реактора, а также в виде сплошной рубашки на реакторе).

Более рациональными с точки зрения режима брожения являются метантенки непрерывного действия. В них загрузка и выгрузка осадка происходят одновременно и непрерывно (или периодически небольшими порциями). Это обеспечивает лучшую температурную стабильность бродящего субстрата (предупреждает его охлаждение от смешивания с залповыми порциями более холодного свежего субстрата). Тем самым обеспечиваются равномерная интенсивность брожения и равномерное газовыделение.

С учетом распределения процесса ферментации на ступени различают реакторы:

- одноступенчатого сбраживания;
- двухступенчатого (или многоступенчатого) сбраживания.

Первые крупные метантенки, которые появились в 1925 г. в Германии, Англии и Америке, а также в 1928 г. в СССР, работали по одноступенчатой схеме. Метантенки, работающие сейчас в России, тоже преимущественно одноступенчатые. В одноступенчатом метантенке (рис. 1) все биохимические процессы анаэробного брожения протекают в одной общей емкости, последовательно сменяя друг друга. Для того чтобы субстрат в такой емкости полностью перебродил и все органические вещества превратились в биогаз, требуется достаточно большой промежуток времени, даже при условии термостабилизации [5]. По мезофильному процессу продолжительность брожения может составлять 30–50 суток, по термофильному – вдвое меньше. Чтобы организовать непрерывный процесс, периодически проводят частичную выгрузку с одновременным заполнением метантенка свежим субстратом. Суточную массу свежего субстрата, приходящуюся на кубический метр объема метантенка, называют нагрузкой (единица измерения $\text{кг}/\text{м}^3 \cdot \text{сутки}$). Перемешивание свежего и сброженного субстратов приводит к т.н. *проскокам* – наличию в порциях удаляемого субстрата жизнеспособных опасных микроорганизмов.

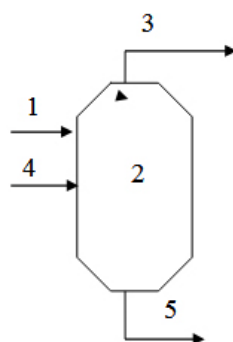


Рис. 1. Принципиальная схема одноступенчатого анаэробного сбраживания:
 1 – загрузка осадка; 2 – метантенк; 3 – выход биогаза;
 4 – теплоноситель; 5 – выгрузка осадка из метантенка

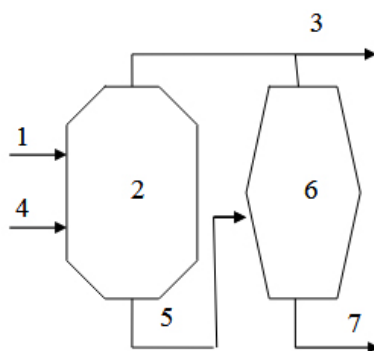


Рис. 2. Принципиальная схема двухступенчатого анаэробного сбраживания:
 1 – загрузка осадка; 2 – метантенк 1-й ступени; 3 – выход биогаза; 4 – теплоноситель;
 5 – выгрузка осадка из метантенка 1-й ступени; 6 – метантенк 2-й ступени;
 7 – выгрузки сброженного осадка

В одноступенчатых метантенках не наблюдается расслоения осадка и отделения иловой воды, поэтому в современных системах используются двухступенчатые схемы (иногда трехступенчатые). Они работают по тому же принципу, но имеют соответственно две или три последовательно соединенные емкости, которые дополнительно разделяют процесс брожения в пространстве по признаку его интенсивности. В первой емкости (первая ступень) происходит интенсивное брожение с активным выделением биогаза. Во второй емкости (вторая ступень) брожение затухает, выделение биогаза постепенно прекращается, а субстрат частично расслаивается с выделением иловой воды (рис. 2). В трехступенчатых метантенках отделение иловой воды происходит в третьей емкости (третья ступень) или в открытых резервуарах [5]. Такая технология уменьшает объем осадка на выходе за счет отделения иловой воды и улучшает

санитарно-гигиенические свойства стабилизированного осадка, однако не позволяет полностью избавиться от «проскоков». Кроме того, она не сокращает существенно сроки брожения.

Современные методы интенсификации процессов брожения можно разделить на две группы – микробиологические и конструктивно-технологические.

К *микробиологическим методам интенсификации* процессов брожения можно отнести:

- метод коферментации (совместное сбраживание отходов различного происхождения, здесь подбираются комбинации отходов, которые улучшают характеристики брожения);

- применение новых штаммов микроорганизмов, осуществляющих процесс брожения (японская фирма “Matsushita Electric Industrial Co” вывела новую культуру метаногенных бактерий *Methanobacterium kadomensis*, которая, по данным [7], способна завершать процессы брожения за 8 суток);

- введение добавок, стимулирующих процессы окисления (в приготовленный для брожения субстрат добавляются органические катализаторы, которые изменяют соотношение углерода и азота в субстрате, приближая его к оптимальным данным [10]. Если содержимое азота увеличивается, во время брожения усиливается образование аммиака);

- фиксация микроорганизмов на специальных носителях. Применяется адгезионное и абсорбционное закрепление биомассы на поверхности инертных материалов [11]. В качестве материала для закрепления можно использовать галечник, керамзит, стекловолокно и др. В таких условиях можно сбраживать субстраты меньшей концентрации с большими скоростями.

К *конструктивно-технологическим методам интенсификации* процессов брожения можно отнести:

- применение оптимальных температурных режимов брожения;

- перемешивание субстрата во время брожения (быстрее высвобождается продуцируемый биогаз, предупреждаются образование коринки и выпадение некоторых веществ в осадок, выравнивается температура и обеспечивается равномерное распределение популяций бактерий по объему реактора, предупреждается образование пустот и скоплений, уменьшающих эффективный объем реактора);

- предварительная подготовка субстрата (использование ультразвуковых и гидродинамических кавитационных деструкторов, ускоряющих процессы гидролиза сложных органических веществ);

- распределение процесса брожения на стадии в соответствии с современными представлениями о биохимии процессов брожения (некоторые авторы отмечают, что это сложно реализовать технически, поскольку для этого требуется значительное усложнение конструкции метантенка или применение дополнительных сложных аппаратов [6]).

Метановое брожение – это сложный процесс разложения органических соединений до конечных продуктов, в основном метана и углекислого газа, в анаэробных условиях. В лучшем случае количество этих газов может составлять 90–95% от биологически разложившейся органики. Научные исследования последних лет [6] позволяют более обоснованно провести анализ технологий анаэробного сбраживания и оценить соответствие конструкций метантенков современным требованиям, а также наметить пути их дальнейшего развития. В процессе анаэробной ферментации участвует сообщество различных микроорганизмов. Количественный и качественный состав органики в значительной мере зависит от состава субстрата и условий, создаваемых в метантенке. В этом сообществе субстрата присутствуют: деструктивные микроорганизмы, что вызывают гидролиз сложного органического вещества до более простых растворимых в воде веществ и потому доступных для брожения; бродильные микроорганизмы, в результате жизнедеятельности образующие органические кислоты и низшие спирты, аммиак, водород; синтрофные, превращающие эти кислоты в уксусную кислоту, водород и окислы углерода; метановые бактерии, непосредственно производящие метан. Итак, анаэробное брожение можно рассматривать как процесс, состоящий из четырех последовательных стадий (рис. 3):

- гидролиз нерастворенных сложных органических соединений с образованием более простых веществ, растворимых в воде;

- кислотогенез – выделение кислот, спиртов, водорода и углекислого газа;
- ацетогенез – превращение продуктов кислотогенеза в ацетат;
- метаногенез – заключительная стадия брожения, на которой происходит образование метана.

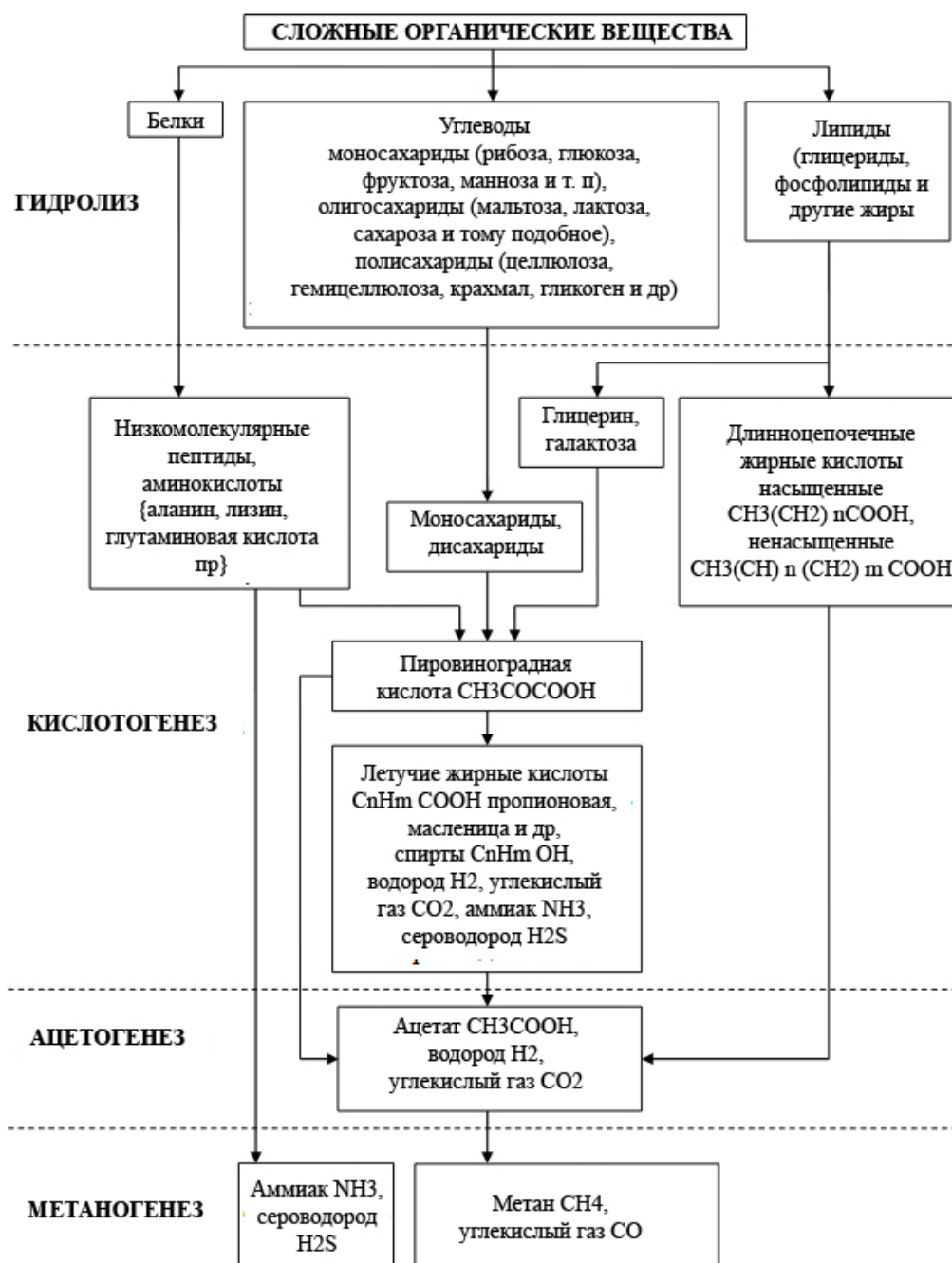


Рис. 3. Постадийная схема анаэробного брожения

Если в трофических цепях аэробных процессов отношения между группами организмов происходят преимущественно по принципу «хищник–жертва», то в процессах метанового брожения трофические цепи построены на использовании продуктов метаболизма одних групп бактерий другими.

Во время метанового брожения органические соединения распадаются на анаэробные конечные продукты, основными из которых являются метан и углекислый газ. Последние исследования, объясняющие особенности воздействия различных факторов на брожение, позволяют применять новые подходы к организации этих процессов в целях их интенсификации в

промышленных масштабах и создавать новые технологии и конструкции реакторов. Количественный и качественный состав анаэробной микрофлоры, а также активность и скорость размножения микроорганизмов в значительной мере зависят от состава и условий, создаваемых в метантенке. Но в целом метаболические процессы, происходящие во время брожения, подчиняются одним правилам. В отличие от большинства аэробных процессов, где микроорганизмы сосуществуют по принципу хищник-жертва, в анаэробных процессах продукты жизнедеятельности одних микроорганизмов становятся питательными элементами для других [3]. В результате брожения можно рассматривать как независимые практически последовательные метаболические процессы различных групп бактерий [9]. Среди них выделяют четыре основные группы микроорганизмов.

Первая группа (гидролитическая) – микроорганизмы, вызывающие гидролиз сложных органических веществ до более простых растворимых в воде и потому доступных для дальнейшего брожения. Белки гидролизуют в растворимые пептоны, углеводороды – сначала до полисахаридов, затем до олигосахаридов и до моносахаридов. Жиры гидролизуются до глицеридов, фосфолипидов и т. п. Вторая группа (кислотогенная) представлена микроорганизмами, которые, используя продукты гидролиза, образуют сначала низкомолекулярные пептиды и аминокислоты, затем летучие жирные кислоты и спирты, а также длинноцепочечные жирные кислоты. Третья группа (ацетогенная) – микроорганизмы, использующие кислоты и спирты для образования прежде всего ацетата (уксусной кислоты). Четвертая группа (метаногенная) – микроорганизмы, вырабатывающие метан из продуктов жизнедеятельности ацетогенных бактерий. Активность этих групп микроорганизмов зависит от параметров среды, таких как рН, температура, концентрация кислорода, наличие или отсутствие других веществ. Для различных групп бактерий оптимальные значения этих параметров, как правило, разные [2].

Технологии сбраживания предусматривают преимущественно такую организацию процесса: одноступенчатое сбраживание (все процессы происходят в одной емкости); двухступенчатое сбраживание (первая емкость предназначена для интенсивного брожения и интенсивного газовыделения, вторая – для угасания процесса и расслоения осадка на стабилизированный субстрат и иловую воду); многоступенчатое сбраживание (добавляются емкости, в которых происходит уплотнение сброженного осадка). Двух- и многоступенчатые технологии позволяют уменьшить объемы сброженного осадка в результате лучшего отвода иловой воды и тем самым уменьшить объемы сооружений для дальнейшего обезвоживания осадков.

Основная часть процесса все равно происходит в емкости первой ступени, в которой пытаются создать благоприятные условия для более требовательных и медленно растущих микроорганизмов, которыми являются метановые бактерии. Эти условия подавляют деятельность кислотообразующих бактерий, поскольку благоприятные условия для них различны. В итоге кислотообразование замедляется, количество продуктов жизнедеятельности кислотогенов уменьшается. Эти продукты являются источником питания для ацетогенных, а далее – для метаногенных бактерий, поэтому конечный выход биогаза уменьшается. Если создаются условия, более благоприятные для кислотообразующих микроорганизмов, количество кислот в метантенке увеличивается, существенно снижается рН среды, что ингибирует деятельность метанообразующих бактерий. Поэтому в метантенках, как правило, пытаются создать гибридные условия, достигнув определенного равновесия между активностью кислотообразующих и метанотворных бактерий. Очевидно, такой подход не имеет перспектив для дальнейшего развития. Вместе с тем исследования показывают, что скорость роста кислотообразующих и метанообразующих бактерий, участвующих в процессах брожения, существенно увеличивается, если их отделить в пространстве [3]. Можно также утверждать, что оптимальные параметры среды необходимы для активного роста и деятельности не только кислото- и метанообразующих, но и других групп бактерий, осуществляющих различные метаболические процессы в течение брожения [1, 4].

Для осуществления гидролиза осадков перед подачей в метантенк традиционной конструкции используется технологическая схема гидролизатора с ультразвуковым облучением, добавлением щелочи и барботированием биогазом (рис. 4).

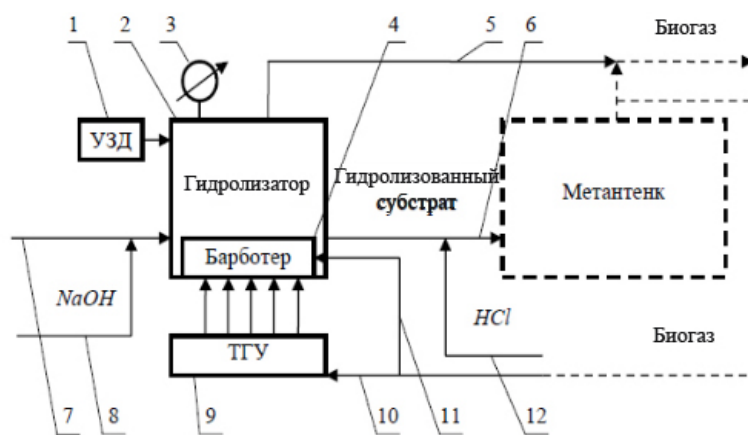


Рис. 4. Технологическая схема щелочного гидролиза с ультразвуковой кавитацией и биогазовым барботированием:

- 1 – ультразвуковой диспергатор; 2 – гидролизатор с барботером; 3 – манометр для измерения давления в гидролизаторе; 4 – барботер; 5 – отвод биогаза после барботирования; 6 – подача гидролизованного субстрата в метантенк; 7 – подача свежего осадка с КОС; 8 – добавление щелочи; 9 – теплогенерирующая установка; 10 – подача биогаза для сжигания; 11 – подача биогаза для барботирования; 12 – подача кислоты

Согласно технологической схеме в гидролизатор 2 подают свежий осадок 7 с добавлением рециркуляционного сброженного осадка из метантенка и NaOH 8. После загрузки осадка в барботер 4 подают рециркуляционный биогаз 11 из метантенка. Барботируемый через осадок биогаз собирается в верхней части гидролизатора, где размещен клапан, через который выпускают биогаз в отводной трубопровод 5, поддерживая внутри избыточное давление 0,5–10 5 Па, для контроля которого установлен манометр 3. Одновременно с барботированием включают ультразвуковой диспергатор 1, облучая осадок. Теплогенерирующая установка 9 постепенно нагревает осадок. Скорость нагрева рассчитывается так, чтобы до окончания гидролиза температура осадка достигла значения, необходимого для дальнейшего брожения. По завершению гидролиза в осадок добавляют раствор HCl для доведения pH среды до значения 6,5–7,6. После этого осадок подают в метантенк.

По результатам исследований на базе лаборатории МУП г. Хабаровск «Водоканал» было установлено следующее.

Вопросы практико-ориентированной интенсификации организации процесса энергоэффективной стабилизации осадков сточных вод сводятся к воссозданию специальной системы их биологической очистки, основанной на модернизационных свойствах и усовершенствовании её составных элементов, отвечающих за стабилизацию осадков. В таком случае для реализации процедур очистки сточных вод предназначена специальная конструкция; она оснащается также системой биологической очистки посредством внедрения аэротенков, что предполагает удаление фосфора в анаэробной зоне и восстановление нитратного азота в аноксидной зоне с его денитрификацией. Выбор характеристик аэротенков предполагает учет особенностей сточных вод, склонности к нитрификации и денитрификации. На обе характеристики формируются собственные предельные значения (табл. 1), от величины которых зависят итоговые свойства формируемой конструкции.

Результаты сравнительного мониторинга содержания БПК и общего азота в сточной воде в период с января по декабрь текущего года (табл. 2) показывает, что величина предельного значения БПК для сточных вод составит соотношение БПК/Н_{общ} в допустимых рамках. Это значит, что нитрификация не требует значительной интенсификации стандартных условий. В то же время для денитрификации необходимы компенсационные процедуры: применение специальных добавок (таких как уксусная кислота, ацетон, этанол и др.) или осветленных сточных вод, отношение БПК5 которых (к содержанию фосфатов) является достаточным для нормализации процессов дефосфотации.

Таблица 1

Пределы нитрификационного и денитрификационного потенциалов

	Нитрификационный потенциал	Денитрификационный потенциал
Пределные значения (ПЗ = БПК/общий азот)	$0,5 \leq \text{ПЗ} \leq 6,5$	$3,5 \leq \text{ПЗ} \leq 8$

Таблица 2

Результаты сравнительного мониторинга содержания БПК и общего азота в сточной воде в период с января по декабрь текущего года

Месяц	Пределные значения БПК/общий азот)	Нитрификационный потенциал $0,5 \leq \text{ПЗ} \leq 6,5$	Денитрификационный потенциал $3,5 \leq \text{ПЗ} \leq 8$
Январь	109,6/22,1	4,96	4,96
Февраль	105,6/20,5	5,15	5,15
Март	99,8/19,5	5,12	5,12
Апрель	105,2/26,1	4,03	4,03
Май	110,2/25,9	4,25	4,25
Июнь	104,6/25,1	4,16	4,16
Июль	109,8/25,4	4,32	4,32
Август	121,2/22,9	5,29	5,29
Сентябрь	101,9/24,8	4,11	4,11
Октябрь	107,3/24,3	4,42	4,42
Ноябрь	112,4/26,1	4,31	4,31
Декабрь	107,2/26,2	4,09	4,09

Анаэробная обработка смеси ила и сточных вод функционирует на основе реактора кислородного брожения: жизнедеятельность гетеротрофных микроорганизмов ила приводит к вытеснению фосфатов (за счет выработки органических кислот), что требует создания специальных условий для их размножения. Таким образом, включение подобных микроорганизмов позволяет использовать окислы азота для обеспечения их жизнедеятельности (поскольку они используют окислы азота при недостаточном уровне кислорода). В дальнейшем азот восстанавливается, увеличивается количество HCO_3^- , что также способствует нитрификации (в случае, когда денитрификатор расположен перед нитрификатором).

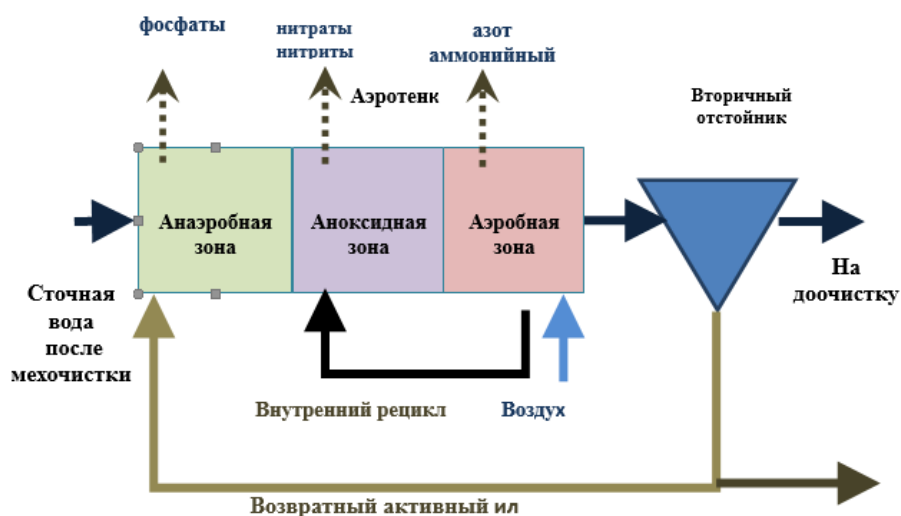


Рис. 5. Схема очистки вод A2/O (Анаэробик–Аноксик–Оксик)

При воссоздании конструкции очистки сточных вод необходимо учитывать, что процессы удаления азота и фосфора тесно связаны между собой: при глубоком удалении азота из клеток вытесняется фосфор; в ином случае реакция полностью противоположна – фосфор удаляется при повышении нагрузки на ил. Это подчеркивается тем, что при увеличении массы избыточного ила возрастает масса удаляемого фосфора; для компенсации необходимо способствовать увеличению его количества в клеточном веществе бактерий (с 1,5–2 до 2,5–3,5%) Так, можно представить следующий вид технологической системы удаления органических загрязнений и биогенных элементов (рис. 5).

Открытым остается вопрос реализации процедур доочистки сточных вод в целях обеспечения нормативных показателей качества. По данным лаборатории МУП Хабаровска «Водоканал» рассчитаны фактические концентрации загрязняющих веществ, сбрасываемых в р. Амур после очистных сооружений, как средние за период с января по сентябрь 2022 г. (табл. 3).

Таблица 3

Фактическая концентрация загрязняющих вод сточных веществ на сбросе после очистных сооружений

Показатель	Концентрация, мг/дм ³	Показатель	Концентрация, мг/дм ³
БПК _{полн}	14,18	Фенолы	0,00032
Взвешенные вещества	10,23	Алюминий	<0,01
Нитриты	0,325	Кадмий	<0,05
Нитраты	57,79	Медь	0,006
Ион Аммония	2,21	Никель	<0,08
Фосфор	1,49	Ртуть	0,00001
Железо растворённое	0,33	Свинец	0,02
Нефтепродукты	0,13	Хром ⁺⁶	0,01
АПАВ	0,15	Хром ⁺³	0,01
Жиры	1,94	Цинк	0,067

Исходя из лабораторных данных прослеживается несоблюдение установленных НДС, как один из оптимальных вариантов следует использовать самопромывные дисковые фильтры, которые самоточечно (без использования напора вод) фильтруют сточную воду посредством тонкой механической фильтрации. Например, здесь может использоваться фильтр DynaDisc (рис. 6), схема которого включает в себя ряд дисков, направленных на фильтрацию осадков. При поступлении вода попадает в специальный ротор, где проходит через диски, на которых задерживаются все взвешенные твердые частицы.

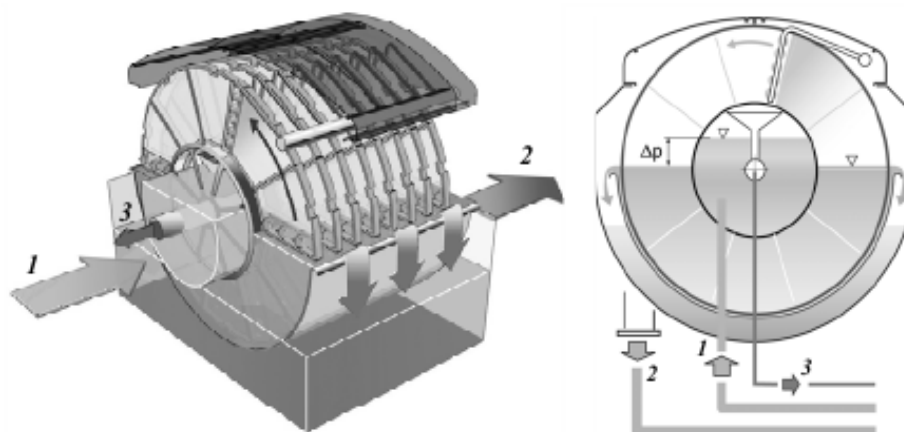


Рис. 6. Работа дискового фильтра DynaDisc:
1 – исходная вода; 2 – очищенная вода; 3 – промывная вода

Важнейшим элементом работы дискового фильтра становится наличие системы автоматического управления промывкой сеток. На фильтрацию должно отводиться больше времени, чем на промывку, что диктуется малым количеством промывных вод относительно объема очищаемых стоков (оптимальным считается значение от 1 до 5%). Следовательно, уменьшение площади фильтрованной сетки приводит к снижению скорости процессов фильтрации.

Управление производительностью здесь осуществляется через подбор фильтрующих сеток (по ряду характеристик). Причем расход жидкости увеличивается из-за особенностей расположения роторов: уровень жидкости внутри ротора выше, чем снаружи, что приводит к соответствующим изменениям. В качестве диска необходимо использовать фильтровую лепешку, а не ткань, поскольку первая гарантирует более высокую эффективность процессов фильтрации (до 98%).

Дисковой фильтр RoDisc является самопромывным и позволяет автоматически удалять накопившиеся осадки с фильтров за счет конструктивных особенностей. Данный механизм работает на основе того, что забивание фильтра увеличивает разность давлений. В таком случае перелив приводит к возникновению постоянного наличия воды в резервуаре, которая используется и для автоматического удаления взвешенных веществ.

Дисковый фильтр HUBER RoDisc основан на механизмах барабанного фильтра: фильтровальные диски вращаются и за счет погружения на 6/10 частей при возникновении разницы давлений удаляют налипшие осадки (рис. 7). При вращении фильтр промывается под воздействием воды, которая подается под давлением 7 бар через специальные шпринклерные колочки с форсунками; под действием воды частицы стекают вниз и попадают в желоб.

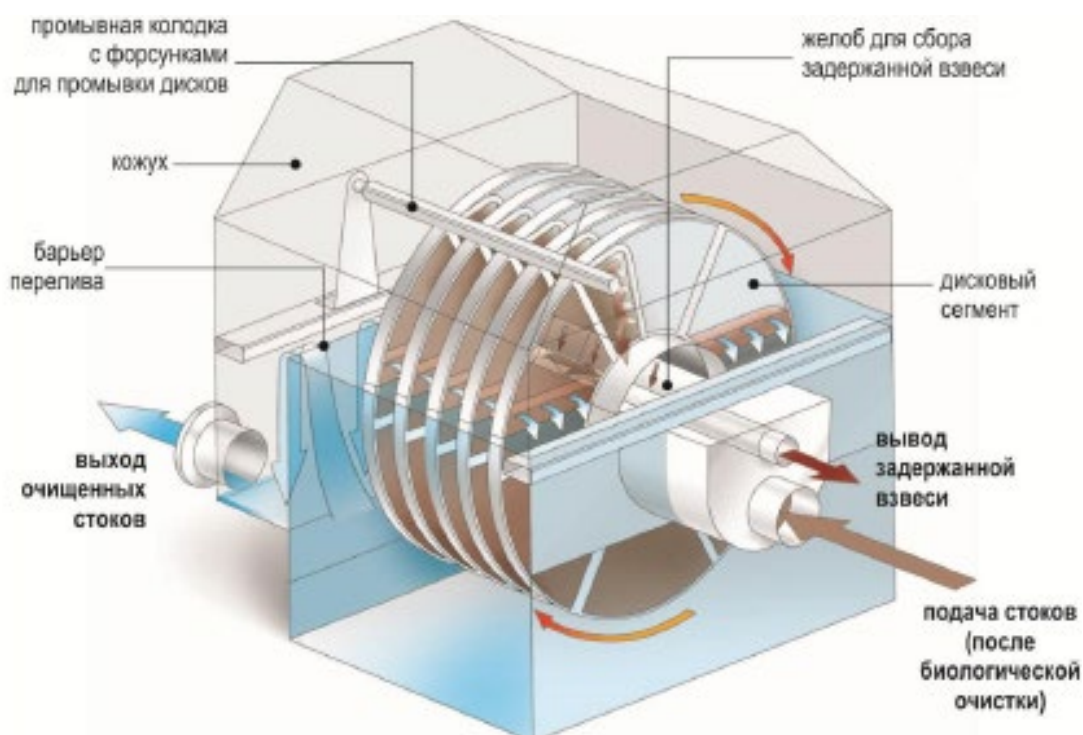


Рис. 7. Самопромывной дисковой фильтр HUBER RoDisc

Внутренние фильтры состоят из полых рамных дисков, к которым приварены фильтрующие полотна; размер ячеек составляет 10 мкм. Само фильтрующее полотно изготавливается из полиэстера.

Процессы фильтрации при использовании данных фильтров улучшаются благодаря следующим преимуществам:

- низкие гидравлические потери (не более 30 см);
- высокая пропускная способность;
- большая площадь фильтрующей поверхности при относительно малой установочной;

- не требует дополнительного подвода для поступления воды;
- эффективно удаляет осадки;
- действует непрерывно.

Все эти преимущества демонстрируют высокую энергоэффективность дисковых фильтров, обеспеченных дополнительными преимуществами. Кроме того, фильтрация может быть улучшена посредством ввода коагулянта в распределительные камеры вторичных отстойников. Это приводит к сосаждению фосфатов и снижению нагрузки на фильтры. В результате проведенных опытов специалисты пришли к выводу, что теоретическим путем можно спрогнозировать эффективность доочистки сточных вод (табл. 4).

Таблица 4

Эффективность очистки сточных вод на сооружениях биологической очистки и доочистки на самопромывном дисковом фильтре HUBER RoDisc

Перечень загрязняющих веществ	Эффективность очистки на сооружениях биологической очистки, %	Эффективность очистки на сооружениях доочистки, %
Взвешенные вещества	80–95/90	
БПК _{полн}	60–95/94	
ХПК	40–75/75	
Жиры	40–95/95	
Азот аммонийный	40–50/60	
Хлориды	35–45/60	
Сульфаты	40–45/65	
Сухой остаток	50–55/70	
Нефтепродукты	60–85/95	
АПАВ	60–90/92	
Фенолы	45–95/95	
Железо общее	50–80/80	
Медь	60–80/84	
Никель	40–50/60	
Цинк	40–70/76	
Хром ⁺³	50–80/84	
Хром ⁺⁶	60–80/84	

Выводы

Внедрение новых технологий и оборудования на действующих очистных сооружениях должны рассчитываться исходя из требований экологической безопасности и экономической целесообразности. Одним из факторов, снижающих качество работы очистных сооружений, является недостаточно продуманное технологическое решение тех или иных методов очистки. При рассмотрении плана реконструкции очистных сооружений прежде всего следует учитывать качество и неравномерность поступления на очистку воды. Основными причинами неудовлетворительной работы очистных сооружений можно назвать применение современных технологий без привязки к конкретным условиям, плохую эксплуатацию очистных сооружений, тот факт, что качественное соотношение основных загрязнений (БПК : азот : фосфор) не всегда удовлетворяет требуемому для качественной биологической очистки сточных вод.

В практике очистки сточных вод по-прежнему отсутствуют какие-либо методические материалы по реконструкции очистных сооружений, что приводит к необоснованному применению тех или иных технологий. При выполнении реконструкционных работ на очистных сооружениях должно соблюдаться следующее:

- применение технологий, позволяющих обеспечить нормативный сброс сточных вод в водоем в условиях РФ;
- использование наилучших доступных технологий;

- снижение себестоимости очистки стоков;
- рациональное использование земельных площадей;
- снижение нагрузки загрязняющих веществ на водоем.

Безусловно, важным этапом считается первоначальный анализ сложившейся на очистных сооружениях ситуации. По его результатам составляются уточненные технологические схемы с описанием основных параметров и технических характеристик всех узлов очистки. Для получения более достоверных сведений о пропускной способности очистных сооружений выполняются поверочные расчеты по каждому сооружению, оборудованию и узлу. На основании проведенной работы анализируется состояние очистных сооружений и предлагаются возможные технологические схемы и технические решения по усовершенствованию системы очистки (без расширения или с расширением очистных сооружений, модернизацией отдельных узлов и сооружений, применением современных технологий очистки стоков и т.д.).

Технологическая схема сбраживания, отвечающая оптимальным условиям функционирования всех типов бактерий должна: разделять стадии процесса брожения в пространстве (поскольку процесс брожения можно рассматривать как четырехстадийный, целесообразно использовать технологическую схему сбраживания, состоящую из четырех разделенных в пространстве процессов); обеспечивать возможность введения в зону каждой стадии процесса брожения достаточного количества необходимых ферментов; давать возможность поддерживать оптимальные значения рН и температуры среды в каждой зоне; организовывать протекание каждой стадии с учетом ее кинетики; производить отъем проб субстрата из каждой секции для оперативной корректировки значений факторов; обеспечивать непрерывность процесса брожения без смешивания субстрата.

Заявленный вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Данилович Д.А., Козлов Н.Н., Кевбрина Н.В., Гусев Д.В. Влияние предварительной обработки осадков сточных вод на полноту протекания процесса метанового сбраживания // Вода: технологии, материалы, оборудование, экология. 2010. № 2. с. 24–26. URL: <https://elcat.bntu.by/index.php?url=/notices/index/IdNotice:240846/Source:default> (дата обращения: 17.03.2022).
2. Кудряшова А.Г. Обоснование и разработка средств повышения энергоэффективности работы трехстадийного метантенка: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Ижевск, 2011. 20 с.
3. Лаврухина О.С. Стимуляторы выработки биогаза // Современные научные исследования и инновации. 2012. № 5. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2012/05/13035> (дата обращения: 17.03.2022).
4. Предзимирская Л.М. Кавитационные очистки природных и сточных вод от органических и биологических загрязнений: автореф. дис. ...канд. техн. наук. Ивано-Франковск. 2015. 21 с. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/bioremediatsiya-prirodnih-i-proizvodstvennyh-sred-1> (дата обращения: 17.03.2022).
5. Ткаченко С. И., Степанов Д. В., Резидент Н. В. Зависимости для оценки значения коэффициента теплоотдачи в системах термостабилизации биогазового реактора // Вестник ВПИ. 2004. № 1. С. 54-62. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-vozmozhnostyah-intensifikatsii-teploobmena-v-isparitelnyh-sistemah-ohlazhdeniya-teplonagruzhennyh-elementov-radioelektronnogo> (дата обращения: 17.03.2022).
6. Трахунова И.А. Повышение эффективности анаэробной переработки органических отходов в метантенке с гидравлическим перемешиванием на основе численного эксперимента: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Казань, 2014. 19 с. URL: <https://www.dissercat.com/content/povyshenie-effektivnosti-anaerobnoi-pererabotki-organicheskikh-otkhodov-v-metantenke-s-gidra> (дата обращения: 17.03.2022).
7. Шувалов М.В. О необходимости корректировки научных терминов и определений в области канализации // Водоснабжение и санитарная техника. 2014. № 8. С. 28-31. URL: <https://www.vst-news.ru/ru/to-author/our-authors/1988-shuvalov-m-v> (дата обращения: 17.03.2022).

8. Яковлев С.В. Канализация: учебник для вузов по спец. "Водоснабжение и канализация" / С.В. Яковлев, Я.А. Карелин, А.И. Жуков, С.К. Колобанов. Москва: Книга по требованию, 2012. 633 с. URL: http://books.totalarch.com/sewage_1975 (дата обращения: 17.03.2022).
9. Liao, B.Q, Kraemer., J.T., Bagley, D.M. Anaerobic membrane bioreactors. Application and research directions. *Sci. Technol.* 2006;(36):489-530. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852418309477> - 17.03.2022).
10. Sanders, F. A., Bloodgood D. J. The effect of nitrogen to carbon ratio on anaerobic decomposition. *Water Pollut. Control Fed.* 1975;(37):1741. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0141460779900118> - 17.03.2022.
11. Ungureanu D. Biological wastewater treatment using fixed film "Inovations in the field of water supply, sanitation and water. Pspser of Conference of the young scientists and researches. Bucharest, 2005. P. 97–102. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235218642200061X> - 17.03.2022

FEFU: SCHOOL of ENGINEERING BULLETIN. 2023. N 3/56

Water supply, building systems for water resources protection

www.dvfu.ru/en/vestnikis

Original article

DOI: <http://doi.org/10.24866/2227-6858/2023-3/90-104>

Shevtsov M., Mishkin D., Kostyuk O.

MIKHAIL N. SHEVTSOV, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Honored Ecologist of Russia, Acting Head of the Department, 000458@pnu.edu.ru

DENIS V. MISHKIN, Postgraduate Student, 944664@mail.ru✉

OLGA V. KOSTYUK, M.Sc., Khabarovsk Research Institute of Epidemiology and Microbiology of Rospotrebnadzor, kostyuk.anna2004@mail.ru

Department of Engineering Systems and Technosphere Safety

Pacific State University

Khabarovsk, Russia

Constructive and technological methods of organizing the process of energy-efficient stabilization of sewage sludge

Abstract. The constructive and technological methods of organizing the process of energy-efficient stabilization of sewage sludge are considered. Intensive anaerobic fermentation with the organization of the process in accordance with the kinetics of fermentation processes and the subsequent use of the fermented mass as an organic fertilizer is proposed as one of the most promising methods of processing and utilization of sediments. In the conditions of mass construction of enterprises for the treatment of urban and industrial wastewater, the most difficult problem is the treatment of precipitation. Large volumes, bacterial contamination, the presence of organic substances that can quickly rot with the release of unpleasant odors, as well as the heterogeneity of the composition and properties of precipitation complicates their processing. The purpose of the study is to select the most effective methods and equipment for processing sewage sludge. The scientific novelty lies in the organization of the process of energy-efficient stabilization of sewage sludge proposed by the authors with the help of an innovative self-washing disc filter.

Keywords: structural and technological methods, energy-efficient stabilization of precipitation, biogas, sewage sludge, methane tank, improvement of technological processes

For citation: Shevtsov M., Mishkin D., Kostyuk O. Constructive and technological methods of organizing the process of energy-efficient stabilization of sewage sludge. *FEFU: School of Engineering Bulletin.* 2023;(3):90–104. (In Russ.).

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflict of interests.

REFERENCES

1. Danilovich D.A., Kozlov N.N., Kevbrina N.V., Gusev D.V. The effect of pretreatment of sewage sludge on the completeness of the methane fermentation process. *Water: technologies, materials, equipment, ecology*. 2010;(2):24-26. URL: <https://elcat.bntu.by/index.php?url=/notices/index/IdNotice:240846/Source:default> – 17.03.2022. (In Russ.).
2. Kudryashova A.G. Justification and development of means to improve the energy efficiency of the three-stage methane tank. Abstract of PhD (Eng.) Thesis. Izhevsk, 2011. 20 p. (In Russ.).
3. Lavrukhina O.S. Stimulators of biogas production. Modern scientific research and innovation. *Electronic scientific and practical journal "Modern scientific research and innovation"*. 2012;(5). URL: <http://web.snauka.ru/issues/2012/05/13035> – 17.03.2022. (In Russ.).
4. Predzimirskaya L.M. Cavitation treatment of natural and wastewater from organic and biological contaminants. Abstract of PhD (Eng.) Thesis. Ivano-Frankivsk. 2015. 21 p. (In Russ.).
5. Tkachenko S.I., Stepanov D.V., Resident N.V. Dependences for estimating the value of the heat transfer coefficient in biogas reactor thermal stabilization systems. *Vestnik VPI*. 2004;(1):54–62. (In Russ.).
6. Trakhunova I.A. Improving the efficiency of anaerobic processing of organic waste in a hydraulic mixing tank based on numerical experiment. Abstract of PhD (Eng.) Thesis. Kazan, 2014. 19 p. (In Russ.).
7. Shuvalov M.V. On the need to adjust scientific terms and definitions in the field of sewerage. *Water supply and sanitary engineering*. 2014;(8):28-31. URL: <https://www.vstnews.ru/ru/to-author/our-authors/1988-shuvalov-m-v> – 17.03.2022. (In Russ.).
8. Yakovlev S.V., Karelin Ya.A., Zhukov A.I., Kolobanov S.K. Sewerage: Textbook for universities on spec. "Water supply and sewerage". Moscow, Book on Demand, 2012. 633 p. (In Russ.).
9. Liao B.K., Kremer J. T., Bagley D.M. Anaerobic membrane bioreactors. Directions of application and research. *Sci. Technol.* 2006;(36):489–530. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852418309477> – 17.03.2022.
10. Sanders F.A., Bloodwood D.J. The effect of the ratio of nitrogen and carbon on anaerobic decomposition. *Water pollution. Control Commission*. 1975;(37):1741. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0141460779900118> – 17.03.2022.
11. Ungureanu D. Biological wastewater treatment using a fixed film “Innovations in the field of water supply, sanitation and water supply. Paper Conferences of young scientists and researchers. Bucharest, 2005. P. 97– 102. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235218642200061X> – 17.03.2022.