



Энергетическая эффективность предварительной обработки синтетического субстрата метантенка в аппарате вихревого слоя

А. А. Ковалев*, Д. А. Ковалев, В. С. Григорьев
ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ»
(г. Москва, Россия)

*kovalev_ana@mail.ru

Введение. Переработка органических отходов для снижения антропогенной нагрузки на окружающую среду остается актуальной задачей, одним из способов решения которой является использование методов биоконверсии органического вещества органических отходов с получением газообразного энергоносителя и высококачественных органических удобрений. Одной из важнейших стадий анаэробной переработки органических отходов в биореакторах является стадия предварительной подготовки отходов к сбраживанию, которую возможно осуществить рядом методов. Однако в доступной научно-технической литературе сведения о предварительной обработке субстратов в аппарате вихревого слоя представлены в малом количестве. Целью работы является определение энергетической эффективности процесса предварительной обработки органических отходов в аппарате вихревого слоя перед анаэробным сбраживанием.

Материалы и методы. Для исследования процесса предварительной обработки органических отходов создана экспериментальная установка. Субстратом для обработки в аппарате вихревого слоя служила смесь модели органической фракции твердых коммунальных отходов и воды холодного водоснабжения в соотношении 300 г/л.

Результаты исследования. Проведенные расчеты подтвердили, что условие энергетической эффективности процесса предварительной обработки субстрата метантенка соблюдается, несмотря на дополнительные затраты на электрическую энергию в ходе интеграции этой стадии в систему анаэробной переработки.

Обсуждение и заключение. Интеграция процесса предварительной обработки органических отходов в аппарате вихревого слоя перед сбраживанием в анаэробных биореакторах в систему анаэробной обработки органических отходов позволяет повысить как энергетическую эффективность системы, так и степень анаэробного разложения органического вещества органических отходов. Удельное количество энергии биогаза, полученного в процессе сбраживания в анаэробных биореакторах с применением предварительной обработки субстрата в аппарате вихревого слоя, полностью компенсирует затраты энергии на предварительную обработку субстрата в аппарате вихревого слоя. Практическая значимость работы обусловлена повышением удельного выхода товарной энергии на 70 % по сравнению с анаэробной обработкой в традиционных метантенках.

Ключевые слова: анаэробная обработка, аппарат вихревого слоя, энергетическая эффективность, биоконверсия органических отходов, предварительная обработка органических отходов

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке ФГБУ «Российский фонд фундаментальных исследований» в рамках научного проекта № 18-29-25042.

© Ковалев А. А., Ковалев Д. А., Григорьев В. С., 2020



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Для цитирования: Ковалев, А. А. Энергетическая эффективность предварительной обработки синтетического субстрата метантенка в аппарате вихревого слоя / А. А. Ковалев, Д. А. Ковалев, В. С. Григорьев. – DOI 10.15507/2658-4123.030.202001.092-110 // Инженерные технологии и системы. – 2020. – Т. 30, № 1. – С. 92–110.

Energy Efficiency of Pretreatment of Digester Synthetic Substrate in a Vortex Layer Apparatus

A. A. Kovalev*, D. A. Kovalev, V. S. Grigoriev

Federal Scientific Agroengineering Center VIM (Moscow, Russia)

*kovalev_ana@mail.ru

Introduction. Processing organic waste to reduce the anthropogenic impact on the environment remains an urgent task, one of the ways to solve which is the use of methods for bioconversion of organic matter of organic waste to produce gaseous energy carrier and high-quality organic fertilizers. One of the most important stages of anaerobic processing of organic waste in bioreactors is the stage of preliminary preparation of waste for fermentation, which can be carried out by a number of methods. However, the technical literature does not pay enough attention to the use of devices with a vortex layer for the preliminary processing of substrates. The aim of the work is to determine the energy efficiency of the organic waste pretreatment process in the vortex layer apparatus before anaerobic digestion.

Materials and Methods. An experimental installation was developed to study the process of organic waste pretreatment. A mixture of organic fraction of municipal solid waste and tap water in the ratio of 300 g/l served as a substrate for treatment in the vortex layer apparatus.

Results. The calculations confirmed that the condition for energy efficiency of processing substrate pretreatment of methane is met, despite the additional cost of electrical energy during the integration of this stage in the system of anaerobic processing.

Discussion and Conclusion. Integration of the process of organic waste pretreatment in the vortex layer apparatus before fermentation in anaerobic bioreactors into the system of anaerobic treatment of organic waste can improve both the energy efficiency of the system and the level of anaerobic decomposition of organic matter of waste. The specific amount of biogas energy produced in the digestion process in an anaerobic bioreactor with pretreatment of the substrate in the apparatus of the vortex layer fully compensates the energy cost of pre-treatment of the substrate in the vortex layer apparatus. The practical significance of the work is confirmed by an increase in the specific yield of commercial energy by 70% compared to anaerobic treatment in traditional methane tanks.

Keywords: anaerobic treatment, vortex layer apparatus, energy efficiency, bioconversion of organic waste, pretreatment of organic waste

Funding: The publication was prepared with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research, research project No. 18-29-25042.

For citation: Kovalev A.A., Kovalev D.A., Grigoriev V.S. Energy Efficiency of Pretreatment of Digester Synthetic Substrate in a Vortex Layer Apparatus. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2020; 30(1):92-110. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202001.092-110>

Введение

«Возникновение и обострение экологических проблем, связанных с утилизацией навоза на животноводческих фермах, рост цен на отдельные энер-

горесурсы обусловили значительный интерес к использованию технологии анаэробного сбраживания навоза, при которой обеспечивается его обезвреживание, сохранение удобрительных

свойств и получение энергии в виде биогаза. В этой связи весьма перспективно использование методов биологической конверсии органических отходов с получением биогаза и органических удобрений при одновременном решении ряда вопросов охраны окружающей среды от загрязнения»¹.

В работах ряда исследователей показано, что биомасса содержит различные органические компоненты [1–4] и может быть преобразована в энергетические носители различных фазовых состояний: от твердых и жидких [5–8] до биогаза [9; 10].

Одной из лимитирующих стадий в технологии анаэробной переработки органических отходов является предварительная обработка (подготовка) отходов к сбраживанию. Ее основные задачи:

1. Отделение грубых включений (камни, доски, крупный мусор и т.п.) для исключения поломок перемешивающего оборудования, засорения трубопроводов.

2. Гомогенизация смеси и частичный гидролиз, позволяющие обеспечить доступ питательных веществ к микроорганизмам, перевести часть органического вещества, содержащегося в исходных органических отходах, в растворимую форму, из которой и образуется биогаз.

3. Нагрев смеси до температуры процесса для снижения колебания температуры в биореакторе при загрузке субстрата.

Для предварительной обработки используется различное оборудование, которое, как правило, обладает значительной энергоемкостью (сита, центрифуги, измельчители, гомогенизаторы, теплообменники). В связи с этим разработка новых технических способов и решений для предварительной под-

готовки органических отходов к анаэробной биоконверсии органического вещества органических отходов является актуальной научно-технической и инженерной задачей.

«В настоящее время существует множество вариантов предварительной обработки органических отходов перед анаэробным сбраживанием, различающихся по своей эффективности и энергопотреблению» [5].

Использование биологических методов позволяет получить из биомассы продукты жизнедеятельности анаэробных микроорганизмов, включающие в себя сброженный осадок и биогаз (газообразный энергоноситель). Сброженный осадок в некоторых случаях можно использовать для получения дополнительного количества биогаза с помощью микробиологических процессов. Стоки пищевой промышленности богаты биоразлагаемыми органическими веществами, которые являются превосходным субстратом для микроорганизмов [11–13].

В работах С. Д. Варфоломеева и коллег показано, что микробиологическое конвертирование биомассы в анаэробных условиях, в том числе и для получения биогаза, – это биохимический процесс, суть которого заключается в переносе электронов на отличные от кислорода акцепторы с образованием восстановленных веществ: спиртов, кетонов, органических кислот, сероводорода, водорода, метана [14; 15]. Особый интерес представляет получение газообразного топлива – водорода и метана. Расчеты показывают, что эффективность запасаения энергии в водороде при брожении не превышает 20–30 %, тогда как в метан переходит более 80 % энергии, первоначально заключенной в исходных органических веществах.

¹ Биотехнология и микробиология анаэробной переработки органических коммунальных отходов: коллективная монография / под общ. ред. А. Н. Ножевниковой. М.: Университетская книга, 2016. 320 с. URL: http://www.logosbook.ru/books/nojevnikova_-_biotehnologiya.pdf (дата обращения: 20.02.2020).

Практически любое органическое сырье, за исключением необработанных лигнина и восков, может быть подвергнуто метановому брожению² [16; 17].

Известен ряд методов предобработки органических отходов перед анаэробной обработкой в биореакторах, однако в доступной научно-технической литературе сведения о применении аппаратов вихревого слоя для предварительной обработки субстратов представлены недостаточно.

Для изучения влияния предварительной обработки органических отходов в аппарате вихревого слоя на интенсификацию процесса анаэробной биоинверсии органических отходов сельского хозяйства в лаборатории биоэнергетических и сверхкритических технологий ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» был проведен ряд экспериментальных исследований.

Цель настоящей работы – определение энергетической эффективности процесса предварительной обработки органических отходов в аппарате вихревого слоя перед анаэробным сбраживанием.

Обзор литературы

К жидким органическим отходам, наиболее часто используемым в качестве субстрата для анаэробной переработки, относятся сточные воды пищевой промышленности, навозные стоки и жидкий навоз (помет), осадки и избыточные активные илы станций механико-биологической очистки коммунальных сточных вод.

Основной лимитирующей стадией метанового сбраживания органического вещества органических отходов является гидролиз твердых веществ,

содержащихся в органических отходах, и небольшого количества растворенного органического вещества (ОВ). Растворимые органические соединения, которые далее могут быть преобразованы в биогаз, образуются в органических отходах в процессе гидролиза. Поэтому выход биогаза при сбраживании органических отходов находится в прямой зависимости от способности отходов к биологическому разложению и, соответственно, от скорости гидролиза. Одним из способов повышения биодоступности органических отходов является их предварительная обработка перед сбраживанием в метантенках. Предварительная обработка осадка позволяет солиubilизировать твердые частицы осадков, а также частично разложить образующиеся органические полимеры до мономеров и димеров³.

Известен ряд методов предобработки органических отходов, среди которых выделяют различные способы гидролиза (кислотный, щелочной, термощелочной и термогидролиз), механическую и ультразвуковую предварительную обработку, а также их комбинации. Методы предварительной обработки органических отходов можно подразделить на:

– термические: исходный субстрат подвергается воздействию высоких температур (100–180 °С);

– химические: исходный субстрат подвергается химическому воздействию кислот или щелочей, а также окислителей;

– термохимические;

– механические: исходный субстрат подвергается механическому воздействию в различных технических средствах (шаровые мельницы, насосы высокого давления, лизирующие цент-

² Модификация лигнина аминированием / С. В. Хитрин [и др.] // Теоретическая и экспериментальная химия глазами молодежи: тезисы докладов всероссийской научной конференции, 23–26 мая 2013 г. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2013. С. 151–152. URL: http://chem.isu.ru/ru/science/conf/docs/thgm_2013.pdf (дата обращения: 20.02.2020).

³ Биотехнология и микробиология анаэробной переработки органических коммунальных отходов...

рифуги, устройства обработки ультразвуком);

– биологические: исходный субстрат подвергается воздействию препаратов ферментов или микроорганизмов гидролитиков [5; 18–20].

«Наиболее распространенный метод – термогидролиз осадка – обеспечивает разрушение устойчивого органического вещества органических отходов перед их обработкой в метантенках» [21]. Применение этого метода позволяет повысить глубину распада беззольного вещества (БВ) и выход биогаза на 30 % [22]. «Метод термогидролиза представляет собой упрощенную версию устаревшего метода теплового кондиционирования осадка, одним из недостатков которого было образование большого количества бионеразлагаемых окрашенных соединений (refractory compounds) – продуктов взаимодействия белков и углеводов, выделяющихся при термогидролизе» [23].

«Несмотря на высокую степень разрушения клеток активного ила, термохимическая обработка недостаточно распространена в связи с высокими затратами на реагенты. Механическая предобработка направлена на измельчение твердых частиц, однако применение данной технологии влечет за собой значительные энергетические затраты. Мировая практика показывает, что ультразвуковая предобработка осадка сточных вод считается одним из новых перспективных методов повышения биodeградебельности осадков и выхода биогаза в процессе анаэробного сбраживания» [24]. Согласно мнению ряда исследователей, применение ультразвуковой предобработки позволяет повысить глубину распада беззольного вещества на 10–56 % в зависимости от условий обработки [18–20]. Однако ультразвуковая предобработка также является энергоемкой технологией. В АО «Мосводоканал» проведен сравнительный анализ мето-

дов предобработки осадка (активного ила, первичного осадка и их смеси) Курьяновских очистных сооружений. Результаты определения эффективности методов предобработки активного ила представлены в таблице 1. В качестве критерия оценки эффективности выбрано отношение полученной энергии к затраченной при различных методах предобработки. Наиболее эффективными были признаны методы термогидролиза и ультразвуковой обработки [5].

Аэробная предварительная обработка как метод интенсификации стоит несколько отдельно от вышеперечисленных, так как помимо главного положительного эффекта – биологического нагрева органического субстрата до мезофильных или термофильных температур – он обладает следующими дополнительными преимуществами:

– относительно высокой скоростью гидролиза органического вещества (константа гидролиза при аэробной обработке $r_v = 0,12 \text{ сут}^{-1}$; для анаэробных условий данный показатель составляет $0,06 \text{ сут}^{-1}$; для аноксидных – $0,03 \text{ сут}^{-1}$) [25], при этом скорость гидролиза возрастает в соответствии с уравнением Вант-Гоффа по мере роста температуры;

– увеличивает, в среднем на 10–15 %, значение pH субстрата [26; 27];

– изменяет гранулометрический состав субстрата в сторону увеличения доли тонко- и среднедисперсных частиц [26].

В силу указанных причин ведущие специалисты по анаэробной переработке органических отходов выделили сопряжение аэробного и анаэробного процессов как отдельное направление развития [28].

Материалы и методы

Из работы Н. В. Лимаренко видно, что аппарат вихревого слоя (АВС) представляет собой устройство, использующее энергию вращающегося электромагнитного поля высокой удельной

Сравнительная оценка затраченной и полученной энергии от биогаза при различных методах предобработки активного ила

Comparative evaluation of energy consumed and received from biogas in different methods of activated sludge pretreatment

| Метод предобработки / Pretreatment methods | Показатель / Indicator | | |
|---|--|--|---|
| | Полученная энергия, ккал/л / Received energy, kcal/l | Затраченная энергия, ккал/л / Expended energy, kcal/l | Отношение полученной энергии к затраченной / Ratio of received energy to spent energy |
| Без обработки / Without pretreatment | 71 | 53 | 1,36 |
| Кислотный гидролиз / Acid hydrolysis | 71 | 673 | 0,11 |
| Щелочной гидролиз / Alkaline hydrolysis | 76 | 1 878 | 0,04 |
| Термощелочной гидролиз / Thermal alkaline hydrolysis | 83 | 1 880 | 0,04 |
| Термогидролиз / Thermal hydrolysis | 84 | 54 | 1,55 |
| Механическое измельчение/ Mechanical grinding | 73 | 120 | 0,61 |
| Ультразвук, 100 Вт·ч/л / Ultrasound, 100 Wh/l | 82 | 283 | 0,30 |
| Ультразвук, 30 Вт·ч/л / Ultrasound, 30 Wh/l | 79 | 122 | 0,65 |
| Ультразвук, 3 Вт·ч/л / Ultrasound, 3 Wh/l | 81 | 59 | 1,37 |

концентрации на единицу объема обрабатываемого вещества⁴.

АВС представляет собой полый цилиндр диаметром 50–150 мм, изготовленный из ферромагнитного материала и помещенный в индуктор. В качестве индуктора, как правило, применяется статор асинхронного электродвигателя. В полом цилиндре на исходный субстрат воздействуют электромагнитное поле, создаваемое обмотками индуктора, и интенсивно движущиеся ферромагнитные тела, движение которых хаотично, причем направление движения они меняют с частотой, равной частоте тока, подаваемого на обмот-

ки индуктора. При этом величину силы тока, подаваемого на обмотки статора, ограничивают в соответствии с характеристиками индуктора. Так что в тех зонах полого цилиндра, где возникают электромагнитные поля, в буквальном смысле создается вихревой слой, из-за чего рассматриваемые аппараты и получили свое название. В этом слое реализуются все возможные виды воздействия на измельчаемый материал: удар, истирание, кавитация, даже происходит электролиз, если в системе есть вода⁵.

В рабочую зону АВС помещаются ферромагнитные рабочие тела, которые под воздействием вращающегося элек-

⁴ Лимаренко Н. В. Обоснование параметров активатора обеззараживания стоков животноводческих предприятий: дис. ... канд. техн. наук. Ростов-на-Дону, 2018. 160 с.

⁵ Там же.

ромагнитного поля вращаются вокруг своей наименьшей оси со скоростью, близкой к скорости вращения магнитного поля, одновременно перемещаются по рабочей зоне. Таким образом, каждое ферромагнитное рабочее тело является своеобразной мешалкой, которая приводит к быстрому перемешиванию и диспергированию компонентов.

При такой обработке достигаются следующие положительные эффекты:

1. Тонкодисперсное измельчение, позволяющее улучшить реологические свойства субстрата, а также обеспечить нагрев субстрата при одновременном частичном гидролизе сложных органических соединений, что приводит к улучшенной доступности питательных веществ для микроорганизмов⁶.

2. Внесение в субстрат ферромагнитных частиц истираемых рабочих тел (стальные иглы), что позволяет сократить продолжительность периода запуска биореактора, а также обеспечить более полное разложение субстрата и снижение необходимого объема биореактора, что, в свою очередь, увеличивает скорость образования и конечный выход метана, при одновременном повышении адаптивной способности микробного сообщества к неблагоприятным условиям (снижение рН при избыточном накоплении летучих жирных кислот (ЛЖК) или водорода)⁷.

Для исследования процесса предварительной обработки органических отходов в лаборатории биоэнергетических и сверхкритических технологий ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» создана экспериментальная установка – аппарат вихревого магнитного слоя. Внешний

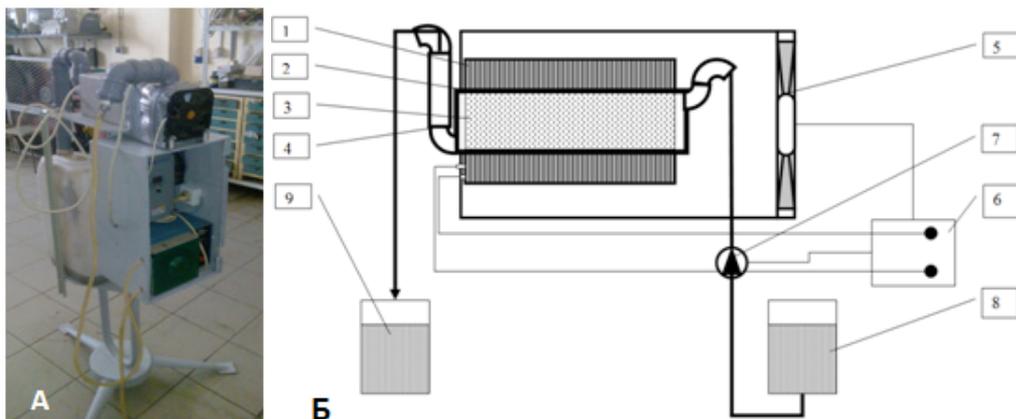
вид и технологическая схема экспериментальной установки представлены на рисунке 1.

Установка работает следующим образом. В емкость исходного продукта загружаются жидкие органические отходы. Насос прокачивает смесь со скоростью 2 л/мин по рабочей камере. В рабочую камеру предварительно внесены истираемые рабочие тела (стальные иглы) 3, которые под воздействием электромагнитного поля, создаваемого индуктором, совершают хаотичные движения. Электромагнитное поле вращается с частотой, отличной от промышленной (свыше 50 Гц, но не более 120 Гц) за счет использования частотного преобразователя, смонтированного в шкафу управления. При этом частотный преобразователь ограничивает силу тока, подаваемого в индуктор. Для охлаждения индуктора применяется вентилятор воздушного охлаждения. Предварительно обработанный субстрат после прохождения по рабочей камере через патрубок выгрузки сливается в емкость. Техническая характеристика экспериментальной установки приведена в таблице 2.

Субстратом для обработки в аппарате вихревого слоя служила смесь модели органической фракции твердых коммунальных отходов (комбикорм К-65) и водопроводной воды в соотношении 300 г/л. Субстрат изготавливался следующим образом: навеску гранулированного комбикорма заливали теплой (45 °С) водопроводной водой и выдерживали для набухания гранул в течение 2 ч при комнатной температуре. Обработку в АВС проводили с различным временем пребывания смеси воды

⁶ Там же; **Логвиненко Д. Д., Шеляков О. П.** Интенсификация технологических процессов в аппаратах с вихревым слоем. Киев: Техника, 1976. 113 с.

⁷ **Лимаренко Н. В.** Обоснование параметров активатора обеззараживания стоков животноводческих предприятий; **Логвиненко Д. Д., Шеляков О. П.** Интенсификация технологических процессов в аппаратах с вихревым слоем; **Адошев А. И.** Ферровихревой аппарат для обеззараживания жидкого свиного навоза: дис. ... канд. техн. наук. Ставрополь, 2011. 190 с.



Р и с. 1. Общий вид и технологическая схема экспериментальной установки по предобработке органических отходов в аппарате вихревого слоя перед анаэробным сбраживанием:

1 – индуктор; 2 – рабочая камера; 3 – стальные иглы; 4 – патрубок выгрузки;
 5 – вентилятор воздушного охлаждения; 6 – шкаф управления с частотным преобразователем;
 7 – перистальтический насос; 8 – емкость исходного продукта;
 9 – емкость обработанного продукта

F i g. 1. General view and technological scheme of the experimental plant for pretreatment of organic waste in the vortex layer apparatus before anaerobic digestion: 1 – inductor; 2 – working chamber; 3 – steel needles; 4 – discharge pipe; 5 – air cooling fan; 6 – control box with frequency converter; 7 – peristaltic pump; 8 – initial product tank; 9 – processed product tank

Т а б л и ц а 2

T a b l e 2

Техническая характеристика установки
Technical characteristics of the installation

| Показатели / Indicator | Значение / Value |
|--|------------------------------|
| Напряжение питания, В / Supply voltage, V | 380 |
| Объем камеры, дм ³ / Chamber volume, dm ³ | 0,5 |
| Материал камеры / Chamber material | полипропилен / polypropylene |
| Общая масса рабочих тел, г / Total mass of working bodies, g | 100 |
| Диаметр рабочего тела, мм / Working body diameter, mm | 2 |
| Длина рабочего тела, мм / Working body length, mm | 20 |
| Частота вращения поля, Гц / Frequency of the field, Hz | 50–120 |
| Производительность, дм ³ /мин / Production capacity, dm ³ /min | 2 |
| Гидравлическое время удержания, с / Hydraulic retention time, s | 15 |
| Установленная мощность, кВт / Installed power, kW | 1,3 |

и комбикорма К-65 в аппарате, а именно 0,5; 1,0; 2,0 и 4,0 мин. Частота вращения магнитного поля была постоянной и составляла 120 Гц. Обработанный субстрат хранили в холодильнике при температуре 4 °С в течение 7 суток до постановки эксперимента по анаэробному сбраживанию.

Результаты исследования

Для расчета энергетической эффективности процесса предварительной обработки органических отходов в аппарате вихревого слоя перед анаэробным сбраживанием были определены материальный и энергетический балансы процесса.

Общий вид материального баланса процесса предварительной обработки органических отходов в аппарате вихревого слоя выглядит следующим образом⁸:

$$G_{исх} + G_{иро} = G_{инф}, \quad (1)$$

где $G_{исх}$ – удельная суточная подача исходных органических отходов в аппарат предварительной обработки перед анаэробной биоконверсией в реакторах, кг/кг_{овин}, где кг_{овин} – килограмм органического вещества в исходных органических отходах; $G_{иро}$ – удельное суточное количество стираемого рабочего органа, попадающего в субстрат, определяется по формуле (2), кг/кг_{овин}; $G_{инф}$ – удельный выход предварительно обработанных органических отходов, кг/кг_{овин}.

Удельное суточное количество стираемого рабочего органа, попадающего в субстрат, будет равно:

$$G_{иро} = k \cdot m_{иро}, \quad (2)$$

где k – коэффициент истирания рабочего органа, определяется по формуле (3); $m_{иро}$ – масса стираемого рабочего органа в аппарате вихревого слоя, кг/кг_{овин}.

Коэффициент истирания рабочего органа зависит от продолжительности предварительной обработки и частоты магнитного поля:

$$k = f(\tau; \nu), \quad (3)$$

где τ – продолжительность предварительной обработки органических отходов в аппарате вихревого слоя, с/сут; ν – частота магнитного поля аппарата вихревого слоя, Гц.

Общий вид энергетического баланса предварительной обработки органических отходов в аппарате вихревого слоя выглядит следующим образом:

$$(G \cdot c \cdot t)_{исх} + (G \cdot c \cdot t)_{иро} + E_{об} = (G \cdot c \cdot t)_{инф} + Q_{охл}, \quad (4)$$

где $t_{исх}$ – температура исходных органических отходов, подаваемых в аппарат предварительной обработки перед сбраживанием в анаэробных реакторах, °С; c – теплоемкость, кВт·ч/(кг·°С); $E_{об}$ – удельное количество энергии, затраченное на функционирование оборудования, обеспечивающего предварительную обработку органических отходов перед сбраживанием в анаэробных биореакторах, кВт·ч^{эл.эн}/кг_{овин}; $Q_{охл}$ – удельный расход энергии на компенсацию тепловых потерь с охлаждающим агентом, кВт·ч^{эл.эн}/кг_{овин}.

Удельное количество энергии, затраченное на функционирование оборудования, обеспечивающего предварительную обработку органических

⁸ Методы оценки энергетического потенциала возобновляемых источников по сельским регионам. Теоретические и конструктивные основы функционирования инновационных преобразователей энергии и возобновляемых источников различного типа с определением их основных параметров в составе автономных (локальных) энергосетей, различных способов биоэнергетической переработки органических отходов / Л. Ю. Юферев [и др.]. Отчет о НИР / НИОКР, рег. № АААА-А17-117091540015-4, 2017. 198 с.

отходов перед сбраживанием в анаэробных биореакторах, будет равно:

$$E_{об} = E_{вент} + E_n + E_{ABC}, \quad (5)$$

где $E_{вент}$ – удельное количество энергии, затраченное на подачу охлаждающего агента к катушке аппарата вихревого слоя, кВт·ч^{эл.эн.}/кг_{овин.}; E_n – удельное количество энергии, затраченное на подачу исходных органических отходов в рабочую камеру аппарата вихревого слоя, кВт·ч^{эл.эн.}/кг_{овин.}; E_{ABC} – удельное количество энергии, затраченное на создание электромагнитного поля в рабочей камере аппарата вихревого слоя, обеспечивающего воздействие истираемого рабочего органа на обрабатываемые органические отходы, кВт·ч^{эл.эн.}/кг_{овин.}.

Удельный расход энергии на компенсацию тепловых потерь с охлаждающим воздухом [кВт·ч^{т.эн.}/кг_{овин.}] будет равен:

$$Q_{охл} = G_{охл} \cdot c_{охл} \cdot (t_{охл}^{cp} - t_B) \cdot \tau, \quad (5)$$

где $G_{охл}$ – удельная подача охлаждающего агента к катушке аппарата вихревого слоя, кг/(с·кг_{овин.}); $c_{охл}$ – теплоемкость охлаждающего агента, кВт·ч/(кг·°C); $t_{охл}^{cp}$ – средняя температура охлаждающего агента, удаляемого из охлаждающих камер катушки аппарата вихревого слоя, °C; t_B – температура наружного воздуха, °C.

Помимо предварительной обработки органических отходов в аппарате вихревого слоя перед анаэробной биоконверсией в биореакторах, для подготовки исходных органических отходов к анаэробному сбраживанию необходимо затратить тепловую энергию на предварительный нагрев исходных органических отходов [кВт·ч^{т.эн.}/кг_{овин.}] в удельном количестве, равном:

$$Q_{ABC_H} = \frac{c_{инф} \cdot G_{инф} \cdot (t_{MT} - t_{инф})}{3600}, \quad (7)$$

где $c_{инф}$ – теплоемкость субстрата, получаемого после предварительной обработки органических отходов в аппарате вихревого слоя, кДж/(кг·°C); t_{MT} – конечная температура нагрева субстрата, °C.

Энергетический анализ процесса предварительной обработки органических отходов перед сбраживанием в анаэробных биореакторах

Энергетическая эффективность процесса предварительной обработки органических отходов перед сбраживанием в анаэробных биореакторах, будет обеспечена при соблюдении следующего условия:

$$\left(\frac{(G_{ABC_{бг}} \cdot \lambda_{ABC_{бг}}) \cdot \frac{\eta_i}{100} - Q_{ABC_H}}{3600} - \left(\frac{(G_{бг} \cdot \lambda_{бг}) \cdot \frac{\eta_i}{100} - Q_H}{3600} \right) \right) \geq E_{об}, \quad (8)$$

где $G_{ABC_{бг}}$ – удельный выход биогаза из анаэробного биореактора с предварительной обработкой органических отходов в аппарате вихревого слоя, кг/кг_{овин.}; $\lambda_{ABC_{бг}}$ – теплота сгорания биогаза, полученного при сбраживании в анаэробном биореакторе с предварительной обработкой органических отходов в аппарате вихревого слоя, кДж/кг; η_i – КПД преобразования энергии полученного биогаза в i -й вид энергии, %; $G_{бг}$ – удельный выход биогаза из анаэробного биореактора без предварительной обработки органических отходов в аппарате вихревого слоя, кг/кг_{овин.}; $\lambda_{бг}$ – теплота сгорания биогаза, полученного при сбраживании в анаэробном биореакторе без предварительной обработки органических отходов в аппарате вихревого слоя, кДж/кг; Q_H – удельный расход тепловой энергии на предварительный нагрев исходных органических отходов при сбраживании в анаэробном

биореакторе без предварительной обработки органических отходов в аппарате вихревого слоя, кВт·ч^{т.эн.}/кг_{овинн.}.

Преобразуя выражение (8), получаем:

$$\frac{\Delta(G_{\text{бр}} \cdot \lambda_{\text{бр}}) \cdot \frac{\eta_i}{100}}{3600} \geq E_{\text{об}} + \Delta Q_{\text{н}}, \quad (9)$$

где $\Delta(G_{\text{бр}} \cdot \lambda_{\text{бр}})$ – разность удельных количеств энергий биогаза, полученного при сбраживании в анаэробных биореакторах с предварительной обработкой органических отходов в АВС и без нее, кДж/ кг_{овинн.}; $\Delta Q_{\text{н}}$ – разность удельных затрат тепловой энергии на предварительный нагрев исходных органических отходов перед сбраживанием в анаэробных биореакторах с предварительной обработкой органических отходов в АВС и без нее, кВт·ч^{т.эн.}/ кг_{овинн.}.

$$\Delta Q_{\text{н}} = Q_{\text{н}}^{\text{АВС}} - Q_{\text{н}}. \quad (10)$$

Исходя из полученных результатов анаэробного сбраживания модели органической фракции твердых коммунальных отходов, целесообразно обрабатывать соответствующие органические отходы в АВС в течение не более 0,5 минуты, так как прирост выхода метана при большей длительности обработки не существен [29].

Предобработка в АВС приводила к значительному улучшению характеристик последующего анаэробного сбраживания субстрата. Так, удельный выход биогаза увеличивался на 25 %, а метана на 80 %. Степень анаэробного разложения органического вещества субстрата после обработки в АВС увеличилась в среднем на 16 %. Скорость образования метана при анаэробном сбраживании субстрата после обработки в АВС увеличилась на 50 % [29].

Известно, что КПД преобразования потенциальной энергии газообразных энергоносителей в теплоту составляет 80–95 % при использовании водогрейных котлов и 45–50 % при использовании когенерационных установок, а в электрическую энергию – 10–45 %⁹.

Исходя из производительности установки по предобработке органических отходов в аппарате вихревого слоя, перед анаэробным сбраживанием суточное количество предварительно обработанного в аппарате вихревого слоя субстрата составит 60 м³¹⁰.

Расход электроэнергии, затраченной на функционирование оборудования, обеспечивающего предварительную обработку органических отходов перед сбраживанием в анаэробных биореакторах, составит 30 кВт·ч (6,55 Вт·ч^{эл.эн.}/кг_{овинн.}) при ежесуточной загрузке 60 м³ и времени обработки 30 секунд. При этом температура исходных органических отходов увеличится на 4 °С.

Удельный расход теплоты на предварительный нагрев субстрата до температуры брожения $Q_{\text{н}}^{\text{АВС}}$ составит 2 842 кВт·ч (620,31 Вт·ч^{т.эн.}/кг_{овинн.}), что меньше, чем удельный расход теплоты на предварительный нагрев органических отходов при анаэробной биоконверсии в биореакторе без предварительной обработки органических отходов в аппарате вихревого слоя $Q_{\text{н}}$, равный 3 112,7 кВт·ч (679,38 Вт·ч^{т.эн.}/кг_{овинн.}). Таким образом, разность удельных затрат тепловой энергии на предварительный нагрев исходных органических отходов перед анаэробной биоконверсией в биореакторах с предварительной обработкой органических отходов в АВС и без нее $\Delta Q_{\text{н}}$ равна 270,7 кВт·ч (59,08 Вт·ч^{т.эн.}/кг_{овинн.}).

Исходя из вышеизложенного, значения левой части неравенства (9) при использовании всего биогаза в различных

⁹ Ковалев А. А. Повышение энергетической эффективности биогазовых установок: дис. ... канд. техн. наук. М., 2014. 119 с.

¹⁰ Лимаренко Н. В. Обоснование параметров активатора обеззараживания стоков животноводческих предприятий.

технических средствах преобразования энергии газообразного энергоносителя будут больше значений правой части неравенства (9), следовательно, условие энергетической эффективности процесса предварительной обработки органических отходов перед сбраживанием в анаэробных биореакторах соблюдается, несмотря на то, что для интеграции процесса предварительной обработки органических отходов перед сбраживанием в анаэробных биореакторах необходимо дополнительно затрачивать электрическую энергию.

Сравнение энергетических показателей процесса анаэробного сбраживания жидких органических отходов в метантенках с предварительной обработкой исходного субстрата в аппарате

вихревого слоя и без нее с применением различных систем энергоснабжения приведено в таблице 3.

Результаты энергетического анализа процесса предварительной обработки органических отходов в аппарате вихревого слоя перед анаэробной биоконверсией в биореакторах с применением различных систем энергоснабжения, включающие в себя значения увеличения удельного количества товарной энергии, приведены в таблице 4.

Полученные значения увеличения выхода товарной энергии биогаза справедливы для анаэробной переработки 60 м³/сут субстрата, предварительно подготовленного в аппарате вихревого слоя при времени удержания в последнем не менее 30 с.

Т а б л и ц а 3

T a b l e 3

Сравнение энергетических показателей применяемых систем
Comparison of energy performance of the systems

| Параметры / Parameters | TMT/ TMT* | ABC / AVL** | Отношение ABC к TMT / Ratio of AVL to TMT |
|---|----------------------|------------------------|---|
| Выход биогаза $G_{бр}$ / Biogas yield $G_{бр}$: – м ³ /сут / m ³ /day; – м ³ /кг _{овин} / m ³ /kg _{omin} | 875,544 0,191 | 1 030,860 0,225 | 1,18 1,18 |
| Теплотворная способность биогаза $\lambda_{бр}$, кДж/ м ³ / Calorific value of biogas $\lambda_{бр}$, kJ/m ³ | 14,375 | 20,583 | 1,43 |
| Энергия полученного биогаза $Q_{бр}$ / Energy of biogas $Q_{бр}$: – кВт·ч/сут / kWh/day; – Вт·ч/кг _{овин} / Wh/kg _{omin} | 3 496,096 762,674 | 5 893,940 1 286,440 | 1,69 1,69 |
| Затраты тепловой энергии на собственные нужды системы $Q_{сн}$ / Thermal energy costs for system's own needs $Q_{сн}$: – кВт·ч ^{т.эн.} /сут / kWh ^{thermal} /day; – Вт·ч ^{т.эн.} /кг _{овин} / Wh ^{thermal} /kg _{omin} | 3 292,000 718,530 | 3 022,000 659,590 | 0,92 0,92 |
| Затраты электроэнергии на собственные нужды системы $E_{сн}$ / Electricity costs for system's own needs $E_{сн}$: – кВт·ч ^{эл.эн.} /сут / kWh ^{electrical} /day; – Вт·ч ^{эл.эн.} /кг _{овин} / Wh ^{electrical} /kg _{omin} | 101,000 22,040 | 131,000 28,590 | 1,30 1,30 |

Примечание / Note:

* анаэробное сбраживание без предобработки / anaerobic digestion without pretreatment;

** анаэробное сбраживание с предварительной обработкой в аппарате вихревого слоя / anaerobic digestion with pretreatment in the vortex layer apparatus

Т а б л и ц а 4
T a b l e 4

Увеличение выхода товарной энергии различных видов (результаты энергетического анализа)

Increasing the yield of commodity energy of different types (results of the energy analysis)

| Виды товарной энергии / Types of commercial energy | Энергоснабжение / Energy supply | | |
|---|---|--|--|
| | ЭЭ* и ТЭ** от внешних источников / EE and TE from external sources | ЭЭ от внешних источников, ТЭ от собственной котельной / EE from external sources, TE from own boiler house | собственное, от когенерационной установки / own, from cogeneration plant |
| Биогаз $T_{бр}$ / Biogas $T_{бр}$: – Вт·ч/кг _{ов. ин.} / Wh/kg _{omin} ; – кВт·ч/сут / kWh/day. | 523,36 2 397,85 | – – | – – |
| Теплота T_Q / Heat T_Q : – Вт·ч ^{т.эн.} /кг _{ов ин} / Wh ^{thermal} /kg _{omin} ; – кВт·ч ^{т.эн.} /сут / kWh ^{thermal} /day. | 59,08 270,70 | 556,28 2 548,65 | 320,76 1 469,62 |
| Электричество T_E / Electricity T_E : – Вт·ч ^{эл.эн.} /кг _{ов ин} / Wh ^{electrical} /kg _{omin} ; – кВт·ч ^{эл.эн.} /сут / kWh ^{electrical} /day. | –6,55 –30,00 | –6,55 –30,00 | 150,46 689,35 |

Примечание / Note:

* электроэнергия / electrical energy;

** тепловая энергия / thermal energy.

Обсуждение и заключение

Интеграция процесса предварительной обработки органических отходов перед анаэробной биоконверсией в биореакторах в систему анаэробной обработки органических отходов позволяет повысить как энергетическую эффективность системы при условии использования технических средств преобразования потенциальной энергии газообразного энергоносителя с КПД не ниже, чем КПД технических средств, применяемых при расчете, так и степень анаэробного разложения органического вещества органических отходов за счет тонкодисперсного измельчения. При этом следует учитывать довольно узкий диапазон нагрузок по органическому веществу анаэробных биореакторов первого поколения, а также количество органического вещества, переведенного в растворенную форму при предварительной обработке в ап-

парате вихревого слоя, что напрямую будет влиять на выход биогаза из анаэробных биореакторов.

По сравнению с анаэробной обработкой в традиционных метантенках применение предварительной обработки органических отходов в аппарате вихревого слоя перед сбраживанием в анаэробных биореакторах позволяет повысить удельный выход биогаза не менее чем в 1,18 раза при одновременном увеличении содержания метана в биогазе и, как следствие, его теплотворной способности, что соответствует увеличению удельного количества энергии полученного биогаза не менее чем в 1,69 раза. При этом удельное потребление электроэнергии увеличивается на 30 % при снижении удельного потребления теплоты на 8 %, а общее энергопотребление составляет не более 60 % от энергии полученного биогаза при условии использования техниче-

ских средств преобразования потенциальной энергии газообразных энергоносителей с КПД не ниже, чем КПД технических средств, применяемых при расчете.

Таким образом, удельное количество энергии биогаза, полученного в процессе сбраживания в анаэробных биореакторах с применением предварительной обработки субстрата в аппарате вихревого слоя, полностью компен-

сирует затраты энергии на предварительную обработку субстрата в аппарате вихревого слоя. При этом удельный выход товарной энергии увеличивается на 70 %, по сравнению с анаэробной обработкой в традиционных метантенках.

Однако следует учитывать, что значения удельных выходов биогаза получены в периодическом режиме при термофильных условиях сбраживания субстрата с высокой степенью разложения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Патент № 2507241 Российская Федерация, МПК C10L 5/00 (2006.01). Брикет на основе спрессованного лигноцеллюлозного тела, пропитанного жидким топливом : № 2012108893/04 : заявл. 07.03.2012 : опубл. 20.02.2014 / Фуасак Г., Плион П., Фише В. [и др.] ; патентообладатель «Электрисите де Франс». – 11 с. : ил. 2012. URL: <http://www.freepatent.ru/images/patents/505/2507241/patent-2507241.pdf> (дата обращения: 20.02.2020).

2. Патент № 2507242 Российская Федерация, МПК C10L 5/14 (2006.01). Способ брикетирования отходов жизнедеятельности животных и птицы и устройство для его осуществления : № 2012146319/04 : заявл. 30.10.2012 : опубл. 20.02.2014 / Старших В. В., Максимов Е. А. ; патентообладатель ФГБОУ ВО «Челябинская государственная агроинженерная академия». – 6 с. : ил. URL: <http://www.freepatent.ru/images/patents/505/2507242/patent-2507242.pdf> (дата обращения: 20.02.2020).

3. Sommer, P. Potential for Using Thermophilic Anaerobic Bacteria for Bioethanol Production from Hemicellulose / P. Sommer, T. Georgieva, B. K. Ahring. – DOI 10.1042/bst0320283 // Biochemical Society Transactions. – 2004. – Vol. 32, issue 2. – Pp. 283–289. URL: <https://portlandpress.com/biochemsoctrans/article-abstract/32/2/283/63941/Potential-for-using-thermophilic-anaerobic?redirectedFrom=fulltext> (дата обращения: 20.02.2020).

4. Сенько, О. В. Трансформация биомассы фототрофных микроорганизмов в метан / О. В. Сенько, М. А. Гладченко, И. В. Лягин [и др.] // Альтернативная энергетика и экология. – 2012. – № 3 (107). – С. 89–94. URL: <http://naukarus.com/transformatsiya-biomassy-fototrofnyh-mikroorganizmov-v-metan> (дата обращения: 20.02.2020). – Рез. англ.

5. Кевбрина, М. В. Сравнение разных методов предобработки осадков сточных вод для интенсификации процесса метанового сбраживания / М. В. Кевбрина, Н. Г. Газизова, В. Г. Коробцова // Водоочистка. – 2013. – № 1. – С. 22–28.

6. Патент № 2518068 Российская Федерация, МПК C10L5/44. Способ получения гранул или брикетов : № 2011129312/04 : заявл. 05.10.2009 : опубл. 20.01.2013 / Гренн А. Й. ; патентообладатель : «Зилха байомасс фьюэлз ай ЭлЭлСи». – 18 с. : ил. URL: http://www.freepatent.ru/images/img_patents/2/2518/2518068/patent-2518068.pdf (дата обращения: 20.02.2020).

7. Кузнецов, Б. Н. Актуальные направления химической переработки возобновляемой растительной биомассы / Б. Н. Кузнецов // Химия в интересах устойчивого развития. – 2011. – Т. 19, № 1. – С. 77–85. URL: <https://www.sibran.ru/upload/iblock/20e/20e075ccdd1508ec3ef2795a6adb74ae.pdf> (дата обращения: 20.02.2020).

8. Сергеева, Я. Э. Липиды мицелиальных грибов как основа для получения биодизельного топлива / Я. Э. Сергеева, Л. А. Галанина, Д. А. Андрианова [и др.] // Прикладная биохимия и микробиология. – 2008. – Т. 44, № 5. – С. 576–581. URL: <http://naukarus.com/lipidy-mitselialnyh-gribov-kak-osnova-dlya-polucheniya-biodizelnogo-topliva> (дата обращения: 20.02.2020).

9. **Систер, В. Г.** Технологии получения биодизельного топлива / В. Г. Систер, Е. М. Иванникова, А. И. Ямчук // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. – 2013. – Т. 2, № 3. – С. 109–112. URL: <https://cyberleninka.ru/article/v/tehnologii-polucheniya-biodizelnogo-topliva> (дата обращения: 20.02.2020).

10. **Гумеров, Ф. М.** Перспективы использования суб- и сверхкритических флюидных сред при получении биодизельного топлива / Ф. М. Гумеров, Ф. Р. Габитов, Р. А. Газизов [и др.] // Сверхкритические флюиды: Теория и практика. – 2006. – Т. 1, № 1. – С. 66–76. URL: https://www.researchgate.net/publication/274391968_Future_Trends_of_Sub-_and_Supercritical_Fluids_Application_in_Biodiesel_Fuel_Production (дата обращения: 20.02.2020). – Рез. англ.

11. **Kalyuzhnyi, S. V.** The UASB Treatment of Winery Wastewater under Submesophilic and Psychrophilic Conditions / S. V. Kalyuzhnyi, M. A. Gladchenko, V. I. Sklyar [et al.] // Environmental Technology. – 2000. – Vol. 21. – Pp. 919–925. URL: http://www.enzyme.chem.msu.ru/ekbio/article/ET_2000_21.pdf (дата обращения: 20.02.2020).

12. **Sklyar, V. I.** Combined Biologic (Anaerobic-Aerobic) and Chemical Treatment of Starch Industry Wastewater / V. I. Sklyar, A. N. Eпов, M. A. Gladchenko [et al.] // Applied Biochemistry and Biotechnology. – 2003. – Vol. 109, issue 1–3. – Pp. 253–262. URL: <https://istina.cemi-ras.ru/publications/article/1671198/> (дата обращения: 20.02.2020).

13. **Калюжный, С. В.** Комбинированная биолого-химическая очистка сточных вод производства хлебопекарных дрожжей / С. В. Калюжный, М. А. Гладченко, Е. А. Старостина [и др.] // Производство спирта и ликероводочных изделий. – 2004. – № 3. – С. 10–14. URL: <http://www.enzyme.chem.msu.ru/ekbio/article/Vodka.pdf> (дата обращения: 20.02.2020).

14. **Варфоломеев, С. Д.** Химические основы биотехнологии получения топлив / С. Д. Варфоломеев, С. В. Калюжный, Д. Я. Медман. – DOI 10.1070/RC1988v057n07ABEN003383 // Успехи химии. – 1988. – Т. 57, № 7. – С. 1201–1231. URL: <http://mr.crossref.org/iPage?doi=10.1070%2FRC1988v057n07ABEN003383> (дата обращения: 20.02.2020). – Рез англ.

15. **Варфоломеев, С. Д.** Биотоплива / С. Д. Варфоломеев, Е. Н. Ефременко, Л. П. Крылова. – DOI 10.1070/RC2010v079n06ABEN004138 // Успехи химии. – 2010. – Т. 79, № 6. – С. 491–509. URL: <http://mi.mathnet.ru/rcr119> (дата обращения: 20.02.2020). – Рез англ.

16. **Хамидов, М. Г.** Отходы на службе энергетики города / М. Г. Хамидов, С. А. Стрельцов, Д. А. Данилович // Коммунальный комплекс России. – 2009. – № 2 (56). – С. 56–58. URL: <http://gkhprofi.ru/othody-na-sluzhbe-energetiki-goroda/> (дата обращения: 20.02.2020).

17. **Цавкелова, Е. А.** Получение биогаза из целлюлозосодержащих субстратов (обзор) / Е. А. Цавкелова, А. И. Нетрусов. – DOI 10.1134/S0003683812050134 // Прикладная биохимия и микробиология. – 2012. – Т. 48, № 5. – С. 1–15. URL: <https://link.springer.com/article/10.1134%2FS0003683812050134> (дата обращения: 20.02.2020). – Рез англ.

18. **Appels, L.** Principles and Potential of the Anaerobic Digestion of Waste-Activated Sludge / L. Appels, J. Baeyens, J. Degève [et al.]. – DOI 10.1016/j.pecs.2008.06.002 // Progress in Energy and Combustion Science. – Vol. 34, issue 6. – Pp. 755–781. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360128508000312?via%3Dihub> (дата обращения: 20.02.2020).

19. **Lu, J.** Optimization of Anaerobic Digestion of Sewage Sludge Using Thermophilic Anaerobic Pre-Treatment / J. Lu. – Lyngby : Technical University of Denmark, 2006. – 60 p. URL: <https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/4692519/Thesis.pdf> (дата обращения: 20.02.2020).

20. **Zhang, D. Q.** Municipal Solid Waste Management in China: Status, Problems and Challenges / D. Q. Zhang, S. K. Tan, R. M. Gersberg. – DOI 10.1016/j.jenvman.2010.03.012 // Journal of Environmental Management. – 2010. – Vol. 91, issue 8. – Pp. 1623–1633. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479710000848> (дата обращения: 20.02.2020).

21. **Walley, P.** Optimizing Thermal Hydrolysis for Reliable High Digester Solids: Loading and Performance / P. Walley // Proceedings of the 12th European Biosolids and Organic Resources Conference. – Manchester : Aqua Enviro, 2007. URL: <https://www.environmental-expert.com/articles/optimising-thermal-hydrolysis-for-reliable-high-digester-solids-loading-and-performance-26250> (дата обращения: 20.02.2020).

22. Храменков, С. В. Повышение эффективности обработки осадка сточных вод с помощью высокотемпературного гидролиза перед сбраживанием / С. В. Храменков, А. Н. Пахомов, С. А. Стрельцов [и др.] // Водоснабжение и санитарная техника. – 2012. – № 10. – С. 55–60. URL: <http://docplayer.ru/69901569-Povyshenie-effektivnosti-obrabotki-osadka-stochnyh-vod-s-pomoshchuyvysokotemperaturnogo-gidroliza-pered-sbrazhivaniem.html> (дата обращения: 20.02.2020). – Рез. англ.
23. Haug, R. T. Effect of Thermal Pretreatment on Digestibility and Dewaterability of Organic Sludges / R. T. Haug, D. C. Stuckey, J. M. Gossett [et al.] // Journal of the Water Pollution Control Federation. – 1978. – Vol. 50, issue 1. – Pp. 73–85. URL: https://www.jstor.org/stable/25039508?seq=1#page_scan_tab_contents (дата обращения: 20.02.2020).
24. Tiehm, A. Ultrasonic Waste Activated Sludge Disintegration for Improving Anaerobic Stabilization / A. Tiehm, K. Nickel, M. Zellhorn [et al.]. – DOI 10.1016/S0043-1354(00)00468-1 // Water Research. – 2001. – Vol. 35, issue 8. – Pp. 2003–2009. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135400004681?via%3Dihub> (дата обращения: 20.02.2020).
25. Henze, M. Hydrolysis of Particulate Substrate by Activated Sludge under Aerobic, Anoxic and Anaerobic Conditions / M. Henze, C. Mladenovski. – DOI 10.1016/0043-1354(91)90099-C // Water Research. – 1991. – Vol. 25, issue 1. – Pp. 61–64. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/004313549190099C?via%3Dihub> (дата обращения: 20.02.2020).
26. Messenger, J. R. Oxygen Utilization Rate as a Control Parameter for the Aerobic Stage in Dual Digestion / J. R. Messenger, H. A. Villiers, G. A. Ekama – DOI 10.2166/wst.1990.0116 // Water Science and Technology. – 1990. – Vol. 22, issue 12. – Pp. 217–227. URL: <https://iwaponline.com/wst/article-abstract/22/12/217/23761/Oxygen-Utilization-Rate-as-a-Control-Parameter-for?redirectedFrom=fulltext> (дата обращения: 20.02.2020).
27. McIntosh, K. B. Volatile Fatty Acid Production in Aerobic Thermophilic Pre-Treatment of Primary Sludge / K. B. McIntosh, J. A. Oleszkiewicz. – DOI 10.1016/S0273-1223(97)00682-3 // Water Science and Technology. – 1997. – Vol. 36, issue 11. – Pp. 189–196. URL: <https://iwaponline.com/wst/article-abstract/36/11/189/7025/Volatile-fatty-acid-production-in-aerobic> (дата обращения: 20.02.2020).
28. Гюнтер, Л. И. Тенденции в развитии метанового брожения органических отходов / Л. И. Гюнтер, З. М. Кольцова // Водоснабжение и санитарная техника. – 1993. – № 9. – С. 13–15.
29. Litt, Yu. Increasing the Efficiency of Organic Waste Conversion into Biogas by Mechanical Pretreatment in an Electromagnetic Mill / Yu. Litt, D. Kovalev, A. Kovalev [et al.]. – DOI 10.1088/1742-6596/1111/1/0120132018 // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1111, issue 1. – Pp. 1–8. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1111/1/012013> (дата обращения: 20.02.2020).

Поступила 02.09.2019; принята к публикации 16.10.2019; опубликована онлайн 31.03.2020

Об авторах:

Ковалев Андрей Александрович, старший научный сотрудник лаборатории 14.4 биоэнергетических и сверхкритических технологий ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (109428, Россия, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), кандидат технических наук, Researcher ID: F-7045-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1983-3454>, Scopus ID: 57205285134, kovalev_ana@mail.ru

Ковалев Дмитрий Александрович, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией 14.4 биоэнергетических и сверхкритических технологий ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (109428, Россия, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), кандидат технических наук, Researcher ID: K-4810-2015, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3603-3686>, kovalev_da80@mail.ru

Григорьев Виктор Степанович, главный научный сотрудник лаборатории 14.4. биоэнергетических и сверхкритических технологий ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (109428, Россия, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), доктор технических наук, Researcher ID: B-4331-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6555-1864>, 7458358@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

А. А. Ковалев – анализ литературных источников, разработка экспериментальной установки, проведение расчета энергетической эффективности, написание текста статьи; Д. А. Ковалев – научное руководство, постановка задач исследования, поиск и анализ литературных источников, разработка экспериментальной установки, написание текста статьи; В. С. Григорьев – поиск и анализ литературных источников, редактирование и доработка текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Briquette Based on Pressed Lignocellulose Body Saturated with Liquid Fuel: Patent 2507241 Russian Federation. No. 2012108893/04; appl. 07.03.2012; publ. 20.02.2014. Bulletin No. 5. 11 p. Available at: <http://www.freepatent.ru/images/patents/505/2507241/patent-2507241.pdf> (accessed 20.02.2020). (In Russ.)
2. Method of Briquetting Animal and Poultry Waste and Device for Its Implementation: Patent 2507242 Russian Federation. No. 2012146319/04; appl. 30.10.2012; publ. 20.02.2014. Bulletin No. 5. 6 p. Available at: <http://www.freepatent.ru/images/patents/505/2507242/patent-2507242.pdf> (accessed 20.02.2020). (In Russ.)
3. Sommer P., Georgieva T., Ahring B.K. Potential for Using Thermophilic Anaerobic Bacteria for Bioethanol Production from Hemicellulose. *Biochemical Society Transactions*. 2004; 32(2):283-289. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1042/bst0320283>
4. Senko O.V., Gladchenko M.A., Lyagin I.V., et al. Biomass Transformation of Phototrophic Microorganisms to Methane. *Alternativnaya energetika i ekologiya* = International Journal of Alternative Energy and Ecology. 2012; (3):89-94. Available at: <https://portlandpress.com/biochemsoctrans/article-abstract/32/2/283/63941/Potential-for-using-thermophilic-anaerobic?redirectedFrom=fulltext> (accessed 20.02.2020). (In Russ.)
5. Kevbrina M.V., Gazizova N.G., Korobtsova V.G. Comparison of Different Methods of Sewage Sludge Pretreatment for Methane Digestion Intensification. *Vodoochistka* = Water Purification. 2013; (1):22-28. (In Russ.)
6. Production of Pellets or Briquettes: Patent 2518068 Russian Federation. No. 2011129312/04; appl. 05.10.2009; publ. 20.01.2013. Bulletin No. 16. 18 p. Available at: http://www.freepatent.ru/images/img_patents/2/2518/2518068/patent-2518068.pdf (accessed 20.02.2020). (In Russ.)
7. Kuznetsov B.N. Urgent Directions of Chemical Processing of Renewable Plant Biomass. *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya* = Chemistry for Sustainable Development. 2011; 19(1):77-85. Available at: <https://www.sibran.ru/upload/iblock/20e/20e075ccdd1508ec3ef2795a6adb74ae.pdf> (accessed 20.02.2020). (In Russ.)
8. Sergeeva Ya.E., Galanina L.A., Andrianova D.A., et al. Lipids of Filamentous Fungi as a Material for Producing Biodiesel Fuel. *Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya* = Applied Biochemistry and Microbiology. 2008; 44(5):576-581. Available at: <http://naukarus.com/lipidy-mitselialnyh-gribov-kak-osnova-dlya-polucheniya-biodizelnogo-topliva> (accessed 20.02.2020). (In Russ.)
9. Sister V.G., Ivannikova E.M., Yamchuk A.I. Technology for Biodiesel Production. *Izvestiya Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta MAMI* = MG TU MAMI Bulletin. 2013; 2(3):109-112. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/v/tehnologii-polucheniya-biodizelnogo-topliva> (accessed 20.02.2020). (In Russ.)
10. Gumerov F.M., Gabitov F.R., Gazizov R.A., et al. Future Trends of Sub- and Supercritical Fluids Application in Biodiesel Fuel Production. *Sverkhkriticheskie ftyuidy: Teoriya i praktika* = Supercritical Fluids: Theory and Practice. 2006; 1(1):66-76. Available at: https://www.researchgate.net/publication/274391968_Future_Trends_of_Sub-_and_Supercritical_Fluids_Application_in_Biodiesel_Fuel_Production (accessed 20.02.2020). (In Russ.)

11. Kalyuzhnyi S.V., Gladchenko M.A., Sklyar V.I., et al. The UASB Treatment of Winery Wastewater under Submesophilic and Psychrophilic Conditions. *Environmental Technology*. 2000; 21:919-925. Available at: http://www.enzyme.chem.msu.ru/ekbio/article/ET_2000_21.pdf (accessed 20.02.2020). (In Russ.)
12. Sklyar V.I., Epov A.N., Gladchenko M.A., et al. Combined Biologic (Anaerobic-Aerobic) and Chemical Treatment of Starch Industry Wastewater. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 2003; 109(1-3):253-262. Available at: <https://istina.cemi-ras.ru/publications/article/1671198/> (accessed 20.02.2020). (In Eng.)
13. Kalyuzhnyy S.V., Gladchenko M.A., Starostina Ye.A., et al. Combined Biological and Chemical Wastewater Treatment of Bakery Yeast Production. *Proizvodstvo spirta i likerovodochnykh izdeliy = Manufacture of Alcohol and Liquor Products*. 2004; (3):10-14. Available at: <http://www.enzyme.chem.msu.ru/ekbio/article/Vodka.pdf> (accessed 20.02.2020). (In Russ.)
14. Varfolomeev S.D., Kalyuzhnyy S.V., Medman D.Ya. Chemical Principles of the Biotechnology of the Preparation of Fuel. *Uspekhi khimii = Russian Chemical Reviews*. 1988; 57(7):1201-1231. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.1070/RC1988v057n07ABEH003383>
15. Varfolomeev S.D., Efremenko E.N., Krylova L.P. Biofuels. *Uspekhi khimii = Russian Chemical Reviews*. 2010; 79(6):491-509. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.1070/RC2010v079n06ABEH004138>
16. Khamidov M.G., Streltsov S.A., Danilovich D.A. Waste at the Service of the City Energy. *Kommunalnyy kompleks Rossii = Communal Complex of Russia*. 2009; (2):56-58. Available at: <http://gkh-profi.ru/othody-na-sluzhbe-energetiki-goroda/> (accessed 20.02.2020). (In Russ.)
17. Tsavkelova E.A., Netrusov A.I. Biogas Production from Cellulose-Containing Substrates: A Review. *Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya = Applied Biochemistry and Microbiology*. 2012; 48(5):1-15. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.1134/S0003683812050134>
18. Appels L., Baeyens J., Degreè J., et al. Principles and Potential of the Anaerobic Digestion of Waste-Activated Sludge. *Progress in Energy and Combustion Science*. 34(6):755-781. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2008.06.002>
19. Lu J. Optimization of Anaerobic Digestion of Sewage Sludge Using Thermophilic Anaerobic Pre-Treatment. Lyngby: Technical University of Denmark; 2006. 60 p. Available at: <https://back-end.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/4692519/Thesis.pdf> (accessed 20.02.2020). (In Eng.)
20. Zhang D.Q., Tan S.K., Gersberg R.M. Municipal Solid Waste Management in China: Status, Problems and Challenges. *Journal of Environmental Management*. 2010; 91(8):1623-1633. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.03.012>
21. Walley P. Optimizing Thermal Hydrolysis for Reliable High Digester Solids: Loading and Performance. In: Proceedings of the 12th European Biosolids and Organic Resources Conference. Manchester: Aqua Enviro; 2007. Available at: <https://www.environmental-expert.com/articles/optimising-thermal-hydrolysis-for-reliable-high-digester-solids-loading-and-performance-26250> (accessed 20.02.2020). (In Eng.)
22. Khramenkov S.V., Pakhomov A.N., Streltsov S.A., et al. Improving the Efficiency of Wastewater Sludge Pretreatment by High Temperature Hydrolysis before Digestion. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika = Water Supply and Sanitary Technique*. 2012; (10):55-60. Available at: <http://docplayer.ru/69901569-Povyshenie-effektivnosti-obrabotki-osadka-stochnyh-vod-s-pomoshchyu-vysokotemperaturnogo-gidroliza-pered-sbrazhivaniem.html> (accessed 20.02.2020). (In Russ.)
23. Haug R.T., Stuckey D.C., Gossett J.M., et al. Effect of Thermal Pretreatment on Digestibility and Dewaterability of Organic Sludges. *Journal of the Water Pollution Control Federation*. 1978; 50(1):73-85. Available at: https://www.jstor.org/stable/25039508?seq=1#page_scan_tab_contents (accessed 20.02.2020). (In Eng.)
24. Tiehm A., Nickel K., Zellhorn M., et al. Ultrasonic Waste Activated Sludge Disintegration for Improving Anaerobic Stabilization. *Water Research*. 2001; 35(8):2003-2009. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00468-1](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00468-1)
25. Henze M., Miadenovski C. Hydrolysis of Particulate Substrate by Activated Sludge under Aerobic, Anoxic and Anaerobic Conditions. *Water Research*. 1991; 25(1):61-64. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(91\)90099-C](https://doi.org/10.1016/0043-1354(91)90099-C)

26. Messenger J.R., Villiers H.A., Ekama G.A. Oxygen Utilization Rate as a Control Parameter for the Aerobic Stage in Dual Digestion Water Science and Technology. 1990; 22(12):217-227. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.1990.0116>
27. McIntosh K.B., Oleszkiewicz J.A. Volatile Fatty Acid Production in Aerobic Thermophilic Pre-Treatment of Primary Sludge. *Water Science and Technology*. 1997; 36(11):189-196. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(97\)00682-3](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(97)00682-3)
28. Gyunter L.I., Koltsova Z.M. Trends in Methane Disposal of Organic Waste. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika* = Water Supply and Sanitary Technique. 1993; (9):13-15. (In Russ.)
29. Litti Yu., Kovalev D., Kovalev A., et al. Increasing the Efficiency of Organic Waste Conversion into Biogas by Mechanical Pretreatment in an Electromagnetic Mill. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018; 1111(1):1-8. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1111/1/012013>

Received 02.09.2019; revised 16.10.2019; published online 31.03.2020

About the authors:

Andrey A. Kovalev, Senior Researcher of Laboratory of Bioenergy and Supercritical Technologies, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1st Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russia), Ph.D. (Engineering), Researcher ID: F-7045-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1983-3454>, Scopus ID: 57205285134, kovalev_ana@mail.ru

Dmitriy A. Kovalev, Senior Researcher of Laboratory Director of Bioenergy and Supercritical Technologies, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1st Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russia), Ph.D. (Engineering), Researcher ID: K-4810-2015, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3603-3686>, kovalev_da80@mail.ru

Victor S. Grigoriev, Chief Researcher of Laboratory Director of Bioenergy and Supercritical Technologies, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1st Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russia), D.Sc. (Engineering), Researcher ID: B-4331-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6555-1864>, 7458358@mail.ru

Contribution of the authors:

A. A. Kovalev – analysis of literary sources, development of the experimental unit, calculation of energy efficiency, writing the draft; D. A. Kovalev – scientific guidance, problem statement, search and analysis of literary sources, development of the experimental unit, writing the draft; V. S. Grigoriev – search and analysis of literary sources, editing and revision of the text.

All authors have read and approved the final manuscript.