

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-6-530-543>

УДК 621.313

Обоснование использования биогаза для производства энергии в Республике Беларусь

Е. В. Зеленухо¹⁾, А. А. Цыганова¹⁾, Г. В. Бельская¹⁾, А. А. Хрипович¹⁾

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

Реферат. Развитие биогазовых технологий в Республике Беларусь происходит в рамках энергетического строительства и формирования сырьевой базы, что определяется особенностями экономического развития. В настоящее время биогаз получают по двум основным технологиям сбраживания отходов – с использованием влажной технологии переработки органических отходов животноводства и сухой технологии конверсии твердых бытовых отходов. К первой категории можно отнести 16 биогазовых заводов общей мощностью 21,219 МВт, основным сырьем для которых являются органические отходы животноводства, отличающиеся высокой влажностью. Главным оборудованием на этих заводах являются биореакторы. Ко второй категории биогазовых комплексов можно отнести 21 биогазовую установку с газопоршневыми агрегатами общей установленной мощностью 32,463 МВт. Основным сырьем для них являются твердые бытовые отходы, из которых производят свалочный газ. Дополнительное оборудование – когенерационные установки – в обеих технологиях позволяет повысить энергоэффективность выработки биогаза. По результатам оценки теоретического и технически возможного потенциала биогаза из отходов животноводства при сохранении численности поголовья скота в сельскохозяйственных организациях на уровне начала 2023 г. имеется возможность ежегодного замещения в топливном балансе республики 1325 и 982 млн м³ природного газа соответственно. В последние несколько лет появилась настоятельная потребность переориентации производственной деятельности биогазовых комплексов вследствие ввода в строй Белорусской АЭС. Изменение энергетической структуры страны внесло существенные коррективы в функционирование альтернативной энергетики, включая производство биогаза, в первую очередь по его целевым показателям. Вопросы производства альтернативной энергии в новых условиях остаются актуальными, поскольку электрическую и тепловую энергию, произведенную из биогаза, можно и следует использовать для функционирования оборудования, подогрева воды, обезвоживания получаемого биогумуса, других локальных целей. Остаются высокоактуальными экологические преимущества биогазовых технологий – эффективное управление органическими отходами крупных животноводческих ферм, которое позволяет существенно снизить загрязнение почв, поверхностных и грунтовых вод, атмосферного воздуха органическими загрязнителями вблизи животноводческих комплексов. В Республике Беларусь возникла необходимость изменения производственной деятельности биогазовых комплексов,

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

что обусловлено в первую очередь появлением в энергобалансе страны атомной энергии, вырабатываемой на Белорусской АЭС.

Ключевые слова: биогаз, производство энергии, возобновляемые источники энергии, сухая и влажная ферментация, теплотворная способность, переориентация производственной деятельности

Для цитирования: Обоснование использования биогаза для производства энергии в Республике Беларусь / Е. В. Зеленуха [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>

Justification of the Use of Biogas for Power Generation in the Republic of Belarus

A. V. Zelianukha, H. A. Tsyhanava, H. V. Belskaya, H. A. Khrypovich

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

Abstract. The development of biogas technologies in the Republic of Belarus takes place within the framework of power construction and the formation of a raw material base, which is determined by the peculiarities of economic development. Currently, biogas is produced using two main waste fermentation technologies: wet technology for processing organic livestock waste and dry technology for converting solid household waste. The first category includes 16 biogas plants with a total capacity of 21.219 MW, the main raw materials for which are organic waste from animal husbandry, characterized by high humidity. The main equipment used in these plants are bioreactors. The second category of biogas complexes includes 21 biogas plants with gas piston units with a total installed capacity of 32.463 MW. Their main raw material for them is household solid waste, from which landfill gas is produced. Additional equipment, viz. cogeneration plants in both technologies makes it possible to increase the power efficiency of biogas production. According to the results of the assessment of the theoretical and technically possible potential of biogas from livestock waste while maintaining the number of livestock in agricultural organizations at the level of the beginning of 2023, there is a possibility of annual replacement of 1,325 million m³ and 982 million m³ of natural gas in the fuel balance of our country, respectively. In the last few years, there has been an urgent need to reorient the production activities of biogas complexes due to the commissioning of the Belarusian nuclear power plant. The change in the country's energy structure has made significant adjustments to the functioning of alternative power engineering, including the production of biogas, primarily according to its target indicators. The issues of alternative energy production in the new conditions remain significant, since electric and thermal energy produced from biogas can and should be used for the operation of equipment, water heating, dehydration of the resulting vermicompost, and other local purposes. The environmental advantages of biogas technologies remain highly relevant, i.e., effective management of organic waste from large livestock farms, which can significantly reduce pollution of soils, surface and groundwater, atmospheric air with organic pollutants, near livestock complexes. In the Republic of Belarus, there is now a need to change the production activities of biogas complexes, primarily due to the appearance of nuclear power produced at the Belarusian nuclear power plant in the country's energy balance.

Key words: biogas, power production, renewable energy, dry and wet fermentation, calorific capacity, reorientation of production activities

For citation: 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. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 67 (6), 530–543. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-6-530-543> (in Russian)

Введение

Национальная стратегия устойчивого социально-экономического развития Республики Беларусь на период до 2030 г. [1] определяет развитие топливно-энергетического комплекса путем включения в энергетический баланс ядерного топлива и возобновляемых источников энергии. В этом направлении достигнут определенный прогресс. Так, в 2022 г. целевой показатель потребления местных топливно-энергетических ресурсов (без учета атомной энергии) выполнен и составил 16,5 % от общего количества потребляемой энергии, в том числе 7,4 % приходится на долю вторичных энергетических ресурсов. В соответствии с Государственной программой «Энергосбережение» на 2021–2025 гг. [2] планируется дальнейшее увеличение использования местных топливно-энергетических ресурсов, в том числе из возобновляемых источников.

Одним из главных направлений развития вторичных энергетических ресурсов в нашей стране является производство нетрадиционного вида топлива – биогаза, потребление которого за последнее десятилетие возросло в 5 раз [2]. Ресурсный потенциал биогаза составляет 3,265 млн т у. т. в год, уступая потенциалу только солнечной энергии [3] и превышая этот показатель для древесного топлива, отходов деревообработки (3,1 млн т у. т.), отходов растениеводства (1,46 млн т у. т. в год) и потенциала ветра (0,672 млн т у. т. в год) [4].

Современные технологии производства вторичных энергетических ресурсов в стране отвечают необходимым требованиям по генерации и потреблению энергии, что обеспечивает процессы оптимизации топливно-энергетического баланса и поэтапной декарбонизации энергетического сектора, в строгом соответствии с международной деятельностью по замедлению глобального потепления климата. Биогаз как вторичный энергетический ресурс имеет несомненные преимущества перед другими источниками, ввиду того что его потребление не требует специальной инфраструктуры, а следовательно, дополнительных затрат, обладая при этом всеми признаками эффективной экологичной технологии переработки отходов.

Важным резервом повышения энергоэффективности является целевое использование биогаза с учетом сложившихся эколого-экономических условий развития республики. После ввода в эксплуатацию Белорусской АЭС в 2021–2025 гг. биогазовые технологии будут развиваться в основном для удовлетворения собственных локальных нужд, например обслуживания самих биогазовых установок [2], использования тепловой энергии для получения дополнительного продукта биогазовых технологий – биогумуса, газификации жилищного сектора сельских регионов, в качестве автомобильного топлива, в первую очередь для общественного транспорта, и других целей.

Основная часть

Производство биогаза является отраслью циркулярной (зеленой) экономики, поскольку исходным сырьем для процессов метаногенеза являют-

ся промышленные, сельскохозяйственные и отходы жилищно-коммунального хозяйства, содержащие органическую фракцию, которая подвергается ферментации. Известно, что первые биогазовые заводы в европейских странах были построены в 60-е гг. XX ст. исключительно для утилизации органических отходов жилищно-коммунального хозяйства, с целью сокращения объемов шламов, отправляемых на захоронение. Энергетическая составляющая играла дополнительную роль. Такой подход обеспечивал и обеспечивает минимизацию поступления органических загрязнителей в окружающую среду.

В Республике Беларусь сложились специфические условия по формированию сырьевой базы для использования ее в биогазовых технологиях. Главными видами сырья в настоящее время являются органические отходы животноводства – в основном это навоз сельскохозяйственных животных (вторичная биомасса). Переход животноводства на индустриальную основу и связанная с этим процессом концентрация животных на крупных фермах и комплексах обусловили резкое увеличение объемов образования навоза и навозных стоков.

Навоз представляет из себя специфический субстрат для использования его в биогазовой ферментации по следующим причинам: 1) высокое содержание влажной фракции, что требует высоких затрат тепловой энергии на ее нагрев до оптимальной температуры брожения; 2) высокое содержание углерода при низком содержании азота, что требует дополнительных добавок растительного сырья в биореактор; 3) достаточно высокое содержание серы, что приводит к необходимости доработки (улучшения качества) производимого биогаза; 4) наличие вредных примесей в виде антибиотиков, остаточного содержания пестицидов и других токсических соединений, что требует доработки (очистки) получаемого биогаза, и некоторые другие особенности.

Процессы брожения с использованием одного типа субстрата протекают с переменной скоростью, возможны затухание и полная остановка процесса ферментации. Поэтому в установившейся практике биогазовых технологий используют специально подготовленные рецептуры брожения биомассы, с учетом их особенностей по составу и объемам образования. Для условий нашей страны необходимой добавкой к навозу сельскохозяйственных животных является зеленая измельченная масса, чаще всего кукурузы, зерновых или специальных энергетических (типа силфи) культур. Энергетические культуры для добавления их в биореакторы специально выращивают в хозяйствах с учетом структуры посевных площадей. Дополнительной добавкой к бродящей массе могут быть органические отходы с высоким содержанием жирной и белковой фракций пищевой и перерабатывающей промышленности.

Необходимым условием успешного протекания метаногенеза является непрерывность микробиологического процесса. Это приводит к необходимости создания резервов исходного органического сырья на основе функционирования логистических цепочек.

Поэтапное развитие биогазовых технологий в Республике Беларусь происходит в рамках энергетического строительства и формирования сырьевой базы, что определяется особенностями экономического развития [2]. По состоянию на 31.07.2023 [5], на территории страны функционируют 37 биогазовых комплексов общей установленной мощностью 53,682 МВт. При этом за последние годы общая установленная мощность биогазовых заводов возросла на 13 %.

Влажность субстрата является главным параметром для выбора используемой технологии метанового брожения. Используют две технологии сбраживания – влажную и сухую ферментацию. Влажная ферментация происходит с добавлением воды в бродящую биомассу либо с использованием субстратов, содержащих значительную водную фракцию (до 90 % и выше). Сухая ферментация происходит без добавления воды в бродящую массу. Поэтому функционирующие на территории страны биогазовые комплексы условно разделим на две основные категории по используемым технологиям и соответственно оборудованию.

К первой категории можно отнести 16 биогазовых заводов общей мощностью 21,219 МВт, находящихся на территории крупных животноводческих ферм. Соответственно сырьем для этих предприятий служат органические отходы животноводства, характеризующиеся высокой влажностью. Производство биогаза осуществляется в биореакторе, применение когенерационных установок позволяет повысить коэффициент выхода энергии на тонну перерабатываемых отходов.

Отрасль животноводства характеризуется высокой степенью концентрации и производственной специализации. На территории страны функционирует 108 крупных государственных ферм по откорму крупного рогатого скота, 120 крупных свинокомплексов и около 60 птицеводческих хозяйств, которые производят до 300 тыс. т жидких органических отходов в сутки, или в пересчете 30 млн м³ сточных вод в год.

Примерами использования влажных технологий 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) и других предприятий агропромышленного комплекса.

При мокром (с добавлением воды) методе получения биогаза оптимальное содержание исходного сухого вещества составляет 15 %. При содержании сухого вещества менее 5 % возникает необходимость добавления воды, что требует ее нагрева до оптимальной температуры брожения. Однако содержание сухого вещества выше 15 % делает невозможным перекачку субстратов насосом, их эффективного перемешивания и смешивания [7].

Технология мокрой (влажной) ферментации обеспечивает относительную стабильность микробиологического процесса и гарантированное получение метана. С точки зрения использования энергии, влажная фермен-

тация требует дополнительного расхода энергии на транспортировку и нагрев воды, что снижает энергоэффективность вследствие неизбежных потерь теплоты. Несмотря на указанные недостатки, процесс влажного брожения используют чаще метода сухого сбраживания ввиду гарантированного выхода метана. Еще одним существенным преимуществом такой технологии является получение биогаза (дигестата) контролируемого состава, из которого возможно получать органическое удобрение простым удалением избытка воды механическими способами.

Однако в дигестате могут содержаться токсичные вещества (ионы тяжелых металлов, антибиотики и др.), которые, попадая в почву, не разлагаются почвенными микроорганизмами. Поэтому дигестат требует соответствующей доработки, улучшения качества, чтобы превратить его в биогаз для дальнейшего устойчивого использования. При внесении в почву дигестат улучшает условия функционирования почвенных микроорганизмов и повышает ее плодородие. Переработка органического осадка в экологически чистый биогаз не только позволяет улучшить экономические показатели производства биогаза, но и замыкает цепочку жизненного цикла отходов, делая биогазовые технологии практически безотходными и низкоуглеродными [8].

Ко второй категории биогазовых комплексов можно отнести 21 биогазовую установку. В этом случае используются газопоршневые агрегаты и когенерационные установки общей установленной мощностью 32,463 МВт. Биогазовые установки второй категории функционируют на полигонах твердых бытовых отходов (ТБО), выведенных из эксплуатации, на которых началось образование свалочного газа. Установки позволяют интенсифицировать выработку метана, очистить его от примесей и получать газобразное топливо постоянного состава, уменьшая количество ТБО на полигонах.

Такие биогазовые комплексы устанавливают на полигонах ТБО вблизи крупных и средних городов. Среди биогазовых комплексов этой категории можно выделить КУПП «Брестский мусороперерабатывающий завод», г. Брест (мощность 3,192 МВт); СЗАО «ТелДаФакс Экотех МН», Минская область, полигон ТБО «Тростенецкий» (мощность 2,997 МВт); ЗАО «ТелДаФакс Экотех-Северный» Минская область, Минский район, д. Дубовляны (мощность 2,816 МВт).

Необходимость ликвидации полигонов хранения ТБО, простота технологии и невысокая стоимость оборудования [9] положительно сказались на увеличении количества и мощности биогазовых установок за 2018–2022 гг.

Сухая ферментация происходит без добавления воды в бродящую биомассу. С использованием технологии сухой ферментации получают свалочный газ из твердых отходов жилищно-коммунального хозяйства для производства электрической энергии, при этом значительно уменьшив количество отходов на полигонах, вплоть до сокращения мест складирования и захоронения отходов. Так как процесс осуществляется непосредственно

на месте хранения и складирования ТБО, отсутствуют затраты на транспортировку сырья и дополнительный обогрев зоны реакции. В то же время микробиологическое разложение протекает нестабильно, ускорение образования метана сменяется затуханием процесса и даже возможным его прекращением, что приводит к необходимости перезапуска. Этот метод позволяет перерабатывать сыпучие материалы с содержанием сухого вещества свыше 25–40 %, увеличение содержания сухого вещества в субстрате от 40 до 60 % делает его пригодным только к компостированию.

Образующийся твердый остаток (дигестат) затруднительно использовать в качестве органического удобрения вследствие непостоянного состава и присутствия тяжелых металлов и патогенной микрофлоры в ТБО. Затраты на устранение этих недопустимых для удобрений компонентов делают переработку дигестата экономически не выгодной.

Получаемый в анаэробных условиях методом ферментации биогаз состоит в основном из метана и углекислого газа. В соответствии с [10], получаемый в анаэробных условиях биогаз имеет следующий состав: метан – 60 %, углекислый газ – 33,5, азот – 3,0, кислород – 0,5, водород – 1, сероводород – 2 %. Качественный состав биогаза, а также его энергетические характеристики наибольшее сходство имеют с природным газом, который состоит на 98 % из метана.

По своему составу биогаз достаточно близок к природному газу, принципиальным отличием является высокое содержание углекислого газа – иногда до 40 (в среднем – 20–30 %). Однако следует отметить, что содержание углекислого газа в биогазе находится в пределах его естественного природного цикла, то есть углеродный след при использовании биогаза в качестве топлива отсутствует. Содержание углекислого газа отличается широкой вариабельностью, вследствие того что биогаз является продуктом естественного микробиологического процесса разложения различных видов биомассы, т. е. содержание углекислого газа варьируется в зависимости от используемых субстратов. Высокое содержание углекислого газа определяет низкую теплотворную способность биогаза (в сравнении с природным газом – 21,77 МДж/м³). При этом теплотворная способность биогаза выше, чем у твердых видов топлива (торф, древесина), что делает его весьма ценным местным видом топлива. Также можно отметить наличие в биогазе следов азота и сероводорода. Сероводород может быть причиной коррозии биогазового оборудования.

Для химической очистки (улучшения состава) биогаза применяют традиционные методы типа абсорбции и адсорбции. К наиболее доступным и эффективным по техническому исполнению и оборудованию методам можно отнести промывку водой для удаления механических примесей, сероводорода и аммиака, а также реагентный способ очистки в щелочной среде, позволяющий не только эффективно удалять углекислый газ и сероводород, но и другие загрязнители. К недостаткам этого метода очистки

можно отнести высокий расход реагентов и формирование большого объема отходов.

Современные адсорбционные методы с использованием органических и неорганических сорбентов высокоэффективны, однако требуют предварительной очистки биогаза, в первую очередь от паров воды, методом активного его высушивания. Существенным недостатком является регенерация сорбентов, что значительно удорожает процесс получения биогаза и увеличивает нагрузку на окружающую среду в виде отработанных сорбентов и образующихся отходов.

В настоящее время также применяют такие инновационные методы очистки биогаза, как мембранные и криогенные технологии разделения, биотехнологические методы очистки. Мембранные технологии не имеют вышеупомянутых недостатков, поскольку отделение метана от других компонентов газа обеспечивается за счет разницы в скоростях диффузии через мембрану молекул различных газов. При этом чистота получаемого газа зависит от вида мембраны, ее поверхности, скорости потока и количества ступеней разделения. В оборудовании, используемом для очистки биогаза, применяют как неорганические и полимерные мембраны, так и мембраны со смешанной матрицей. Использование в промышленных масштабах неорганических мембран сдерживается высокими эксплуатационными расходами, несмотря на их высокую термическую и химическую стабильность. Высокая проницаемость полимерных мембран по сравнению с неорганическими обусловлена повышенным коэффициентом диффузии и, как следствие, более высокой растворимостью углекислого газа. Мембраны со смешанной матрицей на основе неорганического наполнителя и органического полимера характеризуются более высокой проницаемостью и селективностью за счет механизма разделения, действующего как барьер молекулярного сита на границе раздела фаз [11].

Биотехнологические методы доработки биогаза основаны на применении микроорганизмов, потребляющих углекислый газ, сероводород и аммиак, например сульфатредуцирующих, ацетофильных и аннамокс-бактерий. Внесение таких бактерий и водорода непосредственно в биореактор позволяет совместить технологический процесс получения биогаза с его очисткой и не требует дополнительного очистного оборудования. Биотехнологии очистки возможно применять и непосредственно перед использованием биогаза при малом расстоянии до потребителя, не требующем значительных транспортных расходов.

Биотехнологии очистки, основанные на способности микроводорослей расходовать углекислый газ и сероводород для фотосинтеза, успешно применяются в других отраслях и могут быть использованы и для очистки биогаза. Из отработанной биомассы микроводорослей возможно получение сульфатного удобрения, также возможен ее рециклинг в биореактор как сырья. Таким образом, исключается образование отхода при очистке.

Криогенная технология очистки газов основана на принципе разделения веществ, имеющих разное агрегатное состояние при определенной температуре. Процесс разделения протекает при сжатии газовой смеси, в ходе которого основное вещество (метан) остается в газообразной форме, а загрязнители удаляются в твердом или жидком виде. Образующийся углекислый газ в жидкой форме может реализовываться как самостоятельный продукт, востребованный в пищевой промышленности. Однако следует отметить, что обеспечение безотходности криогенной технологии приводит к удорожанию всего процесса в целом (до 30 % получаемой энергии расходуется на систему очистки), в то же время, учитывая доходность от реализации побочного продукта и экологической значимости, данный метод представляется весьма перспективным.

Объединение нескольких методов в единую систему очистки позволяет компенсировать недостатки применения способов очистки по отдельности. Так, сочетание мембранного разделения с водной абсорбцией, химической очисткой или криогенным разделением эффективнее этих методов по отдельности за счет низких эксплуатационных затрат, высокой степени поглощения углекислого газа и сероводорода, более высоких уровней чистоты метана и меньшего потребления энергии.

Нами проведена оценка теоретического и технически возможного потенциала получения биогаза в Республике Беларусь с использованием органических отходов животноводства. В расчетах учитывались данные по поголовью скота и птицы в сельскохозяйственных организациях страны на начало года в период с 2019 по 2023 г. [12], а также данные по объему производства биогаза от одного животного или птицы [13] (табл. 1). Так, по состоянию на начало 2023 г., численность крупного рогатого скота в сельскохозяйственных организациях Республики Беларусь составила 4128 тыс. голов, свиней – 2267 тыс., овец – 11 тыс., коз – 2 тыс., лошадей – 10 тыс. голов, птицы – 48757,5 тыс. [12].

Таблица 1

**Поголовье скота и птицы в сельскохозяйственных организациях
(на начало года, тыс. голов)**

**Livestock and poultry in agricultural organizations
(at the beginning of the year, thousand head of cattle)**

Вид животного	Средний выход биогаза на голову, м ³ /год	Поголовье скота и птицы в сельскохозяйственных организациях (на начало года, тыс. голов)				
		2019 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.	2023 г.
Крупный рогатый скот	498	4241	4202	4200	4150	4128
Свиньи	91,3	2480	2545	2558	2276	2267
Овцы	135	13	13	14	12	11
Козы	135	1	1	1	1	2
Лошади	325	17	15	13	12	10
Птица	5,8	46293,0	48190,9	42998,1	43939,5	48757,5

При оценке теоретического и технически возможного потенциала получения биогаза были учтены следующие факторы:

1. На собственные нужды биогазовой установки (подогрев сырья и поддержание заданной температуры в метантенках) расходуется около одной пятой части производимой в ней энергии [13].

2. Системы удаления навоза не всегда позволяют использовать весь объем образовавшихся продуктов жизнедеятельности в качестве сырья для производства биогаза. В связи с этим использовались корректирующие коэффициенты:

– 0,7 – коэффициент, учитывающий функционирование системы удаления навоза крупного рогатого скота, лошадей, овец и коз;

– 0,8 – то же, учитывающий особенности использования водной системы удаления навоза на свиноподкомплексах;

– 1,0 – то же, учитывающий особенности использования системы сбора навоза на птицефабриках [13].

Результаты расчета теоретического и технически возможного потенциала получения биогаза на территории Республики Беларусь приведены в табл. 2, 3.

Таблица 2

Теоретический потенциал получения биогаза из отходов животноводства в Республике Беларусь

Theoretical potential of biogas production from animal husbandry waste in the Republic of Belarus

Вид животного	2019 г.		2020 г.		2021 г.		2022 г.		2023 г.	
	млн м ³ /год	тыс. т у. т./год	млн м ³ /год	тыс. т у. т./год	млн м ³ /год	тыс. т у. т./год	млн м ³ /год	тыс. т у. т./год	млн м ³ /год	тыс. т у. т./год
Крупный рогатый скот	1689,6	1250,3	1674,1	1238,8	1673,3	1238,2	1653,4	1223,5	1644,6	1217,0
Свиньи	181,1	134,0	185,9	137,6	186,8	138,3	166,2	123,0	165,6	122,5
Овцы	1,4	1,0	1,4	1,0	1,5	1,1	1,3	1,0	1,2	0,89
Козы	0,11	0,08	0,11	0,08	0,12	0,08	0,12	0,08	0,22	0,16
Лошади	4,4	3,3	3,9	2,9	3,4	2,5	3,1	2,3	2,6	1,9
Птица	214,8	158,9	223,6	165,5	199,5	147,6	203,9	150,9	226,2	167,4
Итого	2091,4	1547,6	2089,0	1545,9	2064,6	1527,8	2028,0	1500,8	2040,4	1509,9

Теоретический потенциал биогаза из отходов животноводства на начало 2023 г. составляет 2040,4 млн м³/год, а технически возможный потенциал – 1512,7 млн м³/год.

Для увеличения выхода биогаза возможно использовать не только основное сырье (отходы жизнедеятельности животных), но и отходы пищевой промышленности (в первую очередь мясокомбинатов), а также отходы растениеводства (зеленая масса, силос, солома и др.). Потенциальным сырьем для производства биогаза могут служить отходы от производства рапсового масла – 660 м³ на тонну отходов рапсового жмыха, а также силос кукурузы и солома зерновых культур – соответственно 200 м³ и 190 м³ на тонну отходов [14]. Площади возделывания озимого рапса, кукурузы и зерновых культур стабильны и имеют тенденцию к расширению, поэтому использование этих растительных отходов в качестве субстрата может существенно увеличить выход биогаза в условиях Республики Беларусь.

Таблица 3

Технически возможный потенциал получения биогаза из отходов животноводства в Республике Беларусь
Technically possible potential of biogas production from animal husbandry waste in the Republic of Belarus

Вид животного	2019 г.		2020 г.		2021 г.		2022 г.		2023 г.	
	млн м ³ /год	тыс. т у. т./год	млн м ³ /год	тыс. т у. т./год	млн м ³ /год	тыс. т у. т./год	млн м ³ /год	тыс. т у. т./год	млн м ³ /год	тыс. т у. т./год
Крупный рогатый скот	1182,7	875,2	1171,9	867,2	1171,3	866,8	1157,4	856,5	1151,2	851,9
Свиньи	144,9	107,2	148,7	110,1	149,4	110,6	132,9	98,4	132,5	98,1
Овцы	0,98	0,73	0,98	0,73	1,1	0,8	0,9	0,7	0,84	0,62
Козы	0,08	0,06	0,08	0,06	0,08	0,06	0,08	0,06	0,15	0,11
Лошади	3,1	2,3	2,7	2,0	2,4	1,8	2,2	1,6	1,8	1,3
Птица	214,8	158,9	223,6	165,5	199,5	147,6	203,9	150,9	226,2	167,4
Итого	1546,6	1144,4	1548,0	1145,6	1523,8	1127,7	1497,4	1108,2	1512,7	1119,4

ВЫВОДЫ

1. Изменение структуры производства электроэнергии в Республике Беларусь с вводом в эксплуатацию Белорусской АЭС приводит к необходимости изменения производственной деятельности биогазовых комплексов. Производство возобновляемой энергии из биомассы остается актуальным, поскольку способствует декарбонизации энергетического сектора и имеет неоспоримые экологические преимущества. В сложившихся услови-

ях для каждого функционирующего биогазового комплекса следует разработать индивидуальный проект по улучшению производственной деятельности, в том числе по оптимизации структуры производимой энергии и ее использованию, а также получению дополнительных продуктов с добавленной стоимостью (биогумус и др.).

2. По результатам оценки технически возможного потенциала биогаза из отходов животноводства, при сохранении численности поголовья скота в сельскохозяйственных организациях на уровне начала 2023 г., имеется возможность ежегодного замещения в топливном балансе республики 982 млн м³ природного газа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Национальная стратегия устойчивого социально-экономического развития Республики Беларусь на период 2030 года [Электронный ресурс]. Минск, 2017. Режим доступа: <https://economy.gov.by/uploads/files/NSUR2030/Natsionalnaja-strategija-ustojchivogo-sotsialno-ekonomicheskogo-razvitija-Respubliki-Belarus-na-period-do-2030-goda.pdf>.
2. О Государственной программе «Энергосбережение» на 2021–2025 годы [Электронный ресурс]: постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 24 февр. 2021 г., № 103 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. Режим доступа: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C22100103>.
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. Кляусова, Ю. В. Перспективы развития биогазовых технологий в Республике Беларусь / Ю. В. Кляусова, А. А. Цыганова, Г. В. Бельская // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. 2023. № 4. С. 52–56.
5. Реестр выданных сертификатов о подтверждении происхождения энергии на 31.07.2023 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://minpriroda.gov.by/uploads/files/2023/Reestr-sertifikatov-aktual.docx>.
6. Кляусова, Ю. В. Управление осадком метанового брожения биомассы для получения биогаза / Ю. В. Кляусова, А. А. Цыганова, Г. В. Бельская // Вестник Брестского государственного технического университета. 2024. № 1 (133). С. 144–148. <https://doi.org/10.36773/1818-1112-2024-133-1-144-148>.
7. Величко, В. В. Эффективность и проблемы использования биогазовых технологий / В. В. Величко, С. П. Кундас // Сахаровские чтения 2016 года: экологические проблемы XXI века: материалы 16-й Междунар. науч. конф., 19–20 мая 2016 г., г. Минск / под ред. С. А. Маскевича, С. С. Позняка, Н. А. Лысухо. Минск: МГЭИ им. А.Д. Сахарова БГУ, 2016. С. 266.
8. Kliausava, Y. V. Using of organic sludge to improve the efficiency of biogas technologies / Y. V. Kliausava, H. A. Tsyhanava, H. V. Belskaya // Вестник Брестского государственного технического университета. 2023. № 3 (132). С. 75–77. <https://doi.org/10.36773/1818-1112-2023-132-3-75-77>.
9. Исаков, В. Г. Энергетическая эффективность малого биореактора в различных климатических зонах / В. Г. Исаков, А. А. Абрамова, М. Ю. Дягелев // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энергетич. объединений СНГ. 2020. Т. 63, № 4. С. 355–364. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-4-355-364>.

10. Бельская, Г. В. Оценка эффективности использования биогазовых технологий при производстве энергии в Республике Беларусь / Г. В. Бельская, Е. В. Зеленухо, П. В. Зубик // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 12-й Междунар. науч.-техн. конф. Т. 4. Минск: БНТУ, 2014. С. 482–483.
11. Бельская, Г. В. Факторы повышения эффективности производства и использования биогаза / Г. В. Бельская, А. А. Хрипович, Е. В. Зеленухо // Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики: сб. науч. трудов 16-й Междунар. конф. по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики. Тула, 2020. Т. 1. С. 71–77.
12. Сельское хозяйство Республики Беларусь [Электронный ресурс]: Статистический буклет / Национальный статистический комитет Республики Беларусь. Минск, 2023. Режим доступа: <https://www.belstat.gov.by/upload/iblock/e44/omhrgtzoda196g3yr9b2r81r71vexa2k.pdf>.
13. Любчик, О. А. Исследование потенциала и получения биогаза в животноводческих комплексах Республики Беларусь / О. А. Любчик // Энергоэффективность. 2021. № 5. С. 24–27.
14. 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. трудов 15-й Междунар. конф. по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики. Минск, 2019. Т. 2. С. 104–110.

Поступила 27.06.2024 Подписана в печать 22.10.2024 Опубликована онлайн 29.11.2024

REFERENCES

1. *National Strategy for Sustainable Socio-Economic Development of the Republic of Belarus for the Period up to 2030*. Minsk, 2017. Available at: <https://economy.gov.by/uploads/files/NSUR2030/Natsionalnaja-strategija-ustojchivogo-sotsialno-ekonomicheskogo-razvitiija-Respubliki-Belarus-na-period-do-2030-goda.pdf> (in Russian).
2. On the “Energy Saving” State Program for 2021–2025. Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus dated February 24, 2021 No 103. *National Legal Internet Portal of the Republic of Belarus*. Available at: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C22100103> (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. Kliausova Iu. V., Tsyganova A. A., Belskaia G. V. (2023) Prospects for the Development of Biogas Technologies in the Republic of Belarus. *Vestnik Belorusskoi Gosudarstvennoi Sel'skokhozyaistvennoi Akademii = Bulletin of the Belarussian State Agricultural Academy*, (4), 52–56 (in Russian).
5. The Register of Issued Certificates Confirming the Origin of Energy as of 07/31/2023. Available at: <https://minpriroda.gov.by/uploads/files/2023/Reestr-sertifikatov-aktual.docx> (in Russian).
6. Kliausava Y. V., Tsyhanava H. A., Belskaya H. V. (2024) Management of Sludge Produced by Biomass Methane Fermentation to Obtain Biohumus. *Vestnik of Brest State Technical University. Civil Engineering and Architecture*, (1), 144–148. <https://doi.org/10.36773/1818-1112-2024-133-1-144-148> (in Russian).
7. Velichko V. V., Kundas S. P. (2016) Efficiency and Problems of Biogas Technologies. *Sakharov Readings 2016: Environmental Problems of the XXI Century. Proceedings of the 16th International Scientific Conference May 19–20, 2016 Minsk*. Minsk, International State Eco-

- logical Institute Named after A. D. Sakharov of the Belarusian State University, 266 (in Russian).
8. Kliausava, Y. V., Tsyhanava, A. A., Belskaya, G. V. (2023) Using of Organic Sludge to Improve the Efficiency of Biogas Technologies. *Vestnik of Brest State Technical University*, No 3 (132), 75–77. <https://doi.org/10.36773/1818-1112-2023-132-3-75-77>.
 9. Isakov V. G., Abramova A. A., Dyagelev M. Yu. (2020) Energy Efficiency of a Small Bioreactor in Various Climatic Zones. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 63 (4), 355–364. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-4-355-364> (in Russian).
 10. Belskaya G. V., Zelenukho E. V., Zubik P. V. Evaluation of the Efficiency of Using Biogas Technologies in Energy Production in the Republic of Belarus. *Science – to Education, Manufacturing, Economy: Materials of the 12th International Scientific and Technical Conference*. (4), Minsk: BNTU, 2014, 482–483.
 11. Belskaya G. V., Khripovich A. A., Zelenukho E. V. (2020) Factors of Increasing the Efficiency of Biogas Production and Use. *Sotsial'no-Ekonomicheskie i ekologicheskie Problemy Gornoj Promyshlennosti, Stroitel'stva i Energetiki: sb. nauch. trudov 16-i Mezhdunar. konf. po Problemam Gornoj Promyshlennosti, Stroitel'stva i Energetiki. T 1* [Socio-Economic and Ecological Problems of Mining, Construction and Energy: Collection of Scientific Papers of the 16th International Conference on Problems of Mining, Construction and Energy. Vol. 1]. Tula, 71–77 (in Russian).
 12. National Statistical Committee of the Republic of Belarus (2023) *Agriculture of the Republic of Belarus. Statistical Booklet*. Minsk. Available at: <https://www.belstat.gov.by/upload/iblock/e44/omhrgtzoda196g3yr9b2r81r71vexa2k.pdf> (in Russian).
 13. Lyubchik O. A. (2021) Investigation of the Potential and Production of Biogas in Livestock Complexes of the Republic of Belarus. *Energoeffektivnost' [Energy Efficiency]*, (5), 24–27 (in Russian).
 14. Zelenukho E. V., Belskaya G. V., Rolevich I. V. (2019) The Main Directions of Increasing the Efficiency of Biogas Production. *Sotsial'no-Ekonomicheskie i Ekologicheskie Problemy Gornoj Promyshlennosti, Stroitel'stva i Energetiki: sb. nauch. trudov 15-i Mezhdunar. konf. po Problemam Gornoj Promyshlennosti, Stroitel'stva i Energetiki. T. 2* [Socio-Economic and Environmental Problems of Mining, Construction and Power Engineering” – the 15th International Conference on Mining, Construction and Power Engineering. Collection of Scientific Papers. Vol. 2]. Minsk, BNTU, 104–110 (in Russian).