

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-5-442-456>

УДК 621.313

Биогаз и свалочный газ как источники возобновляемой энергии в Республике Беларусь

Е. В. Зеленухо¹⁾, А. А. Цыганова¹⁾, Г. В. Бельская¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

Реферат. Энергетическая политика Республики Беларусь направлена на снижение потребления углеводородного сырья и укрепление национальной энергетической безопасности. Стратегической задачей отмечено максимальное вовлечение в топливно-энергетический баланс, помимо атомной энергии, собственных топливно-энергетических ресурсов, включая возобновляемые источники энергии (ВИЭ). Развитие ВИЭ способствует декарбонизации хозяйственной деятельности. Ресурсный потенциал получения биогаза в Республике Беларусь с учетом динамики образования органического сырья составляет 3,265 млн т у. т. в год, что намного выше аналогичных показателей для других местных видов топлива. В стране биогаз получают влажной и сухой ферментацией. Влажную ферментацию используют для получения биогаза из органических отходов животноводства (вторичной биомассы), которые содержат высокую влажную фракцию – до 90 %. Используемым оборудованием являются биореакторы и когенерационные установки. Сухую ферментацию применяют для получения свалочного газа из твердых органических отходов жилищно-коммунального хозяйства с использованием газопоршневых агрегатов (установок по дегазации органических отходов). В настоящее время выработка биогаза влажным и сухим (полувлажным) сбраживанием составляет приблизительно по 50 %. Современные технологии ко-сбраживания позволяют моделировать состав используемых органических отходов посредством приготовления ко-субстратов, причем чрезвычайно разнообразных, без принципиальных ограничений. Этот инновационный прием регулирует скорость микробиологического процесса, обеспечивает равномерную загрузку биогазового оборудования в течение календарного года, повышает экономическую эффективность работы биогазовых установок без высоких инвестиционных затрат. Такой подход в применении биогазовых технологий дает новый качественный толчок к их развитию, одновременно уменьшая объемы складирования органических отходов и снижая национальный углеродный след. Использование ко-субстратов обеспечивает технологические, экономические и экологические преимущества, поскольку выход метана в этих условиях достаточно стабильный и гарантированный. В настоящее время сложились специфические условия для функционирования «зеленой» энергетики. Целесообразно с учетом новых экономических условий частично переориентировать хозяйственную деятельность крупных биогазовых заводов на производство тепловой энергии, получение органического удобрения и других ценных продуктов с добавленной стоимостью.

Ключевые слова: биогаз, свалочный газ, возобновляемые источники энергии, влажная и сухая ферментация, управление органическими отходами, декарбонизация производственной деятельности

Для цитирования: Зеленухо, Е. В. Биогаз и свалочный газ как источники возобновляемой энергии в Республике Беларусь / Е. В. Зеленухо, А. А. Цыганова, Г. В. Бельская // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2025. Т. 68, № 5. С. 442–456. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-5-442-456>

Адрес для переписки

Цыганова Анна Александровна
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-91-29
cyganovaaa@bntu.by

Address for correspondence

Tsyhanava Hanna A.
Belarusian National Technical University
65 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-91-29
cyganovaaa@bntu.by

Biogas and Landfill Gas as Sources of Renewable Energy in the Republic of Belarus

A. V. Zelianukha¹⁾, H. A. Tsyhanava¹⁾, H. V. Belskaya¹⁾

¹⁾Belarussian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The energy policy of the Republic of Belarus is aimed in reducing the consumption of hydrocarbon raw materials and strengthening the national energy security. The strategic aim is to maximally involve in the fuel and energy balance, in addition to nuclear energy, our own fuel and energy resources, including renewable energy sources (RES). The development of RES contributes to the decarbonization of economic activity. The resource potential for biogas production in the Republic of Belarus, taking into account the dynamics of organic raw material formation, is about 3.265 million tons of equivalent fuel per year, which is much higher than similar indicators for other local types of fuel. In the country, biogas is produced by wet and dry fermentation. Wet fermentation is used to produce biogas from organic livestock waste (secondary biomass), which contains a high moisture fraction – up to 90 %. The equipment used is bioreactors and co-generation units. Dry fermentation is used to produce landfill gas from solid organic waste of housing and communal services, using gas piston units (organic waste degassing units). Currently, the production of biogas by wet and dry (semi-wet) fermentation is approximately 50% each. Modern co-fermentation technologies allow to model the composition of the organic waste used for preparing co-substrates. Moreover, the composition of the substrates used can be extremely diverse, without fundamental limitations. This innovative technique regulates the stability of the microbiological process, ensures uniform loading of biogas equipment during the calendar year, increases the economic efficiency of biogas plants, without high investment costs. This approach to the application of biogas technologies gives a new qualitative impetus to their development, while simultaneously reducing the volume of organic waste storage and reducing the national carbon footprint. The use of co-substrates provides technological, economic and environmental advantages, since the methane output under these conditions is quite stable and guaranteed. Currently, specific conditions have developed for the functioning of “green” energy. Taking into account the new economic conditions, it is advisable to partially reorient the economic activities of large biogas plants to the production of heat energy, the production of organic fertilizers and other valuable products with added value.

Keywords: biogas, landfill gas, sources of renewable energy, wet and dry fermentation, organic waste management, decarbonization of production activity

For citation: Zelianukha A. V., Tsyhanava H. A., Belskaya H. V. (2025) Biogas and Landfill Gas as Sources of Renewable Energy in the Republic of Belarus. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 68 (5), 442–456. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-5-442-456> (in Russian)

Введение

Выполнение Государственной программы «Энергосбережение» Республики Беларусь на 2021–2025 гг. направлено на снижение потребления углеводородного сырья и укрепление национальной энергетической безопасности. Стратегической задачей отмечено максимальное вовлечение в топливно-энергетический баланс, помимо атомной энергии, собственных топливно-энергетических ресурсов (ТЭР), включая возобновляемые источники энергии (ВИЭ). Развитие ВИЭ способствует декарбонизации хозяйственной деятельности.

В этой сфере наблюдаются определенные успехи. Так, вовлечение в топливно-энергетический баланс ВИЭ (включая биомассу) позволило сэкономить за предыдущие пять лет более 400 тыс. т у. т., или 10,5 %

от общей экономии ТЭР. Доля местных ТЭР в валовом потреблении достигла 16,5 % и увеличилась на 2,3 %. Доля ВИЭ в валовом потреблении ТЭР в 2024 г. достигла 7,1 % и увеличилась на 1,5 % к уровню 2020 г. [1].

Наряду с древесным топливом и торфом, значительного роста достигло производство биогаза – 5-кратное увеличение потребления к указанному периоду. Этих результатов удалось достичь за счет введения в эксплуатацию (за период с 2021 по 2025 г.) 14 новых биогазовых комплексов, суммарная установленная электрическая мощность которых составляет 13,6 МВт. Таким образом, идет успешное выполнение подпрограммы 2 «Развитие использования местных ТЭР, в том числе ВИЭ», в соответствии с которой планируется увеличить долю ВИЭ в валовом потреблении ТЭР на 8 % к 2026 г. [1].

Выполняемая в настоящее время Государственная программа «Энергосбережение» на 2021–2025 гг. является частью Национальной стратегией устойчивого социально-экономического развития Республики Беларусь на период до 2030 г. [2]. Седьмой Целью международной стратегии является «обеспечение всеобщего доступа к недорогим, надежным, устойчивым и современным источникам энергии для всех». Выполнение международных обязательств обеспечивается сопоставимостью целевых показателей Государственной программы с индикаторами достижения Целей устойчивого развития. В ближайшее время в стране планируются строительство, реконструкция и модернизация энергоисточников с использованием технологического оборудования, работающего на местных ТЭР, в том числе ВИЭ.

Одним из перспективных направлений является производство возобновляемой энергии биогаза, производство и потребление которого постоянно растет [2]. Нами рассчитан ресурсный потенциал получения биогаза в Республике Беларусь с учетом эколого-экономических особенностей развития, в первую очередь наличия и динамики образования органического сырья, включая отходы. Этот потенциал составляет 3,265 млн т у. т. в год [3]. Примечательно, что эта цифра намного выше аналогичных показателей для других местных видов топлива и потенциала ветровой энергии, уступая потенциалу только солнечной энергии. Это свидетельствует о высокой ценности биогаза в реестре ВИЭ и устойчивой перспективе его производства в ближайшее время.

Особенности современных биогазовых технологий

Биогаз обладает значительными технологическими преимуществами перед другими видами ВИЭ – его можно производить, сохранять, накапливать и транспортировать без существенных потерь. Производство биогаза является отраслью циркулярной («зеленой») экономики, поскольку исходным сырьем для процессов метаногенеза являются дешевые органические материалы, включая отходы жилищно-коммунального хозяйства (ЖКХ) и промышленности. Помимо производства метана, биогазовые технологии обеспечивают уменьшение объемов складирования отходов, снижают выбросы парниковых газов, в том числе аммиака, с полигонов хранения твердых бытовых отходов (ТБО), минимизируют загрязнение поверхностных, подземных вод и почв органическими веществами и нитратами [4]. Сжига-

ние биогаза в качестве топлива сопровождается выбросами углекислого газа, которые находятся в пределах его естественного природного цикла. Углеродный след отсутствует. Социальные преимущества состоят в создании новых рабочих мест, в первую очередь в сельской местности, улучшении качества окружающей среды и качества жизни.

Процессы анаэробного сбраживания разных органических материалов, а также многоцелевое использование биогаза хорошо изучены, их успешно применяют в мировой, европейской и отечественной практике. Схема анаэробной ферментации (анаэробного ко-разложения) представлена на рис. 1.

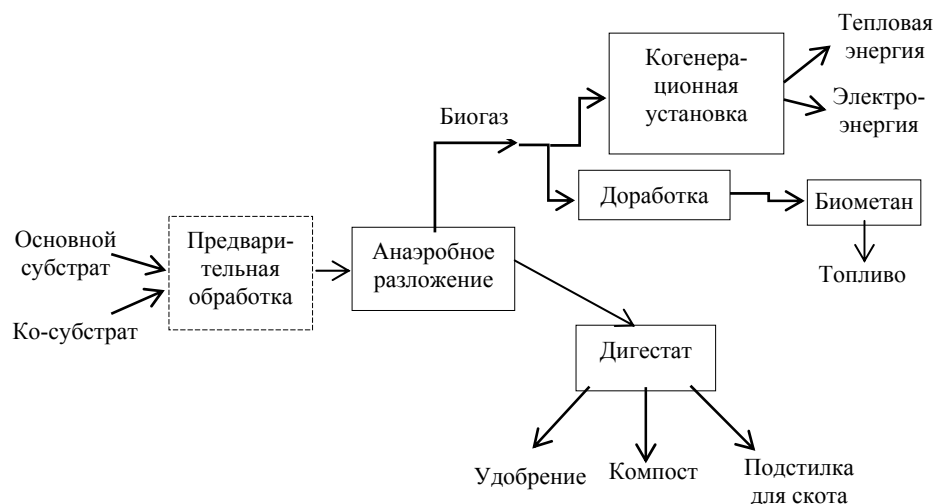


Рис. 1. Схема анаэробного ко-разложения органических материалов

Fig. 1. Scheme of anaerobic co-decomposition of organic materials

Из рис. 1 видно, что в качестве исходных материалов для метанового сбраживания используют главный (основной) субстрат и добавляют ко-субстраты (дополнительные субстраты) с обязательной их предобработкой (измельчение, оптимизация водной фракции, перемешивание, добавление ферментов). Далее следуют поэтапные четыре стадии ферментации (гидролиз, ацидогенез, ацетогенез и метаногенез), в ходе которых в условиях недостатка (или отсутствия) кислорода сложные органические материалы разлагаются на более простые соединения. В результате сложного микробиологического процесса получают два основных продукта – биогаз и органическое удобрение (дигестат – от англ. digestate). Биогаз состоит из метана CH_4 , углекислого газа CO_2 , сероводорода H_2S , аммиака NH_3 , азота N_2 и следов водяного пара в разном процентном содержании. Биогаз – это источник экологически чистой энергии, который можно использовать для производства теплоты, пара, электричества, водорода, а также в качестве транспортного топлива, в том числе для общественного транспорта.

Дополнительный продукт биогазовых технологий – это органическое удобрение (биогумус), которое не содержит патогенных микроорганизмов, семян сорной растительности и неприятного запаха, однако в нем сохраняются питательные макро- и микроэлементы – азот, фосфор, гуминовые

соединения. Его можно использовать (после обезвоживания) в качестве удобрения благодаря оптимальному соотношению в нем биогенных элементов углерода и азота (C/N), высокой гомогенности, доступности питательных веществ. Остатки анаэробного разложения также применяются для компостирования, в качестве подстилки для сельскохозяйственных животных и на другие хозяйственные цели. Таким образом, биогумус имеет добавленную стоимость и производство сертифицированных органических удобрений повышает рентабельность биогазовых технологий.

Широко известен мировой и европейский опыт получения дополнительных ценных биопродуктов из твердых биоотходов, подвергаемых анаэробной ферментации. Эти дополнительные продукты получают посредством объединения процессов анаэробной ферментации с микробной, термической или экстракционной технологиями. Они включают в себя биополимеры, органические кислоты, биотопливо и ферменты, а также биосахар, биомасла, топливные гранулы дигестата, активированные угли, композитные материалы. Республика Беларусь обладает недостаточным опытом производства таких продуктов с добавленной стоимостью. Таким образом, биогазовые технологии представляют собой успешную практику реализации принципов циркулярной экономики.

Развитие биогазовой отрасли в Республике Беларусь

Производство биогаза в Республике Беларусь происходит в рамках энергетического строительства и определяется особенностями экономического развития, а также современными требованиями по декарбонизации хозяйственной деятельности. Необходимым условием эффективного выхода метана является устойчивая, без перерывов, подача органического сырья в емкости для брожения в течение всего времени микробиологического цикла. Это требование должно соблюдаться независимо от сезона года и других (логистических) условий. Логистика, в первую очередь удобные подъездные пути и создание запасов органического сырья, является неотъемлемым условием успешного функционирования биогазовых заводов.

Проведен анализ состояния развития биогазовой отрасли в Республике Беларусь за период с 2018 по 2024 г. с использованием данных Реестров выданных сертификатов о подтверждении происхождения энергии, опубликованных Министерством природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь, за 2018, 2021, 2023 и 2024 гг. Как следует из данных реестров, в стране биогаз получают влажной и сухой ферментацией. Влажная ферментация происходит с добавлением воды в бродящую биомассу или с использованием субстратов, содержащих значительную водную фракцию (до 90 % и выше по объему). В результате влажной ферментации образуется биогаз. Сухая ферментация происходит без добавления воды в бродящую биомассу или с добавлением минимального ее количества. В результате сухой ферментации формируется тоже биогаз, который имеет дополнительное название – свалочный газ. Содержание влаги в субстратах является критической точкой для выбора используемой технологии.

Результаты анализа данных Реестров выданных сертификатов о подтверждении происхождения энергии представлены в табл. 1.

Таблица 1

Динамика производства энергии с использованием биогазовых установок в Республике Беларусь за период с 2018 по 2024 г.

Dynamics of energy production using biogas plants in the Republic of Belarus for the period from 2018 to 2024

Вид получаемой энергии	2018 г.		2021 г.		2023 г.		2024 г.	
	Количество установок	Мощность, МВт	Количество установок	Мощность, МВт	Количество установок	Мощность, МВт	Количество установок	Мощность, МВт
Биогаз	5	6,275	14	16,597	16	21,219	19	27,582
Свалочный газ	14	20,531	15	21,530	21	31,756	19	27,403
ИТОГО	19	26,806	29	38,127	37	52,984	38	54,958

Как видно из данных табл. 1, по состоянию на июль 2024 г., на территории страны функционируют 38 биогазовых комплексов общей установленной мощностью 54,958 МВт. Следует отметить, что общая мощность установок за пять последних лет увеличилась более, чем в два раза (с 26,806 МВт в 2018 г.). В соответствии с реестрами биогазовые комплексы разделены на две категории.

Первая категория – комплексы, на которых осуществляется влажное анаэробное сбраживание с использованием биореакторов и когенерационных установок. Таких биогазовых комплексов 19. Исходным сырьем для них являются органические отходы, образующиеся в результате производственной деятельности животноводческих комплексов (навоз сельскохозяйственных животных), с добавлением зеленой массы энергетических культур или другого лигноцеллюлозного сырья. Их общая установленная мощность в 2024 г. составила 27,582 МВт.

Примерами использования влажных технологий ферментации является производственная деятельность биогазовых заводов в ОАО «Рассвет» имени К. П. Орловского Могилевской области (мощность 4,8 МВт), ЗАО «ТДФ Экотех-Снов» Минской области (мощность 2,126 МВт), ЗАО «Мир Биогаз» Брестской области, Барановичского района (мощность 1,998 МВт), некоторые другие предприятия агропромышленного комплекса.

Вторая категория – комплексы, где используют сухое (или полувлажное) анаэробное сбраживание с эксплуатацией газопоршневых агрегатов (ГПА), или, как их еще называют, установок для дегазации органических отходов. Таких установок 19. Исходным сырьем для них являются твердые коммунальные отходы (ТКО), содержащие органическую фракцию. Они функционируют на специально оборудованных полигонах ТБО. Образующий по такой технологии биогаз называют свалочным газом. Общая установленная мощность таких комплексов составляет 27,403 МВт (в 2024 г.).

Примерами использования технологий сухой (полувлажной) ферментации является производственная деятельность КУПП «Брестский мусороперерабатывающий завод» (г. Брест, мощность 3,192 МВт); СЗАО «Тел-ДаФакс Экотех МН» (Минская обл., полигон ТБО «Тростенецкий») с использованием трех ГПА Jenbacher (общая мощность 2,997 МВт) и двух установок активной дегазации (общая мощность 2,033 МВт); ЗАО «Тел-ДаФакс Экотех-Северный» (Минская обл., Минский р-н, д. Дубовляны) с использованием двух установок (мощность 2,816 МВт).

Проанализирована динамика прироста количества установок, работающих по технологиям влажной и сухой ферментации за 2018–2024 гг. Как показывают полученные данные, динамика существенно различается за анализируемый период. Так, общее количество используемых биогазовых установок увеличилось с 19 до 38, т. е. на 100 %, при этом резко возросли количество эксплуатируемых биореакторов (с 5 до 19) и их мощность (с 6,275 до 27,582 МВт, т. е. более чем в четыре раза). Такие дорогостоящие проекты в 2019–2021 гг. были реализованы с привлечением крупных инвестиций. Это говорит о том, что за указанный период биогазовая отрасль развивалась в основном за счет технологий влажной ферментации с использованием дорогостоящего оборудования – биореакторов и когенерационных установок.

За это же время мощность установок по производству свалочного газа на полигонах ТКО увеличилась с 20,531 до 27,403 МВт к 2024 г., или возросла всего на 33,5 %. Максимальная мощность этих установок отмечена в 2023 г. – 31,756 МВт. При этом количество эксплуатируемых ГПА увеличилось незначительно – с 14 до 19. К настоящему времени количество установок и их мощность в обеих категориях биогазовых заводов приблизительно сравнялись.

Из данных табл. 1 следует, что в настоящее время в биогазовой отрасли страны наступило определенное равновесие по выработке биогаза из отходов животноводства (влажное сбраживание) и из ТБО (сухое или полувлажное сбраживание) – приблизительно по 50 %. Строительство и ввод в строй новых биогазовых комплексов с использованием биореакторов и когенерационных установок остановились. Вероятно, это происходит вследствие двух причин. Первая причина состоит в высоких инвестиционных (капитальных) затратах на оборудование и соответственно больших сроках окупаемости – более 5–6 лет. Второй существенной причиной снижения производства биогаза в стране являются новые экономические условия производства электрической энергии после ввода в строй Белорусской АЭС в 2020 г. Биогазовые комплексы не имеют повышенных тарифов за производство «зеленой» экологически чистой электроэнергии и не могут поставлять ее в общую сеть.

С учетом новых сложившихся экономических условий необходимо переориентировать хозяйственную деятельность крупных биогазовых заводов на производство тепловой энергии для функционирования самих биореакторов (подогрев бродящей массы до оптимальной температуры), обогрев производственных помещений, жилого сектора, теплиц и других мощностей. Перспективным направлением является производство серпи-

фицированного органического удобрения из отработанного органического остатка. Актуальной экологической функцией остается снижение загрязнения близлежащих к животноводческим комплексам территорий, поверхностных и подземных вод органическими веществами и нитратами. Переориентация производственной деятельности должна быть организована в соответствии с отдельными проектами по каждому биогазовому комплексу с учетом новых условий, логистических связей и других факторов.

Развитие производства свалочного газа за анализируемый период проходило стабильно, с положительной динамикой. Это связано с высокой доступностью дешевого исходного сырья, большими объемами образования ТБО, низкими капитальными затратами на оборудование (газопоршневые агрегаты и установки по дегазации органических отходов), достаточно изученными и апробированными технологиями, позволяющими гарантированно получать необходимые объемы свалочного газа, и возможностью его использования на конкретные местные (локальные) нужды ЖКХ. По нашему мнению, сложившаяся в настоящее время ситуация в энергетическом секторе приведет в ближайшей перспективе к быстрому нарастанию производства свалочного газа из ТБО.

Ко-ферментация как основной технологический процесс производства биогаза и свалочного газа

Главным определяющим экономическим условием производства биогаза является наличие дешевого и легкодоступного органического сырья, экологическим условием – потребность в эффективном управлении отходами.

Успешное применение биогазовых технологий основано на выполнении регламента микробиологического процесса, где определяющим фактором является состав входящих сырьевых потоков. Оптимальная рецептура входящих потоков повышает эффективность выхода метана на 30 % и выше, иногда на 400 % [6]. Состав входящего органического сырья является фактором, определяющим эффективность (или полную неэффективность, т. е. остановку) метанового брожения.

Биогаз и свалочный газ в Республике Беларусь получают из широкого спектра органических материалов. Кроме навоза сельскохозяйственных животных и другой вторичной биомассы используют муниципальные твердые отходы, органические отходы молочной, спиртовой и других видов пищевой промышленности, сельскохозяйственную биомассу, пожнивные остатки лигноцеллюлозного сырья (стебли, листья, корни, семена, оболочки семян), энергетические культуры, органические отходы жилищно-коммунального хозяйства, пунктов общественного питания.

Органические субстраты обладают разными свойствами, в первую очередь по технологическим характеристикам – содержанию водной фракции и доступности к микробиологическому разложению. Твердые, со сложной структурой материалы (древесина и солома, т. е. лигноцеллюлозный материал) лучше подходят для аэробных условий разложения, то есть компостирования. Текущие, жидкие материалы (навоз, отходы продуктов пита-

ния, осадки сточных вод) лучше разлагаются в анаэробных условиях, то есть в процессе брожения. При этом влажность сырья является решающим фактором, каким методом (брожение или компостирование) их лучше всего перерабатывать. Основные закономерности этих процессов представлены на рис. 2.



Рис. 2. Аэробная и анаэробная переработка органических отходов
Fig. 2. Aerobic and anaerobic digestion of organic waste

Как следует из рис. 2, существует сложность анаэробного разложения древесного и лигнин-целлюлозного растительного сырья вследствие низкого содержания в нем влажной фракции и наличия длинных целлюлозных цепочек, которые «запечатаны» в нерастворимую субстанцию – лигнин. На схеме есть указания на эффективное разложение полувлажной биомассы в условиях аэробного разложения (компостирования). Если для брожения использовать, например, исключительно пожнивные остатки, то микробиологический процесс протекает нестабильно, с увеличением скорости выхода метана и затуханием, что приводит к неравномерному образованию биогаза и возможной остановке процесса. При этом, как положительный момент, сухая ферментация требует меньших энергетических и материальных затрат – на транспортировку органической массы с высоким содержанием воды и нагрев жидкой фракции. Этот метод рассчитан на сыпучие материалы с содержанием сухого вещества свыше 25 %. Содержание сухого вещества в субстрате от 40 до 60 % делает его пригодным только к компостированию.

Поскольку затраты на преобразование лигноцеллюлозного сырья в биоэнергетику превышают цену ископаемого топлива, разработка экономически жизнеспособных производственных систем требует использования малоценных видов биомассы и отходов, которые в настоящее время используются недостаточно, в том числе и в нашей стране.

Рассмотрим некоторые преимущества (особенности) использования органических отходов (малоценной биомассы) для производства биогаза для условий республики.

1. Органические отходы не затрагивают потребление первичных природных ресурсов, но при этом значительно уменьшают экономические риски, снижая конкуренцию между энергетическим сектором и производством продуктов питания.

2. Широкий спектр доступных органических материалов создает благоприятные условия для производства биогаза.

При использовании одного субстрата (чаще всего это основной по логистике субстрат) микробиологические процессы идут либо быстро, либо медленно, с затуханием, зачастую с полной остановкой метаногенеза. Любой моносубстрат не имеет оптимального соотношения биогенных элементов для эффективного прохождения стадий метаногенеза. Например, соотношение содержания углерода к азоту (C/N) около 200/1 и выше (у соломы) делает процесс анаэробного разложения невозможным, поскольку оптимальное соотношение должно составлять 20/1.

Технологическими недостатками обладают и другие отдельные субстраты. Например, навоз сельскохозяйственных животных имеет низкое содержание органической фракции при высоком содержании азота, тогда как отходы растениеводства (включая пожнивные остатки и солому) содержат мало азота и являются трудноразлагаемыми материалами вследствие высокого содержания в них сырых целлюлозных цепочек и лигнина.

Особо следует отметить особенности лигнина с точки зрения его доступности для микробиологического разложения. Лигнин представляет собой одеревенелый материал растений, который находится в межклеточном пространстве растительной ткани. Это гетеро-полисахарид со сложной разветвленной структурой, который тяжело разлагается консорциумом микроорганизмов и кислотами. Его относят к группе трудноразлагаемых углеводов вместе с гемицеллюлозой, суберином, кутином и другими углеводами. Достаточно часто моносубстрат лигнина относят к неразлагаемым материалам.

Поэтому на биогазовых заводах Республики Беларусь используют прием смешивания нескольких субстратов с целью повышения эффективности процессов метаногенеза. Разнообразный состав органических материалов вполне гарантирует создание успешной рецептуры с устойчивым выходом биогаза.

3. В естественных природных условиях происходит одновременное сбраживание многих субстратов, известное под названием ко-сбраживания (от англ. – co-digestion). Этот процесс уменьшает и/или исключает недостатки моносбраживания, значительно увеличивая скорость био-конверсии и повышая эффективность выхода метана.

Многокомпонентный субстрат называют ко-субстратом, ферментация нескольких субстратов носит название ко-ферментации. Поскольку органические материалы обладают разным содержанием твердой фракции, дефицитом или избытком питательных соединений, потенциально высокой концентрацией токсических соединений, низким содержанием витаминов и минералов и другими лимитирующими свойствами, ко-субстрат позволяет оптимизировать состав бродящей биомассы, сделать ее более доступной для микробиологического разложения, обеспечить стабильный и гарантированный выход метана.

Прием использования ко-субстратов из исходных доступных материалов позволяет существенно повысить экономическую эффективность работы биогазовых установок, без высоких инвестиционных затрат.

4. Использование ко-субстратов создает достаточную буферную емкость (объем) брожения, что обеспечивает оптимальную скорость загрузки емкостей и равномерное перемешивание бродящей массы. Более полное использование рабочего объема реакторов снижает накопление токсинов/ингибиторов в системе и обогащает сырье макро- и микроэлементами, необходимыми для размножения микроорганизмов. Добавление правильно подобранного ко-субстрата оптимизирует скорость загрузки органических веществ и создание сбалансированной питательной композиции [7].

Буферная емкость способствует высокому микробному разнообразию и формированию высокоэффективного микробного консорциума. Эти условия улучшают стабильность анаэробного сбраживания и увеличивает выход биогаза/метана благодаря синергетическому воздействию микроорганизмов. Процессы сопровождаются уменьшением количества ингибирующих соединений (общий азот аммиака, фенольные кислоты и фуран) в результате эффекта разбавления бродящей биомассы [8, 9].

Неравномерная загрузка биогазового оборудования (в основном биореакторов) вследствие отсутствия или нехватки органического сырья является одним из существенных недостатков современных биогазовых технологий, которые снижают эффективность получения биогаза в условиях Республики Беларусь.

5. Анаэробное сбраживание органической биомассы является эффективной технологией по обращению с отходами, поскольку в процессе метаногенеза происходят значительное сокращение их объемов и изменение состава. Известно, что в европейских странах начальная разработка и внедрение биогазовых технологий были напрямую связаны с выполнением экологического требования – сократить объемы коммунальных шламов, отправляемых на захоронение или складирование. Например, первоначально в Швеции биогаз начали производить с 60-х гг. XX ст. из осадков, образующихся на муниципальных очистных сооружениях крупных городов. Такой подход обеспечил минимизацию поступления органических загрязнителей в водную среду и улучшение качества поверхностных вод.

Нефтяной кризис, который разразился в 70-е гг. XX ст., дал новый качественный скачок для развития биогазовых технологий в Европе с целью устойчивого замещения части используемого ископаемого топлива. Таким образом, энергетическая функция производства биогаза оформилась несколько позже.

6. Использование ко-субстратов значительно улучшает качество дигестата путем разбавления композиции сырья и, таким образом, снижает содержание тяжелых металлов, ксенобиотических соединений, патогенов, генов устойчивости к антибиотикам и устойчивых к антибиотикам бактерий в бродящей среде [10]. Это полезно, поскольку делает дигестат безопасным и более полезным для непосредственного использования в сельском хозяйстве, образуя возобновляемое удобрение высокой агрономической ценности без связанных с этим проблем фитотоксичности. Его можно также применять в качестве добавки к обработанной почве в форме обогащенного макронутриентами биосахара или в качестве продукта компости-

рования/совместного компостирования твердой фракции ко-дигестата. Благоприятное воздействие на окружающую среду связано с повышенной биодоступностью питательных веществ при использовании ко-дигестата для компостирования, вермикомпостирования, культивирования грибов и других полезных организмов, включая организмы по биологической защите растений [11, 12].

Основные преимущества и недостатки ко-ферментации и моноферментации представлены в табл. 2.

Таким образом, технологии ко-сбраживания позволяют моделировать состав используемых органических отходов посредством приготовления ко-субстратов с учетом входящих материалов. Ко-сбраживание регулирует скорость микробиологического процесса, обеспечивает равномерную загрузку оборудования в течение года. При этом сложноразлагаемый лигнин-целлюлозный материал можно заменять на легкоразлагаемые отходы пищевой промышленности, которые являются более энергонасыщенными. Например, значительным потенциалом для выхода биогаза обладают отходы от производства рапсового масла – 660 м³ на тонну отходов рапсового жмыха, в то время как силос кукурузы и солома зерновых культур формируют соответственно только 200 и 190 м³ биогаза на тонну отходов [14].

Таблица 2

Сравнительная характеристика показателей ко-ферментации и моноферментации

Comparative characteristics of co-fermentation and monofermentation indicators

Ко-ферментация	Моноферментация
Сбалансированный состав исходного сырья: оптимальное соотношение C/N, содержание твердой фракции, высокая буферная способность	Несбалансированный состав исходного сырья: неоптимальное соотношение C/N, дефицит твердой фракции, низкая буферная способность
Уменьшение концентраций (разведение) токсикантов, патогенных микроорганизмов, резистентных к антибиотикам бактерий и генов	Наличие тяжелых металлов, ксенобиотиков, резистентных к антибиотикам бактерий
Технологические возможности повысить скорость разложения органических субстратов	Необходимость снижения высокого содержания органических субстратов
Высокое разнообразие микробного консорциума	Низкое разнообразие микробного консорциума
Синергический эффект функционирования микроорганизмов	Отсутствие синергического эффекта функционирования микроорганизмов
Стабильность протекания микробиологического процесса	Возможная остановка микробиологического процесса
Гарантированный высокий выход биогаза/метана	Низкий выход биогаза/метана
Улучшенное качество дигестата, с высоким содержанием питательных элементов, доступных для питания растений	Нет
Экономические выгоды	Нет

На повышение эффективности выхода биогаза оказывает влияние возможность использования не только отходов животноводства, но и продуктов, имеющих более высокое содержание органических веществ. Вышеуказанные субстраты могут увеличить выход биогаза для условий Респуб-

лики Беларусь. Учитывая то, что площади возделывания озимого рапса, кукурузы и зерновых культур стабильны и имеют тенденцию к расширению, можно сказать, что вышеуказанные ресурсы могут способствовать повышению производства биогаза в стране.

Таким образом, использование ко-субстратов обеспечивает технологические, экономические и экологические преимущества, поскольку выход метана в этих условиях стабильный и гарантированный. Причем состав используемых субстратов может быть чрезвычайно разнообразным, без принципиальных ограничений. Такой подход в использовании биогазовых технологий дает новый качественный толчок к быстрому их развитию во всех странах, позволяя уменьшать объемы складирования органических отходов.

Следует отметить, что органическая фракция ТКО, хотя и является весьма ценной для использования в биогазовых технологиях, представляет из себя достаточно специфический материал. В первую очередь, это наличие в ней мелкодисперсной минеральной фракции (песка и камней), высокое содержание твердых веществ, большой размер частиц, дефицит или избыток питательных веществ, низкий или чрезвычайно высокий показатель рН, повышенное содержание ионов тяжелых металлов и токсических соединений. Это создает трудности для формирования и функционирования синтрофического микробного сообщества и метаногенов [15] для эффективного разложения биомассы. В частности, необходимо увеличивать период гидролиза для повышения скорости выхода метана из субстрата.

Учитывая изложенное, следует отметить высокую ценность органических отходов, получаемых из различных источников, включая ТБО, отходы пищевой промышленности и вторичную биомассу.

Как показывает опыт производства биогаза и свалочного газа в Республике Беларусь, в ближайшее время будет интенсивно развиваться производство свалочного газа из органической фракции ТБО.

ВЫВОДЫ

1. Республика Беларусь обладает высоким потенциалом производства биогаза и свалочного газа. Поскольку затраты на преобразование лигноцеллюлозного сырья в биоэнергетику превышают цену ископаемого топлива, разработка экономически жизнеспособных производственных систем требует использования малоценных видов биомассы и отходов, которые используются недостаточно.

2. В настоящее время сложились специфические условия для функционирования «зеленой» энергетики. Целесообразно частично переориентировать хозяйственную деятельность крупных биогазовых заводов на производство тепловой энергии, получение органического удобрения и других ценных продуктов с добавленной стоимостью. Низкие затраты и широкий диапазон исходного сырья увеличивают потенциальные возможности биогаза как источника экологически чистой энергии.

ЛИТЕРАТУРА

1. О Государственной программе «Энергосбережение» на 2021–2025 годы: постановление Совета Министров Республики Беларусь от 24 февраля 2021 г. № 103 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C22100103>.

2. Национальная стратегия устойчивого социально-экономического развития Республики Беларусь на период 2030 года. Минск, 2017. URL: <https://economy.gov.by/uploads/files/NSUR2030/Natsionalnaja-strategija-ustojchivogo-sotsialno-ekonomicheskogo-razvitija-Respubliki-Belarus-na-period-do-2030-goda.pdf>.
 3. Любчик, О. А. Минимизация влияния возобновляемых источников энергии на работу энергосистемы путем совместного использования солнечной и ветряной генераций / О. А. Любчик, С. В. Быстрых, А. Н. Казак // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2023. Т. 66, № 5. С. 423–432. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-5-423-432>.
 4. Зеленухо, Е. В. Основные направления повышения эффективности производства биогаза / Е. В. Зеленухо, Г. В. Бельская, И. В. Ролевич // Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики: сб. науч. тр. 15-й Междунар. конф. по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики. Минск: БНТУ, 2019. Т. 2. С. 104–110.
 5. Реестр выданных сертификатов о подтверждении происхождения энергии на 31.07.2023: утв. Министерством природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь. Минск: Государственный кадастр возобновляемых источников энергии Минприроды Республики Беларусь, 2023. 81 с.
 6. Anaerobic Co-Digestion Process for Biogas Production: Progress, Challenges and Perspectives / K. Hagos, J. Zong, D. Li, X. Lu // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. Vol. 76. P. 1485–1496. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.184>.
 7. Anaerobic Co-Digestion of Sewage Sludge with Other Organic Wastes: A Comprehensive Review Focusing on Selection Criteria, Operational Conditions, and Microbiology / R. Azarmanesh, M. Zarghami Qaretafeh, M. Hasani Zonoozi [et al.] // Chemical Engineering Journal Advances. 2023. Vol. 14. Art. 100453. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.100453>.
 8. Anaerobic Co-Digestion of Animal Manures with Corn Stover or Apple Pulp for Enhanced Biogas Production / K. Li, R. Liu, S. Cui [et al.] // Renewable Energy. 2018. Vol. 118. P. 335–342. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.11.023>.
 9. Methane and Hydrogen Production from Anaerobic Digestion of Soluble Fraction Obtained by Sugarcane Bagasse Ozonation / O. F. H. Adarme, B. E. L. Baêta, D. R. S. Lima [et al.] // Industrial Crops and Products. 2017. Vol. 109. P. 288–299.
 10. Biomass in Biogas Production: Pretreatment and Codigestion / A. Kasinath, S. Fudala-Ksiazek, M. Szopinska [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2021. Vol. 150. Art. 111509. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111509>.
 11. Integrating Anaerobic Co-Digestion of Dairy Manure and Food Waste with Cultivation of Edible Mushrooms for Nutrient Recovery / B. J. O'Brien, E. Milligan, J. Carver [et al.] // Bioresource Technology. 2019. Vol. 285. Art. 121312. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121312>.
 12. Rethinking Organic Wastes Bioconversion: Evaluating the Potential of the Black Soldier Fly (*Hermetia illucens* (L.)) (Diptera: Stratiomyidae) (BSF) / K. C. Surendra, J. K. Tomberlin, A. van Huis [et al.] // Waste Management. 2020. Vol. 117. P. 58–80. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.07.050>.
 13. A Comparative Study of Thermophilic and Mesophilic Anaerobic Co-Digestion of Food Waste and Wheat Straw: Process Stability and Microbial Community Structure Shifts / X. Shi, X. Guo, W. Zuo [et al.] // Waste Manage. 2018. Vol. 75. P. 261–269. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.02.004>.
 14. Обоснование использования биогаза для производства энергии в Республике Беларусь / Е. В. Зеленухо [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2024. Т. 67, № 6. С. 530–543. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-6-530-543>.
 15. Microbial ElectroHydrogenesis Cell and Dark Fermentation Integrated System Enhances Biohydrogen Production from Lignocellulosic Agricultural Wastes: Substrate Pretreatment towards Optimization / F. Ndayisenga, Z. Yu, J. Zheng // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2021. Vol. 145. Art. 111078. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111078>.
- Поступила 12.05.2025 Подписана в печать 15.07.2025 Опубликована онлайн 30.09.2025

REFERENCES

1. Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus Dated February 24, 2021 No.103 “About the State Program “Energy Saving” for 2021–2025”. *National Legal Internet Portal of the Republic of Belarus*. Available at: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C22100103> (in Russian).

2. *National Strategy for Sustainable Socioeconomic Development of the Republic of Belarus for the Period 2030*. Minsk, 2017. Available at: https://economy.gov.by/uploads/files/NSUR_2030/Natsionalnaja-strategija-ustojchivogo-sotsialno-ekonomicheskogo-razvitiya-Respubliki-Belarus-na-period-do-2030-goda.pdf (in Russian).
3. Liubchik V. A., Bystrykh S. V., Kazak A. N. (2023). Minimizing of Renewable Energy Sources Impact on the Energy System Operation by the Joint Use of Solar and Wind Generation. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 66 (5), 423–432. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-5-423-432> (in Russian).
4. Zelianukha E. V., Belskaya G. V., Rolevich I. V. (2019) Key Areas for Improving the Efficiency of Biogas Production. *Socio-Economic and Environmental Problems of Mining, Construction and Energy: Collection of Scientific Works of the 15th International Conference on Mining, Construction and Energy. Vol. 2*. Minsk, Belarusian National Technical University, 104–110 (in Russian).
5. *Register of Issued Certificates of Confirmation of the Origin of Energy as of 31.07.2023: Approved by the Ministry of Natural Resources and Environmental Protection of the Republic of Belarus*. Minsk, State Cadastre of Renewable Energy Sources of the Ministry of Natural Resources of the Republic of Belarus, 2023. 81 (in Russian).
6. Hagos K., Zong J., Li D., Liu C., Lu X. (2017) Anaerobic Co-Digestion Process for Biogas Production: Progress, Challenges and Perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76, 1485–1496. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.184>.
7. Azarmanesh R., Zarghami Qaretafeh M., Hasani Zonoozi M., Ghiasinejad H., Zhang Y. (2023) Anaerobic Co-Digestion of Sewage Sludge with Other Organic Wastes: A Comprehensive Review Focusing on Selection Criteria, Operational Conditions, and Microbiology. *Chemical Engineering Journal Advances*, 14, 100453. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.100453>.
8. Li K., Liu R., Cui S., Yu Q., Ma R. (2018) Anaerobic Co-Digestion of Animal Manures with Corn Stover or Apple Pulp for Enhanced Biogas Production. *Renewable Energy*, 118, 335–342. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.11.023>.
9. Adarme O. F. H., Baeta B. E. L., Lima D. R. S., Gurgel L. V. A., de Aquino S. F. (2017) Methane and Hydrogen Production from Anaerobic Digestion of Soluble Fraction Obtained by Sugarcane Bagasse Ozonation. *Industrial Crops and Products*, 109, 288–299. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.08.040>.
10. Kasinath A., Fudala-Ksiazek S., Szopinska M., Bylinski H., Artichowicz W., Remiszewska-Skwarek A., Luczkiewicz A. (2021) Biomass in Biogas Production: Pretreatment and Codigestion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 150, 111509. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111509>.
11. O'Brien B. J., Milligan E., Carver J., Roy E. D. (2019). Integrating Anaerobic Co-Digestion of Dairy Manure and Food Waste with Cultivation of Edible Mushrooms for Nutrient Recovery. *Bioresource Technology*, 285, 121312. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121312>.
12. Surendra K. C., Tomberlin J. K., van Huis A., Cammack J. A., Heckmann L.-H. L., Khanal S. K. (2020). Rethinking Organic Wastes Bioconversion: Evaluating the Potential of the Black Soldier Fly (*Hermetia Illucens* (L.)) (Diptera: Stratiomyidae) (BSF). *Waste Management*, 117, 58–80. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.07.050>.
13. Shi X., Guo X., Zuo J., Wang Y., Zhang M. (2018) A Comparative Study of Thermophilic and Mesophilic Anaerobic Co-Digestion of Food Waste and wheat Straw: Process Stability and Microbial Community Structure Shifts. *Waste Management*, 75, 261–269. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.02.004>.
14. Zelianukha A. V., Tsyhanava H. A., Belskaya H. V., Khrypovich H. A. (2024) Justification of the Use of Biogas for Power Generation in the Republic of Belarus. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 67 (6), 530–543. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-6-530-543>.
15. Ndayisenga F., Yu Z., Zheng J., Wang B., Liang H., Phulpoto I. A., Habiyaakare T., Zhou D. (2021) Microbial Electrohydrogenesis Cell And Dark Fermentation Integrated System Enhances Biohydrogen Production from Lignocellulosic Agricultural Wastes: Substrate Pretreatment Towards Optimization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 145, 111078. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111078>.