

# ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ / PROCESSES AND MACHINES OF AGROENGINEERING SYSTEMS

УДК 628.336.3

doi: 10.15507/2658-4123.032.202201.010-027

Научная статья



## Методы обработки органосодержащего сырья перед анаэробным сбраживанием

**В. В. Пальвинский\***, **Ф. А. Васильев**, **В. К. Евтеев**  
*Иркутский ГАУ (пос. Молодежный, Российская Федерация)*  
\* [palvinskiy@igsha.ru](mailto:palvinskiy@igsha.ru)

### Аннотация

**Введение.** Накопленные объемы органосодержащих переработанных отходов в России увеличиваются. Существующие технологии позволяют перерабатывать такие отходы путем анаэробного сбраживания с получением биогаза и удобрений. Органическая часть отходов, в большинстве своем, состоит из труднорастворимых лигнина, целлюлозы и внеклеточных полимеров, затрудняющих анаэробную переработку. Для обеспечения биодоступности сырья для микроорганизмов и более глубокого разложения необходимо проводить предварительную обработку. Существует множество вариантов различных видов обработки, имеющих свои особенности воздействия на сырье. Для более ясного понимания процессов предварительной подготовки органического сырья перед анаэробным сбраживанием и повышения качества принимаемых решений необходимо выявить и систематизировать методы предварительной обработки.

**Материалы и методы.** Предметом исследования является воздействие методов, способов и частных приемов предобработки на анаэробное сбраживание. Основной метод исследования – анализ данных по применению различных методов для повышения биодоступности и степени разложения органических веществ отходов при анаэробном сбраживании.

**Результаты исследований.** Разработана схема подготовительных операций и методов предобработки органических отходов перед анаэробным сбраживанием. Выявлено, что каждый метод (механический, термический, электромагнитный, химический, биологический и комбинированный) содержит множество способов, которые подразделяются на частные приемы. Описаны механизмы воздействия, улучшающие дальнейшую переработку.

**Обсуждение и заключение.** Выбор того или иного метода и способа предобработки зависит от цели и выполняемых задач, физического и химического состава сырья, доступа к энергетическим, биологическим и химическим ресурсам. Преимущества и недостатки различных методов необходимо более подробно изучать и ранжировать на частные способы по энергетическим затратам и эффекту, который они дают. В ходе сопоставления результатов исследований выявлены недостатки и трудности.

© Пальвинский В. В., Васильев Ф. А., Евтеев В. К., 2022



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

**Ключевые слова:** органосодержащие отходы, предварительная обработка, биогаз, анаэробное сбраживание, биоразлагаемость, гидролиз, ацидогенез, ацетогенез, метаногенез

**Благодарности:** авторы благодарят анонимных рецензентов.

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

**Для цитирования:** Пальвинский В. В., Васильев Ф. А., Евтеев В. К. Методы обработки органосодержащего сырья перед анаэробным сбраживанием // Инженерные технологии и системы. 2022. Т. 32, № 1. С. 10–27. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202201.010-027>

*Original article*

## Methods of Pretreating Raw Materials Containing Organic Compounds before Anaerobic Digestion

V. V. Palvinskiy\*, F. A. Vasilev, V. K. Evteev

*Irkutsk State Agricultural University (Molodezhnyy, Russian Federation)*

\* [palvinskiy@igsha.ru](mailto:palvinskiy@igsha.ru)

### **Abstract**

**Introduction.** The volume of accumulated organ-containing non-recyclable waste products in Russia is increasing. Existing technologies make it possible to recycle these waste products through using anaerobic digestion to produce biogas and fertilizers. The organic portions of waste consist mostly of hard-to-degrade lignin, cellulose, and extracellular polymers, which make anaerobic digestion difficult. Pretreating is necessary to make the raw materials available to microorganisms for bioavailability and deeper degradation. There are many different types of pretreating with their own specific effects on the raw materials. To improve understanding the process of pretreating organic raw materials prior to anaerobic digestion, and to improve the quality of the decisions made, pretreatment methods need to be identified and systematized.

**Materials and Methods.** The subject of the study is the relationship between the effects of methods, techniques and specific operations of pretreatment for anaerobic digestion. The main method of this study is the analysis of data on the application of different methods to increase the bioavailability and degree of decomposition of organic matter of waste products during anaerobic digestion.

**Results.** The scheme of preparatory operations and methods for pre-treatment of organic waste products before anaerobic digestion is developed. It is revealed that each method (mechanical, thermal, electromagnetic, chemical, biological and combined) contains many practices, which are divided into particular techniques. The mechanisms of influence that improve further processing are described.

**Discussion and Conclusion.** The choice methods of pretreatment depends on the purpose and tasks performed, the physical and chemical composition of raw materials, access to energy, biological and chemical resources. Advantages and disadvantages of various methods should be studied in more detail and ranked into private methods according to energy costs and the effect they produce. The comparison of the research results reveals disadvantages and difficulties.

**Keywords:** organ-containing waste products, pre-treatment, biogas, anaerobic fermentation, biodegradability, hydrolysis, acidogenesis, acetogenesis, methanogenesis

**Acknowledgments:** The authors would like to thank the anonymous reviewers.

*The authors declare no conflict of interest.*

*For citation:* Palvinskiy V.V., Vasilev F.A., Evteev V.K. Methods of Pretreating Raw Materials Containing Organic Compounds before Anaerobic Digestion. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2022; 32(1):10-27. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202201.010-027>

## Введение

Ежегодно на территории Российской Федерации производится колоссальный объем органосодержащих отходов. К ним относятся отходы агропромышленного комплекса, осадки сточных вод и твердые бытовые отходы. В количественном выражении предприятия АПК, включающие отрасли животноводства, растениеводства и другие, ежегодно производят 772,6 млн т отходов с содержанием 228 млн т сухого вещества (СВ); города РФ – более 80 млн м<sup>3</sup> осадков сточных вод (ОСВ) с 3-процентным содержанием сухого вещества и около 30 млн т твердых бытовых отходов с содержанием 40–65 % СВ, из которых 68–80 % являются органическими [1]. Привлекательным способом переработки органосодержащего сырья является анаэробное сбраживание с получением биогаза и органических удобрений (в зависимости от исходного сырья).

Анаэробное сбраживание представляет собой сложный биологический процесс, состоящий из четырех этапов: гидролиз, ацидо-, ацето- и метаногенез<sup>1</sup>. Повлиять на процесс сбраживания возможно различными способами: управляя дозой загрузки, режимом сбраживания и др. [2–4].

Органические отходы содержат трудноразлагаемые соединения, поэтому высокий потенциал имеет предварительная подготовка субстрата, состоящая из сложного комплекса мероприятий, на всех этапах: от момента

образования отхода, доставки, обработки и до загрузки в реактор<sup>2</sup>. В этом комплексе особое место занимает операция, направленная на повышение биодоступности органического вещества (ОВ) субстрата, которая называется предварительной обработкой (предобработкой) [5; 6].

Цель исследования – систематизировать существующие методы предварительной обработки органосодержащего сырья для анаэробного сбраживания и определить особенности их использования.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- выявить существующие методы;
- описать механизм воздействия того или иного метода на органическое сырье;
- систематизировать данные методы в зависимости от рода преобладающих сил, участвующих в процессе деградации сырья.

## Обзор литературы

В мировой научной литературе наблюдается высокий интерес к методам предварительной обработки органических отходов. Данному вопросу посвящена обзорная работа, в которой рассматриваются методы и способы предобработки органических отходов, содержащих лигноцеллюлозу [5]. Рассмотрено действие некоторых способов на составляющие лигноцеллюлозы: целлюлозу, гемицеллюлозу и лигнин. Особое внимание авторы акцентируют на применении термических методов

<sup>1</sup> Биотехнология и микробиология анаэробной переработки органических коммунальных отходов : коллективная монография / под общ. ред. А. Н. Ножевниковой. М. : Университетская книга, 2016. 320 с.

<sup>2</sup> Подготовка органосодержащего сырья к анаэробному сбраживанию / В. К. Евтеев [и др.] // Актуальные вопросы инженерно-технического и технологического обеспечения АПК : Мат. науч.-практ. конф. Иркутск : Иркутский ГАУ, 2019. С. 109–116.

(steam and liquid hot water pretreatments) и химических методов (lime and ammonia based pretreatments). Продолжением данного исследования является публикация, в которой представлен масштабный обзор методов предобработки (проанализировано более 260 источников) избыточного (отработанного) активного ила [6]. Авторы указывают на противоречивость результатов некоторых публикаций, сложность в сопоставлении результатов. Одним из основных подходов сопоставления стал энергетический баланс. Сделан вывод об эффективности термических методов и их комбинации с биологическими. При этом указываются недостатки: высокая энергоемкость и необходимость серьезных капитальных затрат в случае применения. Авторы также отмечают перспективность и других менее эффективных, но имеющих более низкие затраты методов.

Рассматривалось влияние предварительной обработки биомассы с преобладающим содержанием лигнина и целлюлозы на эффективность гидролиза. В результате авторы пришли к выводу, что для ускорения данной стадии имеет смысл обрабатывать только травянистое сырье [4]. Глубокая обработка древесной массы становится энергетически нецелесообразной, так как для получения значимого эффекта требует в 10–20 раз больше затрат энергии в сравнении с травянистым сырьем. Эффективность предварительной обработки травянистой биомассы была подтверждена другой группой исследователей [7]. Получен дополнительный энергетический эффект от увеличения выхода биогаза после вычета затрат на предобработку.

Эффект механической обработки подтвержден в работе Б. Ламзала и коллег. Однако авторы отмечают, что сочетание экструзии с добавлением органических растворителей не привело к значимым результатам. Только их

удаление позволило добиться повышения эффективности [8].

Ряд работ посвящен изучению влияния ультразвука при обработке осадка сточных вод. З. Якои с соавторами дополнительно рассматривают влияние микроволнового излучения на осадок. Они полагают, что существенным плюсом ультразвуковой и микроволновой обработки является энергетическая эффективность, а также возможность комбинирования с другими методами [9]. Исследователи под руководством Н. Т. Ле считают ультразвук передовой технологией в обработке осадков сточных вод. В своей работе авторы приводят обзор оценочных подходов эффективности предварительной обработки [10].

Авторы другого исследования считают, что для лигноцеллюлозного сырья лимитирующим этапом в процессе анаэробного сбраживания является гидролиз, а наиболее перспективный способ – ферментативная предобработка. При этом в сравнении с микробиологическими процессами она начинается немедленно, протекает с высокой скоростью, что существенно ускоряет и улучшает общий процесс переработки [11].

К. Земинский и коллеги добились хороших результатов при ферментативной обработке промышленных отходов целлюлозы сахарной свеклы на этапе гидролиза, существенно увеличив выход биогаза при последующем анаэробном сбраживании [12].

Изучено влияние озонирования и ферментативной обработки пшеничной соломы на стадию гидролиза. Получены оптимальные значения влажности и дозы внесения озона, позволившие значительно увеличить степень конверсии полисахаридов [13].

Термический гидролиз подробно рассматривается в работе под руководством Э. Каррер. Авторы отмечают, что данный способ обработки

обеспечивает значительное повышение производительности, улучшает скорость и степень деградации, но при этом необходимы существенные энергетические затраты [14].

Дана оценка влиянию кислотной предварительной обработки на осадок активного ила сточных вод. Ученые добились значительного ускорения процесса сбраживания и умеренного повышения выхода биогаза. Однако экономическая оценка показала неэффективность такого вида обработки, несмотря на положительные результаты [15].

Рассмотрено влияние термохимической предварительной обработки жома сахарного тростника на выход биогаза. Исследователи добились кратного увеличения выхода биогаза с высокой степенью делигнификации [16].

Выбор метода предварительной обработки является сложным этапом при проектировании технологического процесса анаэробного сбраживания. Т. Каруппях и соавторы проанализировали 87 источников и утверждают, что данный выбор должен производиться не только на основе энергетического баланса, но и с учетом различных факторов окружающей среды, удаления патогенов, применения химикатов при сохранении возможности дальнейшего использования продуктов переработки в качестве удобрения, воздействия на здоровье человека и окружающую среду. Биологические методы лишены недостатков механических, термических и химических методов, но имеют свой существенный минус: увеличение времени обработки. Это делает его малоприменимым для крупномасштабных заводов, имеющих земельные ограничения для расширения занимаемой площади [17].

### **Материалы и методы**

В данной работе рассмотрены методы предварительной обработки органосодержащего сырья для анаэробного сбраживания. Предметом исследования

являются взаимосвязи воздействия методов, способов и частных приемов предобработки на анаэробное сбраживание. В ходе работы изучены имеющиеся в мировой научной литературе данные по применению различных методов для повышения биодоступности, степени разложения органических веществ отходов при анаэробном сбраживании. В качестве исходных данных для анализа использовалась научная информация из периодических изданий, монографий и диссертаций, отображающих результаты испытаний различных способов обработки в разных масштабах. На основе анализа отдельных литературных источников произведена попытка систематизировать методы предварительной обработки. При описании методов предобработки авторы использовали абстрагирование, а при рассмотрении отдельных способов и частных приемов – конкретизацию.

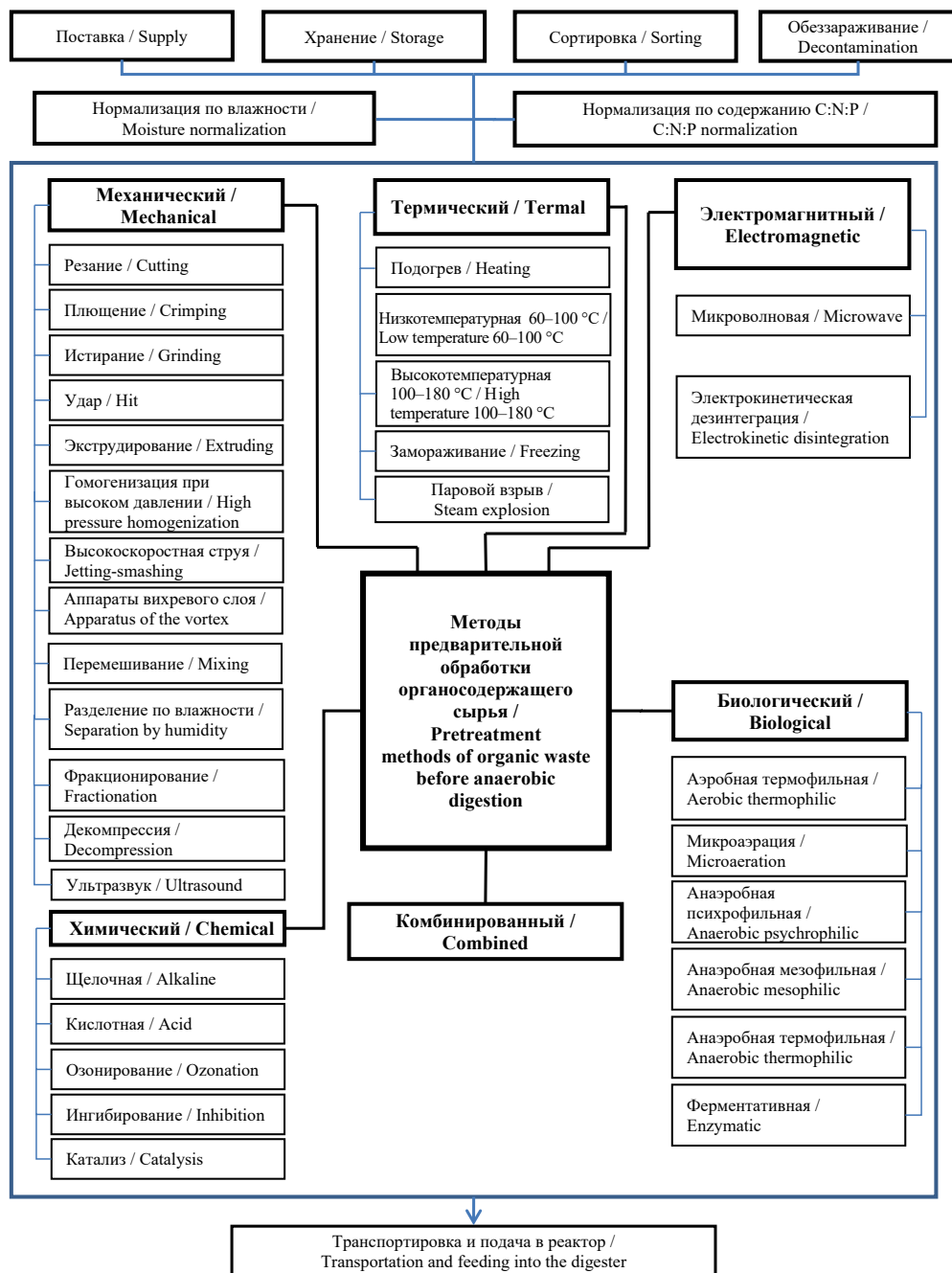
### **Результаты исследования**

Независимо от вида субстрата все методы предварительной обработки можно группировать по роду энергии, затрачиваемой на технологический процесс, на механический, термический, электромагнитный, химический, биологический и комбинированный (рис.).

#### *Механический метод*

В основе механического метода обработки лежит процесс разделения частиц путем приложения внешних сил, превосходящих силы межмолекулярного сцепления. Сюда относятся резание, плющение, истирание, удар, экструдирование, гомогенизация и др.

Резание реализуется в ножевых измельчителях. Процесс резания состоит из двух этапов: уплотнения и разрушения. В зависимости от способа воздействия на материал существует три способа: пуансоном (штамп), резцом (клин) и лезвием (нож). Практика показывает, что резанием хорошо измельчаются растительные остатки кормов,



Р и с. Подготовительные операции и методы предварительной обработки органических отходов перед анаэробным сбраживанием

F i g. Preparatory operations and pretreatment methods of organic waste before anaerobic digestion

имеющие относительно невысокую влажность до 30 %. В зарубежной литературе упоминается оптимальный размер лигниноцеллюлозного сырья 1–2 мм, оптимальный размер 40 меш (размер соответствует сетке, получаемой 40 нитями на 1 дюйм) [5; 18].

При плющении материал раздавливается гладкими поверхностями под действием сжимающей силы и увлекается вращательными вальцами. Истирание реализуется похожим на плющение способом, но здесь имеет место разная скорость вращения вальцов и поэтому, помимо сжимающей силы, добавляется продольная разрывающая сила.

Ударом материал разрушается в молотковых дробилках и подобных машинах. Данный способ практически не используется при измельчении высоковлажных субстратов. В сравнении с резанием потребляется в 2–5 раз больше энергии, но зато данный способ менее восприимчив к наличию в сырье камней или металлических включений.

Следует отметить, что при измельчении истиранием и ударом частицы имеют вытянутую (нитевидную) форму в связи с преобладающим разрушением вдоль волокон. При измельчении ножом частицы имеют неправильную форму с небольшой разностью между наименьшим и наибольшим габаритным размером.

При экструдировании материал обрабатывается под давлением до 300 кгс/см<sup>2</sup>, при этом температура возрастает до 300 °С. Такой способ повышает скорость биоразложения и позволяет увеличить дозу загрузки<sup>3</sup>. В работе М. Хьорт и соавторов представлены результаты

исследований по влиянию экструдирования при обработке соломы, свежескошенной травы, разделенного на фракции навоза крупного рогатого скота и глубокой подстилки [7]. Оценочными параметрами служили выход биогаза и затраты энергии на предобработку. Установлено, что при обработке температура повышалась от 5 до 35 °С. Ускорила процесс деградации труднорастворимых органических соединений. Выход метана увеличился через 28 дней на 18–70 %, через 90 дней – на 9–28 %. Дополнительно полученная энергия составила 6–68 %. К 90-му дню образцы были ранжированы по отзывчивости на предобработку следующим образом: трава = солома = осадок жидкого навоза < твердая фракция сепарированного навоза < глубокая подстилка.

В другой работе при предобработке экструдированием пшеничных отрубей влажностью 12,8 % оценочным параметром эффективности являлось содержание сахара после этапа гидролиза [8]. Контролируемыми параметрами выступали затраты энергии и температура, зависящие от частоты вращения шнека. При разных режимах работы экструдера установлено, что при затратах энергии на экструдирование в районе 1 500 кДж/кг повышение выхода сахаров достигает 30 %. Этому соответствовали частота вращения шнека и температура сырья на выходе 3,7 с<sup>-1</sup> / 110 °С и 7 с<sup>-1</sup> / 150 °С соответственно.

В настоящее время активно исследуется предварительная обработка субстрата в аппаратах вихревого слоя<sup>4</sup> [19]. Суть работы данных аппаратов состоит в том, что в качестве рабочих органов

<sup>3</sup> Montgomery L., Bochmann G. Pretreatment of Feedstock for Enhanced Biogas Production. IEA Bioenergy, 2014. 20 p.

<sup>4</sup> Собченко Ю. А., Ковалев Д. А., Ковалев А. А. Предварительная обработка жидких органических отходов в аппарате вихревого слоя для анаэробного сбраживания // Молодая наука аграрного Дона: традиции, опыт, инновации : сб. науч. трудов студентов и молодых исследователей. 2018. Т. 2. № 2. С. 198–200.

используются ферромагнитные частицы, например стальные иглы, которые вместе с обрабатываемым продуктом размещаются в магнитном поле, создаваемом индуктором. В качестве индуктора может быть использован статор электрического асинхронного двигателя. Под действием данного поля ферромагнитные частицы вращаются, одновременно измельчая и смешивая подаваемый субстрат. В процессе работы ферромагнитные частицы изнашиваются и попадают в сбраживаемый субстрат. Данное явление имеет положительные стороны, например: сокращение периода запуска биореактора, интенсификация процесса сбраживания, более глубокое разложение органического сухого вещества и увеличение конечного выхода метана. При обработке в аппарате вихревого слоя производится не только простое механическое измельчение и гомогенизация, но и катализ, наблюдаются электромагнитные и другие процессы активации.

**Гомогенизация.** Гомогенизация направлена на снижение степени неоднородности химического и фазового состава гетерофазного субстрата. Она может протекать за счет кавитации, возбуждаемой в среде при помощи высокоскоростного механического перемешивания или ультразвука, а также за счет механического перемешивания с высокими значениями градиента сдвига.

Известно, что при давлении 0,5 МПа и пятикратной обработке на гомогенизаторе высокого давления глубина разложения ОСВ при анаэробном сбраживании на 15 % больше, чем со сбраживанием без обработки<sup>5</sup>.

При наличии в субстрате большого количества жира гомогенизация

может значительно стабилизировать процессы сбраживания. В гомогенизаторах высокого давления из-за разности давлений жировой шарик вытягивается в нить и дробится на более мелкие. В процессе гомогенизации число жировых шариков увеличивается в 125–1 000 раз, а площадь возрастает до десяти раз. При гомогенизации иловые хлопья и клетки также разрушаются за счет сдвига. Гомогенизаторы отличаются простотой конструкции и эксплуатации [11; 17].

**Высокоскоростная струя.** Известны иные гидродинамические способы предобработки. Так, для разрушения хлопьев осадок под высоким давлением в виде струи выходит из сопла со скоростью 30–100 м/с и ударяется о пластину. При ударе в зоне контакта пластины и струи происходит резкое повышение давления, которое и вызывает разрушение<sup>6</sup>.

**Декомпрессия.** Существует способ, при котором осуществляется ввод газа ( $\text{CO}_2$ ) в поток субстрата под избыточным давлением 3–6 кгс/см<sup>2</sup>, а затем давление резко сбрасывают, и газ разрывает клетки, увеличиваясь в объеме до 18 раз<sup>7</sup>. Разложение органического вещества улучшается до 50 %. К особенностям данного способа можно отнести то, что высвободившиеся внутриклеточные вещества не переизмельчаются, но при этом становятся доступными для микроорганизмов. Также такой способ можно использовать, когда есть необходимость охладить субстрат, одновременно повысив его биодоступность. Охлаждение достигается за счет адиабатического расширения газа. Реализация данного способа в промышленном масштабе не осуществлялась.

<sup>5</sup> Lu J. Optimization of Anaerobic Digestion of Sewage Sludge Using Thermophilic Anaerobic Pre-Treatment. PhD Thesis. Technical University of Denmark, 2007. 59 p.

<sup>6</sup> Biogas Production: Pretreatment Methods in Anaerobic Digestion / ed. by A. Mudhoo. John Wiley & Sons, 2012. 322 p.

<sup>7</sup> Там же.



Ультразвук. Воздействие акустических волн на субстрат при частоте более 20 кГц вызывает локальные колебания скорости в среде. В результате при резком локальном ускорении жидкости возникают точки с низким давлением, где мгновенно образуются пузырьки, а при снижении скорости резко схлопываются [10]. В зоне схлопывания возникают высокие давления (до 200 МПа) и температура, разрушающие структуру контактирующего вещества.

Под воздействием ультразвукового поля до 100 Вт/см<sup>2</sup> разрушаются стенки клеток, обеспечивается легкий доступ к содержимому клеток. Нерастворимая форма органического вещества переходит в растворимую форму и становится доступной для микроорганизмов<sup>8</sup>. Однако в случае переизмельчения ультразвуком ОСВ высвободившиеся внутриклеточные полимеры образуют хлопья, препятствующие процессу. Для их частичного разрушения дополнительно необходимо затратить энергию в количестве 1 000 кДж/кг TS. Для полного разрушения потребуется 5 000 кДж/кг TS<sup>9</sup>. При очистке сточных вод использование ультразвука способствует повышению выхода биогаза до 50 %<sup>10</sup>.

Данные особенности делают ультразвук эффективным средством для диспергирования, деагломерации, дробления, тонкого измельчения и дезинтеграции частиц микронного и субмикронного размера. Следует отметить, что ультразвук является хорошо контролируемым средством разрушения клетки, позволяющим избегать беспрепят-

ственного извлечения нежелательных внутриклеточных продуктов.

Полномасштабные исследования с применением ультразвуковой обработки для ОСВ в США, Великобритании, Австралии, Германии, Австрии, Швейцарии, Италии, Японии показали, что реально достичь повышения производства биогаза до 50 %. Выход товарной энергии был увеличен в 2,5 раза, при том, что 2,2 кВт·ч, используемые для реализации технологии, были генерированы за счет полученного биогаза<sup>11</sup>.

В результате обзора З. Яакои и коллеги пришли к выводу, что ультразвуковая обработка особенно эффективна при сочетании с химическими методами (обработка NaOH, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>). Также авторы убеждены в необходимости продолжения исследований, в особенности устройств для обработки в непрерывном режиме [9].

#### *Электромагнитный метод*

Электрогидравлический удар для предварительной обработки позволяет ускорить процесс гидролиза на 30–52 %. Это приводит к сокращению сроков анаэробной обработки в два раза (с 20 до 10 суток)<sup>12</sup> [20]. Электродезинтеграция сточных вод обеспечивает прирост биогаза до 20 %<sup>13</sup>.

Микроволновое облучение достаточно хорошо изучено при обработке осадков городских сточных вод. Известно, что микроволновая обработка ОСВ обеспечивает ускорение процесса анаэробного сбраживания, улучшает степень разложения органического вещества, позволяет получать более

<sup>8</sup> Повышение эффективности обработки субстрата с помощью устройства Wisesoil / М. А. Терпелец [и др.] // Труды II научно-технической конференции молодых ученых Уральского энергетического института. Екатеринбург : УрФУ, 2017. С. 220–223.

<sup>9</sup> Biogas Production: Pretreatment Methods...

<sup>10</sup> Терпелец М. А., Арбузова Е. В., Смотрицкий А. В. Увеличение выхода биогаза за счет предварительной обработки субстрата // Статья в сборнике «Перспективные энергетические технологии. Экология, экономика, безопасность и подготовка кадров». Екатеринбург : УрФУ, 2016. С. 150–153.

<sup>11</sup> Biogas Production: Pretreatment Methods...

<sup>12</sup> Lu J. Optimization of Anaerobic Digestion...

<sup>13</sup> Повышение эффективности обработки субстрата...

обезвоженный осадок и инактивирует патогенные микроорганизмы [11]. Исследователи нагревали активный ил до температуры 91 °С с помощью микроволновой обработки частотой 2 450 МГц. Благодаря этому удалось добиться увеличения выхода биогаза на 79 % по сравнению с контрольным образцом. В результате солиобитизация была повышена на 64 % [21].

При обработке сырья микроволнами действуют два механизма: тепловой – быстро меняющееся электромагнитное поле приводит к колебанию ионов и поляризованных молекул в субстрате, за счет чего происходит нагрев массы; нетепловой – под воздействием электромагнитного поля поляризованные молекулы стремятся занять положение, соответствующее силовым линиям, что приводит к нарушению части водородных связей [11].

Следует учитывать, что микроволновая обработка используется в большей степени для быстрого равномерного нагрева высоковлажного сырья, а сопутствующая дезинтеграция материала является дополнительным бонусом такой обработки. Однако при больших объемах переработки отходов такой способ будет экономически нецелесообразен, так как для получения дополнительного дезинтеграционного эффекта необходимо будет затрачивать 100 % энергии в виде микроволн на всю массу вновь поступающего на обработку субстрата, что в свою очередь практически исключит использование рекуперационных теплообменников.

#### *Термическая обработка*

При тепловом воздействии на субстрат увеличивается скорость гидролиза, уменьшается время гидравлического пребывания (HRT), повышается выход биогаза благодаря более полному преобразованию органических соединений

в летучие жирные кислоты [11]. Помимо этого, обеспечивается дезинфекция и снижение вязкости. К недостаткам можно отнести ингибирование аммиаком, увеличение его растворимой фракции, ухудшение центрифугирования.

Выделяют низко- и высокотемпературную предварительную термическую обработку. Низкотемпературной считается обработка, протекающая в диапазоне 60–100 °С. Высокотемпературная – от 100 до 180 °С. Данный вид воздействия часто используется при обработке активного ила сточных вод. Под влиянием высоких температур происходит разрушение клеточных стенок, обеспечивая микроорганизмам более легкий доступ. Белки, содержащиеся в субстрате, также становятся более доступными для биоконверсии. При времени обработки активного ила HRT = 30–60 мин. и температуре  $t_{\text{opt}} = 160\text{--}180$  °С можно достичь увеличения выхода биогаза до 100 %<sup>14</sup> [14].

Помимо высоких температур, на выход биогаза оказывает влияние низкотемпературная обработка. Так, замораживание и размораживание активного ила с последующим анаэробным сбраживанием дает увеличение выхода биогаза на 7 %. Это происходит из-за разрыва клеточных стенок при фазовом переходе жидкости во время кристаллизации.

#### *Биологический метод*

Основу данного метода предобработки составляет использование различных микроорганизмов, грибков и ферментов, которые позволяют улучшить разложение лигноцеллюлозы.

Указывается, что предразрушение лигноцеллюлозы возможно производить специальными сообществами микроорганизмов за счет выделения ими веществ белковой природы – ферментов. При этом действие данных

<sup>14</sup> Lu J. Optimization of Anaerobic Digestion...

ферментов возможно с синергетическим эффектом<sup>15</sup>.

Одним из самых простых и эффективных биологических способов является микроаэрация. В зависимости от температуры она может быть мезофильной и термофильной. В литературе представлены положительные эффекты от обработки при температуре 70 °С с выдержкой 5 ч, что позволило увеличить выход биогаза на 150 %. Мезофильная микроаэрация первичного ила (37 °С, экспозиция – 4 сут.) позволила ускорить фазу гидролиза до 60 % [22].

Анаэробная предварительная обработка избыточного и первичного ила в психро-, мезо- и термофильном режиме ускорила фазу гидролиза на 13, 17 и 20 % соответственно, а также способствовала увеличению жирных кислот на 54, 64 и 80 % [23]. К положительным сторонам данной обработки можно отнести тот факт, что одновременно с биоразложением может происходить пастеризация обрабатываемого субстрата с инактивированием до безопасного уровня большинства патогенных микроорганизмов. Для этого необходимо соблюдать время выдержки в зависимости от температурного режима: 7 мин. при 70 °С, 30 мин. при 65 °С, 2 ч при 60 °С, 15 ч при 55 °С и 3 дня при 50 °С<sup>16</sup>.

Ферментная обработка направлена главным образом на удаление лигнинового уплотнения из лигноцеллюлозы (процесс делигнификации). В одном из проанализированных исследований представлены результаты по ферментативной обработке жома сахарной свеклы и отработанного хмеля как отходов с высоким содержанием клетчатки (85,1 и 57,7 % СВ соответственно) [12]. В результате наиболее эффективной оказалась предобработка (фаза гидролиза) в течение суток смесью ферментных

препаратов Celustar XL и Agroprest romase (3:1, об./об.). Выход биогаза увеличился для первого субстрата на 19 %, для второго на 13 % в сравнении с неферментированными субстратами. При этом качество биогаза улучшилось в обоих случаях.

Аэробное предварительное компостирование. Для выполнения данной операции необходимо обеспечить доступ кислорода к органическому веществу. Это достигается естественным аэрированием или целенаправленным вентилированием массы. Кислород, содержащийся в воздухе, вступает в реакцию с органическим веществом и вызывает разогрев массы до 60 °С и более. С повышением влажности массы более 60 % скорость разогрева уменьшается. При влажности менее 25 % разогрев практически прекращается [24]. Компостирование проводят в течение 2–4 дней.

Положительными сторонами биологической предобработки являются предварительное раскрытие клеток, саморазогрев массы, нарушение структуры твердых веществ, входящих в субстрат. Саморазогрев массы впоследствии позволит сэкономить на тепловых затратах при подаче на сбраживание. Нарушение структуры обеспечивает более низкие энергетические затраты при последующем измельчении субстрата, так как создадутся будущие точки напряженности, через которые будут проходить линии разрыва при разрушении материала.

К недостаткам данного способа можно отнести следующие особенности:

- тепло вырабатывается из органического вещества, входящего в субстрат, и из него уже не получится извлечь биогаз;
- при активном вентилировании массы вместе с воздухом теряется

<sup>15</sup> Biogas Production: Pretreatment Methods...

<sup>16</sup> Lu J. Optimization of Anaerobic Digestion...

часть полезных минеральных веществ, загрязняя атмосферу и снижая будущие удобриельные свойства переработанного сырья.

Обобщая, можно отметить, что биологическая предобработка считается перспективным экологически чистым подходом с потенциальными преимуществами перед физико-химическими технологиями, такими как более высокие энергетические и материальные затраты, упрощенные процессы и менее сложное оборудование [25].

Паровой взрыв. При такой обработке сырье подвергается термическому и физическому воздействию в течение заданного промежутка времени, после чего давление резко уменьшается. Частички разрываются за счет внутреннего давления, возникающего при резко фазовом переходе жидкости в газообразное состояние. Установлено, что взрыв пара, как правило, возникает при температуре от 160 до 260 °C и давлении от 6,9 до 48,3 кгс/см<sup>2</sup>. Здесь степень гидролиза определяют такие факторы, как продолжительность, температура, влажность и размер лигноцеллюлозной биомассы<sup>17</sup>.

#### *Химическая обработка*

Суть химической обработки в разрушении сложных органических соединений на более простые под действием химических веществ. При химической обработке применяют щелочи, кислоты, органические растворители, озонирование, добавление ингибиторов и катализаторов [15]. Использование NaOH в дозировке 40 мэкв/л в течение 24 ч позволяет ускорить процесс метангенерации и повышает количество вырабатываемого биогаза в среднем на 43,4 % [26]. Предварительная обработка осадка сточных вод озонированием в дозировке 0,015–0,05 г/г

СВ улучшает гидролиз на 19–37 % [27]. Внесение в субстрат сульфата железа в дозе 0,25–1,0 % от массы обрабатываемого субстрата ускоряет процесс метангенерации и повышает количество вырабатываемого биогаза в среднем на 43,4 % [26].

Представлены результаты комбинированной обработки жома сахарного тростника пероксидом водорода с последующей гидротермической обработкой. Предварительная обработка окислителем позволила увеличить выход метана на 118,64 % по сравнению с необработанным жомом [16]. К недостаткам окислительных способов можно отнести дороговизну и специальные условия обработки.

При щелочной обработке происходит набухание органических частиц, что делает их более восприимчивыми к ферментации. Добавлением щелочи можно нейтрализовать избыточные органические кислоты на начальном этапе, ослабляя их ингибирующее воздействие. Щелочная обработка (NaOH) пшеничной соломы при комнатной температуре привела к повышению выхода биогаза до 100 %, обработка активного ОСВ ила позволила повысить растворимость органических веществ на 46 %<sup>18</sup>.

Главными недостатками химической обработки являются дороговизна реагентов, необходимость проведения дополнительных операций по удалению реактивов. На данном фоне предпочтительнее выглядит способ озонирования. Озонирование в дозе 0,05–0,50 г O<sub>3</sub> на 1 г твердого вещества достаточно. Корреляция наблюдается до дозы 0,15 г O<sub>3</sub>/1 г TS. Затем резко снижается [28]. В другой работе при озонировании пшеничной соломы определен оптимальный расход озона. При этом наблюдается максимальный выход сахаров, который

<sup>17</sup> Biogas Production: Pretreatment Methods...

<sup>18</sup> Там же.

составил 3 ммоль/г. Авторами также отмечается, что аналогичный оптимум достигнут при обработке опилок осины [13]. Несмотря на плюсы, озонирование имеет ряд значимых недостатков: существенная стоимость установки, потребность в высокой квалификации обслуживающего персонала, особые условия по охране труда.

Следует отметить, что одним из возможных направлений повышения эффективности предварительной обработки является поиск оптимальных комбинированных вариантов. Совмещением различных методов и способов возможно добиться синергетического эффекта. Например, применение при обработке активного ила ультразвука с обработкой NaOH улучшает фазу гидролиза [9].

#### **Обсуждение и заключение**

Анализ литературных источников позволяет выделить следующие методы предварительной обработки органических отходов: механический, термический, электромагнитный, химический, биологический и комбинированный. Из вышеизложенного следует, что практически все представленные методы ведут к повышению биодоступности обрабатываемого субстрата и улучшают анаэробное сбраживание. Каждый метод содержит способы, которые подразделяются на частные приемы. Выбор зависит от задач, сырья (химический состав, размеры частиц, влажность, биологическая активность), возможности переработки. Преимущества и недостатки необходимо более подробно изучать. Важно ранжировать частные способы по энергетическим затратам и эффекту, который они дают. Также имеют место эксплуатационные затраты, на которые влияют материалоемкость, стоимость реагентов, бактерий, ферментов, уровень квалификации персонала, требования к безопасности.

Необходимо тщательно взвешивать все за и против. Стоит обращать внимание на вероятность сбоев. Эти риски необходимо учитывать.

В результате проведенного исследования авторы пришли к следующим выводам:

1. В основном все опыты произведены в лабораторных условиях и экономическая эффективность их применения в производственных масштабах подлежит дальнейшему изучению.

2. Сопоставление результатов исследований является сложным, так как применяются различные оценочные параметры (выход биогаза в день (сутки) [29]; выход биогаза с 1 г ХПК [12]; выход метана с загруженного абсолютно сухого органического вещества [16]; степень разложения абсолютно сухого органического вещества и др.). В исследованиях применяются различные виды субстратов для загрузки в метантенк (по химическому составу, влажности, степени измельчения твердой фракции, соотношению C:N:P и др.). При проведении большинства исследований не учитывается состав сообщества микроорганизмов, участвующих в разложении (в одной из работ указано, что состав микроорганизмов меняется при применении разных субстратов [29]), а в некоторых публикациях отсутствует четкая оптимизационная структура проведения исследований.

3. Важно также учитывать цель переработки органических отходов, поэтому выбор предобработки необходимо сопоставлять с желаемым результатом;

4. Выполнение исследований на современном уровне требует широкой лабораторной базы, наличия высококвалифицированного исследовательского штата (микробиолог, биохимик, биотехнолог, инженер и др.).

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Калужный С. В. Энергетический потенциал анаэробного сбраживания отходов с получением биогаза и использованием микробных топливных элементов в условиях России // Биотехнология. 2008. № 3. С. 3–12. URL: <http://www.biotech-jr.ru/?view=content&vol=24&year=2008&numb=3> (дата обращения: 05.05.2021).
2. Vasilev F., Palvinskiy V., Takhanov M. Increasing the Efficiency of Biogas Production from Organic Waste // Baikal Letter DAAD. 2019. Vol. 1. P. 49–51. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41108434> (дата обращения: 05.05.2021).
3. Васильева А. С., Евтеев В. К., Васильев Ф. А. Анаэробный фильтр с циклическим возмущением // Вестник АПК Ставрополя. 2015. № 4. С. 24–28. URL: <http://bibl-stgau.ru/images/Files/number22.pdf> (дата обращения: 05.05.2021).
4. Zhang J., Hou W., Bao J. Reactors for High Solid Loading Pretreatment of Lignocellulosic Biomass [Электронный ресурс] // Bioreactor Engineering Research and Industrial Applications II. Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology ; J. Bao, Q. Ye, J. J. Zhong (eds.). Vol 152. Heidelberg : Springer, 2015. doi: [https://doi.org/10.1007/10\\_2015\\_307](https://doi.org/10.1007/10_2015_307)
5. Hendriks A. T. W. M., Zeeman G. Pretreatments to Enhance the Digestibility of Lignocellulosic Biomass // Bioresource Technology. 2009. Vol. 100, Issue 1. P. 10–18. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.05.027>
6. Pre-Treatments to Enhance the Biodegradability of Waste Activated Sludge: Elucidating the Rate Limiting Step / A. Gonzalez [et al.] // Biotechnology Advances. 2018. Vol. 36, Issue 5. P. 1434–1469. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2018.06.001>
7. Extrusion as a Pretreatment to Increase Biogas Production / M. Hjorth [et al.] // Bioresource Technology. 2011. Vol. 102, Issue 8. P. 4989–4994. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.11.128>
8. Extrusion as a Thermo-Mechanical Pre-Treatment for Lignocellulosic Ethanol / B. Lamsal [et al.] // Biomass and Bioenergy. 2010. Vol. 34, Issue 12. P. 1703–1710. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.06.009>
9. Microwave and Ultrasound Based Methods in Sludge Treatment: A Review [Электронный ресурс] / Z. Jákó [et al.] // Applied Sciences. 2021. Vol. 11, Issue 157. doi: <https://doi.org/10.3390/app11157067>
10. Le N. T., Julcour-Lebigue C., Delmas H. An Executive Review of Sludge Pretreatment by Sonication // Journal of Environmental Sciences. 2015. Vol. 37. P. 139–153. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2015.05.031>
11. Salihi A., Alam M. Z. Pretreatment Methods of Organic Wastes for Biogas Production // Journal of Applied Sciences. 2016. Vol. 16, Issue 3. P. 124–137. doi: <https://doi.org/10.3923/jas.2016.124.137>
12. Ziemiński K., Romanowska I., Kowalska M. Enzymatic Pretreatment of Lignocellulosic Wastes to Improve Biogas Production // Waste Manag. 2012. Vol. 32, Issue 6. P. 1131–1137. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.01.016>
13. Бенько Е. М., Чухчин Д. Г., Лунин В. В. Предобработка озоном и ферментативный гидролиз пшеничной соломы // Журнал физической химии. 2017. Т. 91, № 11. С. 1851–1857. doi: <https://doi.org/10.7868/S0044453717110036>
14. Pretreatment Methods to Improve Sludge Anaerobic Degradability: a Review [Электронный ресурс] / H. Carrère [et al.] // Journal of Hazardous Materials. 2010. Vol. 183, Issue 1–3. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.06.129>
15. The Effect of Acid Pretreatment on the Anaerobic Digestion and Dewatering of Waste Activated Sludge / D. C. Devlin [et al.] // Bioresource Technology. 2011. Vol. 102, Issue 5. P. 4076–4082. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.12.043>
16. Methane Production from Hydrogen Peroxide Assisted Hydrothermal Pretreatment of Solid Fraction Sugarcane Bagasse / F. Ahmad [et al.] // Waste and Biomass Valorization. 2020. Vol. 11. P. 31–50. doi: <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0452-1>
17. Karuppiah T., Azariah V. E. Biomass Pretreatment for Enhancement of Biogas Production [Электронный ресурс] // Anaerobic Digestion ; Ed. by J. R. Banu. IntechOpen, 2019. doi: <https://doi.org/10.5772/intechopen.82088>

18. Schell D. J., Harwood C. Milling of Lignocellulosic Biomass // Applied Biochemistry and Biotechnology. 1994. Vol. 45. P. 159–168. doi: <https://doi.org/10.1007/BF02941795>
19. Ковалев А. А., Ковалев Д. А., Григорьев В. С. Энергетическая эффективность предварительной обработки синтетического субстрата метантенка в аппарате вихревого слоя // Инженерные технологии и системы. 2020. Т. 30, № 1. С. 92–110. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202001.092-110>
20. Shin K. S., Kang H. Electron Beam Pretreatment of Sewage Sludge before Anaerobic Digestion // Applied Biochemistry and Biotechnology. 2003. Vol. 109. P. 227–239. doi: <https://doi.org/10.1385/abab:109:1-3:227>
21. Use of Microwave Pretreatment for Enhanced Anaerobiosis of Secondary Sludge / B. Park [et al.] // Water Science and Technology. 2004. Vol. 50, Issue 9. P. 17–23. doi: <https://doi.org/10.2166/wst.2004.0523>
22. Wang M. J. Land Application of Sewage Sludge in China // The Science of the Total Environment. 1997. Vol. 197, Issues 1–3. P. 149–160. doi: [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(97\)05426-0](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(97)05426-0)
23. The Role of Sludge Retention Time in the Hydrolysis and Acidification of Lipids, Carbohydrates and Proteins during Digestion of Primary Sludge in CSTR Systems / Y. Miron [et al.] // Water Research. 2000. Vol. 34, Issue 5. P. 1705–1713. doi: [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(99\)00280-8](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(99)00280-8)
24. Афанасьев А. В. Определение оптимальной влажности подстилочного помета при экзотермической переработке его в биологически активные удобрения // АгроЭкоИнженерия. 1999. № 70. С. 142–147. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22961580> (дата обращения: 05.05.2021).
25. Keller F. A., Hamilton J. E., Nguyen Q. A. Microbial Pretreatment of Biomass [Электронный ресурс] // Biotechnology for Fuels and Chemicals. Applied Biochemistry and Biotechnology ; B. H. Davison, J. W. Lee, M. Finkelstein, J. D. McMillan (eds.). Totowa : Humana Press, 2003. doi: [https://doi.org/10.1007/978-1-4612-0057-4\\_3](https://doi.org/10.1007/978-1-4612-0057-4_3)
26. Курбанова М. Г., Позднякова О. Г. Биотехнологические факторы анаэробной переработки отходов животноводческих хозяйств // Вестник КрасГАУ. 2015. № 5. С. 173–178. URL: <https://elck.ru/augwp> (дата обращения: 05.05.2021).
27. Goel R., Tokutomi T., Yasui H. Anaerobic Digestion of Excess Activated Sludge with Ozone Pretreatment // Water Science and Technology. 2003. Vol. 47, Issue 12. P. 207–214. doi: <https://doi.org/10.2166/wst.2003.0648>
28. Effect of Ultrasonic, Thermal and Ozone Pre-Treatments on Waste Activated Sludge Solubilisation and Anaerobic Biodegradability / C. Bougrier [et al.] // Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. 2006. Vol. 45, Issue 8. P. 711–718. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cep.2006.02.005>
29. Forage Types and Origin of Manure in Codigestion Affect Methane Yield and Microbial Community Structure / K. Ahlberg-Eliasson [et al.] // Grass and Forage Science. 2018. Vol. 73, Issue 3. P. 740–757. doi: <https://doi.org/10.1111/gfs.12358>

*Поступила 04.10.2021; одобрена после рецензирования 10.11.2021; принята к публикации 03.12.2021*

*Об авторах:*

**Пальвинский Виктор Викторович**, доцент кафедры технического обеспечения АПК Иркутского ГАУ (664038, Российская Федерация, Иркутская обл., пос. Молодежный), кандидат технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0795-5304>, Researcher ID: ABA-1083-2021, kvenbox@mail.ru

**Васильев Филипп Александрович**, заведующий кафедрой технического обеспечения АПК Иркутского ГАУ (664038, Российская Федерация, Иркутская обл., пос. Молодежный), кандидат технических наук, доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2875-1573>, Researcher ID: ABA-1219-2021, fvasiljiev@yandex.ru

**Евтеев Виктор Константинович**, профессор-консультант кафедры технического обеспечения АПК Иркутского ГАУ (664038, Российская Федерация, Иркутская обл., пос. Молодежный), кандидат технических наук, доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3781-9963>, Researcher ID: ABA-1363-2021

*Заявленный вклад авторов:*

В. В. Пальвинский – анализ литературных данных, описание методов и способа предварительной обработки, редактирование текста.

Ф. А. Васильев – формирование структуры статьи, доработка начального текста, составление выводов и заключения.

В. К. Евтеев – научное руководство, анализ и доработка текста.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## REFERENCES

1. Kalyuzhnyi S.V. Energy Potential of Anaerobic Digestion of Wastes Produced in Russia via Biogas and Microbial Fuel Cell Technologies. *Biotehnologiya = Biotechnology*. 2008; (3):3-12. Available at: <http://www.biotech-jr.ru/?view=tcontent&vol=24&vyear=2008&numb=3> (accessed 05.05.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
2. Vasilev F., Palvinskiy V., Takhanov M. Increasing the Efficiency of Biogas Production from Organic Waste. *Baikal Letter DAAD*. 2019; 1:49-51. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41108434> (accessed 05.05.2021). (In Eng.)
3. Vasilyeva A.S., Evteev V.K., Vasiliev F.A. Anaerobic Filter with Cyclic Perturbation. *Vestnik APK Stavropolya = Agricultural Bulletin of Stavropol Region*. 2015; (4):24-28. Available at: <http://bibl-stgau.ru/images/Files/number22.pdf> (accessed 05.05.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
4. Zhang J., Hou W., Bao J. Reactors for High Solid Loading Pretreatment of Lignocellulosic Biomass. In: Bao J., Ye Q., Zhong J.J. (eds.). *Bioreactor Engineering Research and Industrial Applications II. Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology*. Vol 152. Heidelberg: Springer; 2015. (In Eng.) doi: [https://doi.org/10.1007/10\\_2015\\_307](https://doi.org/10.1007/10_2015_307)
5. Hendriks A.T.W.M., Zeeman G. Pretreatments to Enhance the Digestibility of Lignocellulosic Biomass. *Bioresource Technology*. 2009; 100(1):10-18. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.05.027>
6. Gonzalez A., Hendriks A.T.W.M., van Lier J.B., de Kreuk M. Pre-Treatments to Enhance the Biodegradability of Waste Activated Sludge: Elucidating the Rate Limiting Step. *Biotechnology Advances*. 2018; 36(5):1434-1469. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2018.06.001>
7. Hjørth M., Gränitz K., Adamsen A.P.S., Møller H.B. Extrusion as a Pretreatment to Increase Biogas Production. *Bioresource Technology*. 2011; 102(8):4989-4994. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.11.128>
8. Lamsal B., Yoo J., Brijwani K., Alavi S. Extrusion as a Thermo-Mechanical Pre-Treatment for Lignocellulosic Ethanol. *Biomass and Bioenergy*. 2010; 34(12):1703-1710. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.06.009>
9. Jákó Z., Lemmer B., Hodúr C., Beszédés S. Microwave and Ultrasound Based Methods in Sludge Treatment: A Review. *Applied Sciences*. 2021; 11(157). (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.3390/app11157067>
10. Le N.T., Julcour-Lebigue C., Delmas H. An Executive Review of Sludge Pretreatment by Sonication. *Journal of Environmental Sciences*. 2015; 37:139-153. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2015.05.031>
11. Salihu A., Alam M.Z. Pretreatment Methods of Organic Wastes for Biogas Production. *Journal of Applied Sciences*. 2016; 16(3):124-137. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.3923/jas.2016.124.137>
12. Ziemiński K., Romanowska I., Kowalska M. Enzymatic Pretreatment of Lignocellulosic Wastes to Improve Biogas Production. *Waste Manag.* 2012; 32(6):1131-1137. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.01.016>



13. Ben'ko E.M., Chukhchin D.G., Lunin V.V. Ozone Pretreatment and Fermentative Hydrolysis of Wheat Straw. *Zhurnal fizicheskoy khimii* = Russian Journal of Physical Chemistry A. 2017; 91(11):1851-1857. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.7868/S0044453717110036>
14. Carrère H., Dumas C., Battimelli A., et al. Pretreatment Methods to Improve Sludge Anaerobic Degradability: a Review. *Journal of Hazardous Materials*. 2010; 183(1-3). (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.06.129>
15. Devlin D.C., Esteves S.R.R., Dinsdale R.M., Guwy A.J. The Effect of Acid Pretreatment on the Anaerobic Digestion and Dewatering of Waste Activated Sludge. *Bioresource Technology*. 2011; 102(5):4076-4082. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.12.043>
16. Ahmad F., Sakamoto I.K., Adorno M.A.T., et al. Methane Production from Hydrogen Peroxide Assisted Hydrothermal Pretreatment of Solid Fraction Sugarcane Bagasse. *Waste and Biomass Valorization*. 2020; 11:31-50. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0452-1>
17. Karuppiyah T., Azariah V.E. Biomass Pretreatment for Enhancement of Biogas Production. In: Ban J.R. (eds.). *Anaerobic Digestion*. IntechOpen; 2019. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.5772/intechopen.82088>
18. Schell D.J., Harwood C. Milling of Lignocellulosic Biomass. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 1994; 45:159-168. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1007/BF02941795>
19. 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. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202001.092-110>
20. Shin K.S., Kang H. Electron Beam Pretreatment of Sewage Sludge before Anaerobic Digestion. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 2003; 109:227-239. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1385/abab:109:1-3:227>
21. Park B., Ahn J.-H., Kim J., Hwang S. Use of Microwave Pretreatment for Enhanced Anaerobiosis of Secondary Sludge. *Water Science and Technology*. 2004; 50(9):17-23. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.2166/wst.2004.0523>
22. Wang M.J. Land Application of Sewage Sludge in China. *The Science of the Total Environment*. 1997; 197(1-3):149-160. (In Eng.) doi: [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(97\)05426-0](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(97)05426-0)
23. Miron Y., Zeeman G., van Lier J.B., Lettinga G. The Role of Sludge Retention Time in the Hydrolysis and Acidification of Lipids, Carbohydrates and Proteins during Digestion of Primary Sludge in CSTR Systems. *Water Research*. 2000; 34(5):1705-1713. (In Eng.) doi: [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(99\)00280-8](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(99)00280-8)
24. Afanasev A.V. [Determination of Optimal Moisture Content of Litter for Its Exothermic Processing into Biologically Active Fertilizers]. *AgroEkoInzheneriya* = AgroEcoEngineering. 1999; (70):142-147. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22961580> (accessed 05.05.2021). (In Russ.)
25. Keller F.A., Hamilton J.E., Nguyen Q.A. Microbial Pretreatment of Biomass. In: Davison B.H., Lee J.W., Finkelstein M., McMillan J.D. (eds.). *Biotechnology for Fuels and Chemicals*. Applied Biochemistry and Biotechnology. Totowa: Humana Press; 2003. (In Eng.) doi: [https://doi.org/10.1007/978-1-4612-0057-4\\_3](https://doi.org/10.1007/978-1-4612-0057-4_3)
26. Kurbanova M.G., Pozdnyakova O.G. Biotechnological Factors of Anaerobic Processing of the Livestock Farm Wastes. *Vestnik KrasGAU* = Bulletin of KrasGAU. 2015; (5):173-178. Available at: <https://clck.ru/augwp> (accessed 05.05.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
27. Goel R., Tokutomi T., Yasui H. Anaerobic Digestion of Excess Activated Sludge with Ozone Pretreatment. *Water Science and Technology*. 2003; 47(12):207-214. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.2166/wst.2003.0648>
28. Bougrier C., Albasi C., Delgenès J.P., Carrère H. Effect of Ultrasonic, Thermal and Ozone Pretreatments on Waste Activated Sludge Solubilisation and Anaerobic Biodegradability. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. 2006; 45(8):711-718. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1016/j.ccep.2006.02.005>

29. Ahlberg-Eliasson K., Liu T., Nadeau E., Schnürer A. Forage Types and Origin of Manure in Codigestion Affect Methane Yield and Microbial Community Structure. *Grass and Forage Science*. 2018; 73(3):740-757. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1111/gfs.12358>

*Submitted 04.10.2021; approved after reviewing 10.11.2021; accepted for publication 03.12.2021*

*About the authors:*

**Viktor V. Palvinskiy**, Associate Professor of the Department of Technical Support of the Agroindustrial Complex, Irkutsk State Agricultural University (Molodezhnyy, Irkutsk Oblast 664038, Russian Federation), Cand.Sci. (Engr.), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0795-5304>, Researcher ID: ABA-1083-2021, [kvenbox@mail.ru](mailto:kvenbox@mail.ru)

**Filipp A. Vasilev**, Head of the Chair of Technical Support of the Agroindustrial Complex, Irkutsk State Agricultural University (Molodezhnyy, Irkutsk Oblast 664038, Russian Federation), Cand.Sci. (Engr.), Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2875-1573>, Researcher ID: ABA-1219-2021, [fvasiljiev@yandex.ru](mailto:fvasiljiev@yandex.ru)

**Victor K. Evteev**, Professor-Advisor of the Department of Technical Support of the Agroindustrial Complex, Irkutsk State Agricultural University (Molodezhnyy, Irkutsk Oblast 664038, Russian Federation), Cand.Sci. (Engr.), Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3781-9963>, Researcher ID: ABA-1363-2021

*Contribution of the authors:*

V. V. Palvinskiy – analysis of literary data, describing methods of pretreatment, text editing.

F. A. Vasilev – forming the structure of the article, finalizing the initial text, drawing finding and conclusions.

V. K. Evteev – scientific guidance, analysis and revision of the text.

*All authors have read and approved the final manuscript.*