

Крылов Игорь Олегович

*Канд. техн. наук, доцент, Университет науки и технологий МИСИС,
Россия, г. Москва*

Некля Виктория Викторовна

*Студент, Университет науки и технологий МИСИС,
Россия, г. Москва*

МЕТОДИКА КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ БИОГАЗОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ НА ЖИВОТНОВОДЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ

Аннотация. В статье представлена методика комплексной оценки эффективности внедрения технологии анаэробного сбраживания побочных продуктов животноводства (ППЖ). Предлагаемый подход объединяет три взаимосвязанных блока: оценку ресурсного и энергетического потенциала сырья, количественную оценку экологических эффектов, включая сокращение выбросов парниковых газов и снижение класса опасности отходов, а также расчет экономической эффективности проекта. Методика может быть адаптирована для предприятий различного масштаба и типа производства.

Abstract. The article presents a methodology for the comprehensive assessment of the effectiveness of introducing anaerobic digestion technology for animal by-products (ABP). The proposed approach combines three interrelated blocks: assessment of the resource and energy potential of the feedstock, quantitative evaluation of environmental effects, including reduction of greenhouse gas emissions and lowering the waste hazard class, as well as calculation of the project's economic efficiency. The methodology can be adapted for enterprises of various scales and types of production.

Ключевые слова: анаэробное сбраживание, биогаз, побочные продукты животноводства, экологическая эффективность, экономическая эффективность, методика оценки, возобновляемая энергетика.

Keywords: anaerobic digestion, biogas, animal by-products, environmental efficiency, economic efficiency, assessment methodology, renewable energy.

Современное развитие агропромышленного комплекса сопровождается необходимостью увеличения объемов производства животноводческой

продукции и ужесточением требований к экологической безопасности. Побочные продукты животноводства, прежде всего навоз и помет, традиционно рассматриваются как отходы, требующие затратных и, зачастую, не всегда экологичных методов утилизации. Однако в условиях перехода к экономике замкнутого цикла данные субстанции приобретают статус ценного вторичного ресурса, вовлечение которого в хозяйственный оборот позволяет не только снизить нагрузку на окружающую среду, но и получить дополнительный экономический эффект [7].

Технология анаэробного сбраживания органических отходов с получением биогаза и стабилизированного дигестата представляет собой одно из наиболее перспективных направлений «зеленой» экономики сельского хозяйства [4]. В процессе метаногенеза сложные органические соединения под действием микроорганизмов последовательно преобразуются в метан и углекислый газ, что позволяет утилизировать отходы и при этом генерировать электрическую и тепловую энергию [1,10].

Несмотря на очевидные преимущества и успешный опыт внедрения биогазовых технологий в странах Европейского Союза, где совокупная мощность установок превышает 5000 МВт [2], в России данный сегмент возобновляемой энергетики остается недостаточно развитым. Одной из основных причин сложившейся ситуации является отсутствие у руководителей хозяйств апробированных и прозрачных методик оценки эффективности подобных проектов на предынвестиционной стадии. На данный момент существующие методические подходы зачастую носят фрагментарный характер, рассматривая либо энергетический, либо экономический аспекты проблемы, что, в свою очередь, не позволяет сформировать полноценное представление о целесообразности внедрения технологии в производство [5].

Процесс анаэробного сбраживания органических субстратов является сложным многостадийным биохимическим процессом, протекающим в отсутствие кислорода под действием различных групп микроорганизмов [1,8]. В современном понимании метаногенез включает четыре последовательные

стадии: гидролиз, ацидогенез, ацетогенез и метаногенез. На этапе гидролиза сложные нерастворимые органические полимеры – целлюлоза, гемицеллюлоза, белки, липиды – расщепляются экзоферментами гидролитических бактерий до растворимых мономеров: моносахаров, аминокислот и длинноцепочечных жирных кислот. В ходе ацидогенеза, то есть кислотообразования, продукты гидролиза подвергаются дальнейшему разложению до летучих жирных кислот (ЛЖК), спиртов, водорода и углекислого газа. На третьем этапе, ацетогенезе, образовавшиеся ЛЖК окисляются ацетогенными бактериями до уксусной кислоты, водорода и углекислого газа. Заключительный этап – метаногенез – осуществляется двумя группами метаногенных архей: ацетотрофные метаногены преобразуют уксусную кислоту в метан и углекислый газ, а гидрилотрофные метаногены восстанавливают углекислый газ водородом до метана [9].

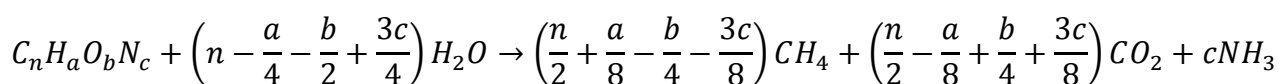
Эффективность конверсии органического вещества в биогаз лимитируется рядом факторов, среди которых важное значение имеют состав субстрата, температурный режим и время гидравлического удержания. Различают три температурных режима анаэробного сбраживания: психрофильный (15–25 °C), мезофильный (35–40 °C) и термофильный (50–60 °C) [1,9]. Мезофильный режим является наиболее распространенным для переработки навоза крупного рогатого скота ввиду хорошего баланса между скоростью процесса, стабильностью работы метаногенного консорциума и энергетическими затратами на подогрев. Термофильный режим, несмотря на более высокую скорость разложения и степень обеззараживания, требует повышенного энергопотребления и характеризуется меньшей устойчивостью к колебаниям параметров.

Химический состав сырья определяет его метаногенный потенциал. Наиболее значимыми характеристиками являются содержание сухого вещества, доля органического вещества в сухом остатке и соотношение углерода к азоту (C:N). Навоз крупного рогатого скота характеризуется содержанием сухого вещества 8–14%, органического вещества 75–85% от сухого остатка и соотношением C:N в диапазоне 15:1–30:1, что делает его сбалансированным и

технологичным субстратом [1]. В то же время птичий помет с высоким содержанием азота имеет низкое соотношение C:N (3:1–10:1), что при монобразивании может приводить к ингибированию процесса вследствие накопления токсичного аммиака, что требует коррекции состава за счет добавления углеродсодержащих ко-субстратов [8].

Основным этапом оценки эффективности внедрения биогазовых технологий в производство является определение количественных характеристик сырьевой базы. Объем образующихся побочных продуктов животноводства определяется удельным суточным выходом экскрементов на одну голову, который дифференцируется в зависимости от половозрастной группы животных. Так, суточный выход навоза от дойной коровы может составлять 55 кг, от сухостойной коровы – 37 кг, от молодняка на откорме – 26 кг, от телят – 14 кг [1]. При расчете годовой массы необходимо учитывать продолжительность стойлового периода, характерную для конкретного климатического пояса, в течение которого сбор и утилизация отходов контролируются технологической схемой предприятия. Общая годовая масса навоза, поступающего на переработку, определяется как сумма произведений поголовья каждой группы на соответствующий суточный норматив и на продолжительность стойлового периода.

Следующим шагом является определение содержания сухого и органического вещества в навозе, поскольку именно эти фракции являются субстратом для микроорганизмов. Масса сухого вещества рассчитывается как произведение общей массы навоза на долю сухого вещества в процентах. Масса органического вещества, в свою очередь, определяется как произведение массы сухого вещества на долю органического вещества в сухом остатке. На основе этих данных может быть рассчитан теоретический выход биогаза с использованием стехиометрического уравнения Бусвелла, которое описывает стехиометрию анаэробного разложения органического вещества общего вида $C_nH_aO_bN_c$:



Однако на практике достичь теоретического выхода невозможно вследствие ряда ограничений: часть органического вещества расходуется на прирост биомассы микроорганизмов, часть органики представлена сложными соединениями, часть остается в дигестате. Поэтому для инженерных расчетов используют понятие «технически достижимый выход биогаза», который корректируется с помощью коэффициента разложения органического вещества. Для мезофильного сбраживания навоза крупного рогатого скота в реакторах полного смешения при времени гидравлического удержания 25–35 суток коэффициент разложения составляет 0,45–0,65. Принимая среднее значение 0,55, технически достижимый выход биогаза для навоза КРС составляет около 20–35 м³ на тонну исходного субстрата. Содержание метана в биогазе при стабильном процессе колеблется в пределах 55–65%, что определяет его энергетическую ценность [10].

Расчет энергетического потенциала биогаза основывается на низшей теплоте сгорания метана, которая составляет 35,88 МДж/м³ при нормальных условиях. Низшая теплота сгорания биогаза при содержании метана 60% составляет 21,53 МДж/м³. Годовой энергетический потенциал определяется как произведение годового объема биогаза на его теплотворную способность. При использовании когенерационной установки часть энергии преобразуется в электрическую, часть – в тепловую. Типовые значения КПД для современных газопоршневых установок составляют: электрический КПД – 35–42%, тепловой КПД – 45–50% [1]. Таким образом, общий КПД когенерации достигает 85–90%, что делает биогазовую технологию высокоэффективной с точки зрения использования энергетического потенциала сырья.

Существенное значение имеет определение доли энергии, расходуемой на собственные нужды биогазовой установки, прежде всего на поддержание температуры в метантенках и работу насосного и перемешивающего оборудования. Эта доля составляет 8–12% от вырабатываемой электроэнергии и 10–15% от тепловой энергии [6]. После вычета собственных нужд определяется чистая электрическая мощность, которая может быть реализована на внешнем

рынке или использована для замещения покупной электроэнергии. Аналогично определяется объем тепловой энергии, доступный для отопления производственных и бытовых помещений, что позволяет заместить природный газ или другие виды топлива.

Экологический эффект от внедрения биогазовой технологии проявляется в трех основных направлениях: сокращение выбросов парниковых газов, предотвращение загрязнения водных объектов и почв, а также улучшение качества атмосферного воздуха на локальном уровне. Количественная оценка этих факторов позволяет обосновать экологическую безопасность проекта, а также учесть их в финансовой модели в виде предотвращенных затрат и потенциальных доходов от реализации полученного сырья.

Наиболее значимый вклад в снижение антропогенной нагрузки вносит сокращение эмиссии метана. При традиционном открытом хранении ППЖ в лагунах и навозохранилищах органическое вещество разлагается в неконтролируемых анаэробных условиях, что сопровождается прямым выделением в атмосферу метана – парникового газа, потенциал глобального потепления которого в 28 раз превышает аналогичный показатель для углекислого газа [3]. В герметичных метантенках с системой сбора биогаза весь выделяющийся метан улавливается и направляется в когенерационную установку, где сжигается с образованием углекислого газа. Таким образом, предотвращается прямая эмиссия метана, а образующийся углекислый газ имеет биогенное происхождение и не учитывается в климатическом балансе.

Расчет сокращения выбросов парниковых газов выполняется на основе методики Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) [3]. Исходные выбросы при лагунном хранении определяются как произведение массы сухого вещества в навозе, максимального удельного выхода метана (для крупного рогатого скота – $0,17 \text{ м}^3$ на кг сухого вещества), коэффициента конверсии метана (для лагун – $0,80$) и потенциала глобального потепления для метана. Выбросы после внедрения биогазовой установки рассчитываются аналогично, но с использованием коэффициента конверсии

метана для систем с утилизацией биогаза, который составляет 0,10. Разность между исходными и проектными выбросами представляет собой предотвращенную эмиссию парниковых газов.

$$E_{CH_4, \text{исх}} = Q_{\text{общ. год}} \times B_0 \times \text{MCF} \times \text{GWP}_{CH_4}$$

где:

$E_{CH_4, \text{исх}}$ – исходные годовые выбросы в эквиваленте CO_2 , т CO_2 –экв./год;

$Q_{\text{общ. год}}$ – масса органического вещества (по сухому остатку) в поступающем на хранение навозе, т СВ/год;

B_0 – максимальный удельный выход метана. Для крупного рогатого скота (КРС) значение составляет $B_0 = 0,17 \text{ м}^3 \text{ CH}_4/\text{кг СВ}$;

MCF – коэффициент конверсии метана, отражающий долю потенциала образования метана, реализуемую в конкретной системе управления навозом в течение года. Для систем лагунного хранения MCF = 0,80 (80%);

GWP_{CH_4} – коэффициент потенциала глобального потепления для метана.

Согласно 5–му оценочному докладу МГЭИК, $\text{GWP}_{CH_4} = 28 \text{ т } CO_2\text{–экв.}/\text{т } CH_4$.

Дополнительный вклад в сокращение углеродного следа вносит замещение ископаемого топлива за счет использования электрической и тепловой энергии, генерируемой когенерационной установкой. При производстве электроэнергии и тепла из биогаза происходит вытеснение энергии, которая была бы получена сжиганием природного газа или иного органического топлива. Эффект замещения оценивается на основе факторов выбросов углекислого газа при производстве единицы энергии из традиционных источников. Для энергосистемы Центрального региона России фактор выбросов при производстве электроэнергии составляет 0,35 т CO_2 /МВт·ч, для тепловой энергии от газовой котельной – около 0,20 т CO_2 /МВт·ч. Суммарное годовое сокращение выбросов парниковых газов складывается из предотвращенной

эмиссии метана и эффекта замещения ископаемого топлива и выражается в тоннах CO₂-эквивалента в год.

Вторым важным аспектом экологической эффективности является изменение класса опасности отходов. Свежий бесподстилочный навоз крупного рогатого скота традиционно относится к IV классу опасности, малоопасные отходы, что обусловлено высоким содержанием патогенной микрофлоры, жизнеспособных семян сорных растений и яиц гельминтов. Процесс анаэробного сбраживания, особенно при термофильном режиме, обеспечивает санацию субстрата: снижение количества патогенных микроорганизмов, включая *Salmonella* spp. и *Escherichia coli*, достигает 99,9% [1,9]. Одновременно происходит стабилизация органического вещества: легкоразлагаемые соединения трансформируются в метан и углекислый газ, а в дигестате остаются преимущественно трудноразлагаемые формы органики. В результате этих изменений дигестат может быть отнесен к V классу опасности, практически неопасные, или использован в качестве ППЖ в соответствии с действующим законодательством [7]. Это позволяет предприятию существенно снизить или полностью исключить плату за негативное воздействие на окружающую среду при размещении отходов.

Третий компонент экологического эффекта связан с предотвращением загрязнения водных объектов биогенными элементами. При традиционном хранении навоза в открытых лагунах неизбежны потери азота и фосфора с поверхностным стоком и фильтрацией в грунтовые воды, что приводит к эвтрофикации водоемов. Переход к герметизированной системе переработки с контролируемым внесением дигестата на поля в агрономически обоснованных дозах минимизирует эти потери. Количественная оценка предотвращенного ущерба водным объектам может быть выполнена на основе масс выносимых биогенных элементов и утвержденных такс для исчисления размера вреда водным объектам.

Экономический блок методики построен на сопоставлении инвестиционных затрат, эксплуатационных расходов и доходов, генерируемых

проектом в течение расчетного периода. Для интегральной оценки инвестиционной привлекательности используются стандартные показатели: чистый дисконтированный доход (NPV), внутренняя норма доходности (IRR) и дисконтированный срок окупаемости (DPP). Методика предусматривает также проведение анализа чувствительности для оценки устойчивости проекта к изменению ключевых параметров [5].

Капитальные затраты (CAPEX) представляют собой совокупность единовременных инвестиций, необходимых для создания биогазовой установки, готовой к эксплуатации. В состав CAPEX входят затраты на проектно-изыскательские работы, приобретение и доставку основного технологического оборудования: метантенки, газгольдер, когенерационная установка, системы очистки биогаза, система автоматизации, строительно-монтажные работы, пусконаладочные работы и обучение персонала, а также резерв на непредвиденные расходы. Структура капитальных затрат может быть представлена следующим образом: технологическое оборудование составляет 45–55% от общей суммы, строительно-монтажные работы – 25–35%, проектные работы – 5–10%, пусконаладочные работы – 3–7%, резерв – 5–10% [6].

Годовые эксплуатационные затраты (OPEX) включают несколько категорий расходов. Затраты на сырье в случае переработки собственного навоза животноводческого предприятия принимаются равными нулю, однако при необходимости использования дополнительных ко-субстратов, например силос или отходы пищевых производств, они учитываются по рыночным ценам. Затраты на электроэнергию для собственных нужд установки покрываются из собственной генерации. Расходы на техническое обслуживание и ремонт оборудования, включая замену расходных материалов и проведение планово-предупредительных ремонтов, составляют около 8% от капитальных затрат на оборудование в год. Затраты на заработную плату персонала определяются штатным расписанием, которое для установки мощностью 1–2 МВт может включать начальника участка, четырех операторов (посменная работа), лаборанта-химика и слесаря-ремонтника, всего 7 человек, с расчетом

среднемесячной заработной платы по региону и учетом страховых взносов. Административно-управленческие расходы, включая страхование, охрану труда и прочие услуги, принимаются на уровне 10% от суммы основных расходов. В целом годовые эксплуатационные расходы для биогазовых установок на навозе КРС составляют 5–7% от капитальных затрат [5,6].

Основной источник доходной части проекта – реализация электроэнергии, произведенной когенерационной установкой. При продаже на розничный рынок по «зеленому» тарифу стоимость электроэнергии может достигать 8–12 руб./кВт·ч с учетом надбавки, при замещении покупной электроэнергии по обычному тарифу для сельскохозяйственных предприятий – около 6–8 руб./кВт·ч. Объем реализуемой электроэнергии определяется как годовая выработка за вычетом собственных нужд биогазовой установки.

Второй источник дохода – экономия от замещения природного газа за счет использования тепловой энергии когенерационной установки. Тепло может быть направлено на поддержание температуры в метантенках, отопление производственных и бытовых помещений, а также на горячее водоснабжение. Экономия рассчитывается как стоимость сэкономленного объема газа, который ранее сжигался в собственной котельной. При цене природного газа для промышленных потребителей 6,5–8,0 руб./м³ и КПД котельной 0,92 экономический эффект от использования тепла биогазовой установки является весьма значительным [6].

Третий источник – экономия на приобретении минеральных удобрений за счет использования дигестата на собственных полях. Дигестат, являясь обеззараженным и стабилизированным органическим продуктом, содержит основные элементы питания растений: азот (0,4–0,6% в свежем веществе), фосфор (0,2–0,3% в пересчете на P₂O₅) и калий (0,4–0,6% в пересчете на K₂O). Благодаря высокой доступности питательных элементов для растений и сбалансированному составу дигестат может частично замещать дорогостоящие минеральные удобрения [8]. Экономический эффект рассчитывается как стоимость замещаемого объема минеральных удобрений с корректировкой на

коэффициент доступности элементов из дигестата (для азота – 0,7–0,8, для фосфора и калия – 0,9–1,0).

Дополнительными источниками дохода являются снижение платы за негативное воздействие на окружающую среду за счет перевода отходов в категорию побочных продуктов или V класса опасности [7], а также потенциальный доход от продажи углеродных единиц в случае регистрации климатического проекта [3]. Цена углеродной единицы на российском добровольном рынке в 2024–2026 гг. варьируется от 500 до 1500 руб./т CO₂-экв. Учет этого источника, хотя и требует дополнительных процедур верификации, позволяет улучшить экономические показатели и повысить инвестиционную привлекательность. На основе сформированных денежных потоков выполняется расчет интегральных показателей эффективности. Чистый дисконтированный доход (NPV) рассчитывается как сумма дисконтированных чистых денежных потоков за расчетный период. Чистый дисконтированный доход представляет собой сумму всех дисконтированных денежных потоков проекта за расчётный период, приведённых к моменту начала инвестиций (нулевой год). Формула расчета:

$$NPV = \sum_{t=0}^T \frac{CF_t}{(1+r)^t}$$

где:

CF_t – денежный поток в году t (отрицательный для инвестиционного периода, положительный для операционного);

r – ставка дисконтирования (норма дисконта), доли единицы;

T – горизонт расчёта, лет (принимаем 15 лет, что соответствует средневзвешенному сроку службы оборудования).

Ставка дисконтирования обосновывается на основе модели кумулятивного построения или средневзвешенной стоимости капитала. Для проектов в сфере переработки отходов и возобновляемой энергетики ставка дисконтирования обычно принимается на уровне 12–18%. Проект признается экономически

эффективным при положительном значении NPV. Внутренняя норма доходности (IRR) определяется как ставка дисконтирования, при которой NPV обращается в ноль, и отражает максимальную стоимость капитала, который можно привлечь для реализации проекта. Дисконтированный срок окупаемости (DPP) показывает период, необходимый для возврата инвестированных средств с учетом временной стоимости денег, и является важным критерием для инвесторов, чувствительных к риску [5].

Для учета неопределенности и оценки устойчивости проекта рекомендуется выполнять анализ чувствительности путем последовательного изменения основных параметров в диапазоне $\pm 10\text{--}20\%$ от базового значения: тариф на электроэнергию, капитальные затраты, выход биогаза, цена природного газа. Наиболее чувствительными факторами для биогазовых проектов являются тариф на продажу электроэнергии и удельные капитальные затраты. Это необходимо учитывать при формировании инвестиционной стратегии и разработке мер государственной поддержки [5,6].

Представленная методика позволяет на основе исходных данных о поголовье животных и его структуре количественно оценить объем образующихся побочных продуктов и их энергетический потенциал; оценить экологический эффект в виде сокращения выбросов парниковых газов, снижения класса опасности отходов и предотвращения загрязнения водных объектов; рассчитать капитальные и эксплуатационные затраты, а также сформировать доходную часть проекта из всех значимых источников; определить показатели эффективности и оценить устойчивость проекта к изменению внешних условий.

Методика может быть адаптирована для предприятий различных масштабов, использующих различные типы ППЖ, а также для проектов различной мощности – от фермерских установок до крупных промышленных комплексов. Ее применение позволит обосновать инвестиционные решения в сфере возобновляемой энергетики, снизить риски и повысить привлекательность проектов переработки побочных продуктов животноводства.

В условиях перехода к экономике замкнутого цикла и ужесточения экологических требований внедрение биогазовых технологий становится не просто экономически целесообразным, но и стратегически необходимым направлением развития агропромышленного комплекса.

Список литературы:

1. Баадер В., Дене Е., Беннидерфер М. Биогаз: теория и практика. – М.: Колос, 2005. – 196 с.
2. Европейская биогазовая ассоциация (ЕВА). Statistical Report 2023. – Brussels, 2023.
3. Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК). Уточненные руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов 2019 года. – Женева, 2019.
4. Попель О.С., Мастеров В.А. Возобновляемые источники энергии : учебное пособие. – М. : Издательский дом МЭИ, 2019. – 452 с.
5. Рубцов А.А., Алабина Т.А., Махрачева И.В. Эффективность внедрения биогазовых установок как стратегически важного проекта в Российской Федерации // Экономика промышленности. – 2023. – Т. 16, № 4. – С. 468–477.
6. Тимофеев Е.В., Эрк А.Ф. Энергоэффективность технологий и технических средств при переработке органических отходов животноводства // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса. – 2020. – № 3(59). – С. 388–394.
7. Федеральный закон от 14 июля 2022 г. № 248-ФЗ «О побочных продуктах животноводства и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».
8. Mata-Alvarez J., Macé S., Llabrés P. Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives // Bioresource Technology. – 2014. – Vol. 74, № 1. – P. 3–16.
9. Song Y.-C., Kwon S.-J., Woo J.-H. Mesophilic and thermophilic temperature co-phase anaerobic digestion compared with single-stage mesophilic- and thermophilic digestion of sewage sludge // Water Research. – 2004. – Vol. 38. – P. 1653–1660.

10. Weiland P. Biogas production: current state and perspectives // Applied Microbiology and Biotechnology. – 2010. – Vol. 85, № 4. – P. 849–860.