



Научная статья

2.6.13. Процессы и аппараты химических технологий (технические науки)
УДК 620.95

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.04.040

EDN: ONNXMY

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ СБРАЖИВАНИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ ОСТАТКОВ АГРОПРОИЗВОДСТВА С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ВЫХОДА БИОГАЗА

Сайфутдинова Рамиля Дамировна¹, Светлана Владимировна Степанова²,
Анна Александровна Алексеева³

^{1, 2, 3} Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия

¹ zai02@inbox.ru, <https://orcid.org/0009-0009-6235-190X>

² ssvkan@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4831-313X>

³ annank90@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6119-1934>

Аннотация. В статье рассмотрена актуальная задача утилизации органических отходов агропромышленного комплекса с одновременным получением энергетического и арохимического продукта. В качестве исследуемого объекта выбрана технология анаэробного сбраживания куриного помёта с добавлением свекловичной мелассы. Проведён лабораторный эксперимент по оценке влияния добавки мелассы на динамику образования биогаза. Установлено, что при соотношении компонентов навоз : меласса : вода = 1 : 1 : 3 и температуре более 45 °C достигается прирост газообразования на 40 % по сравнению с контролем, где использовался только куриный помёт. Проведено сравнение трёх температурных режимов (психрофильного, мезофильного и термофильного). Подтверждена высокая стабильность и эффективность сбраживания при термофильных условиях. Предложена принципиальная схема замкнутого цикла переработки органических отходов, включающая этапы подготовки субстрата, ферментации, сбора биогаза и получения биоудобрения. На основе расчёта материального баланса определены потери сырья и продуктов, а также доля возвратных компонентов. Расчёты экономической эффективности показали, что при себестоимости 170 399 рублей на одну тонну готовой продукции и прогнозируемой выручке 207 965 рублей достигается чистая прибыль в размере 37 565 рублей. Обоснована возможность промышленного внедрения предложенного подхода как устойчивого решения в области обращения с агроотходами, сочетающего экологическую безопасность, экономическую целесообразность и аграрную эффективность.

Ключевые слова: утилизация, куриный помёт, меласса (патока), анаэробное брожение, биогаз, замкнутый цикл.

Благодарности: автор выражает признательность коллегам за помощь, благодарность за финансовую поддержку исследования.

Для цитирования: Сайфутдинова Р. Д., Степанова С. В., Алексеева А. А. Совершенствование технологии сбраживания органических остатков агропроизводства с целью повышения выхода биогаза // Ползуновский вестник. 2025. № 4, С. 237–242. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.04.040. EDN: <https://elibrary.ru/ONNXMY>.

Original article

IMPROVEMENT OF TECHNOLOGY OF DIGESTION OF ORGANIC RESIDUES OF AGRICULTURAL PRODUCTION IN ORDER TO INCREASE BIOGAS OUTPUT

Ramilya D. Sayfutdinova¹, Svetlana V. Stepanova², Anna A. Alekseeva³,

^{1, 2, 3} Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

¹ zai02@inbox.ru, <https://orcid.org/0009-0009-6235-190X>

² ssvkan@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4831-313X>

³ annank90@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6119-1934>

Abstract. The article considers the actual task of utilization of organic waste agroindustrial complex with simultaneous obtaining of energy and agrochemical product. The technology of anaerobic digestion of chicken manure with the addition of beet molasses is chosen as the object under study. The laboratory experiment was conducted to assess the influence of molasses addition on the dynamics of biogas formation. It was found that at the ratio of components manure : molasses : water = 1 : 1 : 3 and temperature more than 45 °C the increase of gas formation by 40 % is achieved in comparison with the control, where only chicken manure was used. Comparison of three temperature regimes (psychrophilic, mesophilic and thermophilic) was carried out, high stability and efficiency of digestion under thermophilic conditions was confirmed. The principal scheme of the closed cycle of organic waste processing including the stages of substrate preparation, fermentation, biogas collection and biofertilizer production was proposed. On basis of material balance calculation the losses of raw materials and products were determined, and also the share of return components. Calculations of economic efficiency showed that at the cost price of 170,399 rubles per one ton of finished product and projected revenue of 207,965 rubles a net profit of 37,565 rubles is achieved. The possibility of industrial implementation of the proposed approach as a sustainable solution in the field of agro-waste management, combining

© Сайфутдинова Р. Д., Степанова С. В., Алексеева А. А., 2025

environmental safety, economic feasibility and agrarian efficiency was substantiated. (Translated with DeepL.com (free version)).

Keywords: utilization, chicken manure, molasses (molasses), anaerobic fermentation, biogas, closed cycle.

Acknowledgements: the author expresses gratitude to his / her colleagues for their help, thanks for the financial support of the research.

For citation: Sayfutdinova, R.D., Stepanova, S.V., Alekseeva, A.A. (2025). Improvement of technology of digestion of organic residues of agricultural production in order to increase biogas output. *Polzunovskiy vestnik*, (4), 237-242. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.04.040. EDN: <https://elibrary.ru/ONNXMY>.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях нарастающего экологического кризиса вопросы утилизации органических отходов приобретают особую актуальность. Одним из ключевых источников загрязнения окружающей среды остаются отходы агропромышленного комплекса, особенно органические остатки переработки сельскохозяйственного сырья. По данным Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН (FAO), более 30 % производимых в мире продуктов питания и сельхозсырья теряется или становится отходами, значительная часть которых не утилизируется должным образом. В России ежегодно образуется свыше 150 млн тонн органических отходов [1-3].

На фоне ускоренного истощения традиционных источников энергии и необходимости реализации принципов устойчивого развития всё большее внимание уделяется технологиям замкнутого цикла, способным не только снизить нагрузку на окружающую среду, но и обеспечить вторичное использование отходов в энергетических или агрохимических целях. Одним из перспективных направлений в данной области является производство биогаза посредством анаэробного сбраживания органических остатков. Эта технология позволяет эффективно перерабатывать отходы животноводства, пищевой промышленности и растениеводства, одновременно способствуя снижению выбросов парниковых газов и получению возобновляемых источников энергии [4]. Интеграция таких решений в агросистеме имеет не только технологическое, но и стратегическое значение.

Сахарная свекла — один из видов сырья, из которого производится сахар-песок, являющийся одним из индикаторов, по которому осуществляется оценка продовольственной безопасности любой страны. В 2020 году страны Европы произвели 47,6 % от общего мирового объема сахарной свеклы, страны Азии — 18,6 %, Америки — 13,3 %, Российская Федерация — 13,7 %, страны Африки — 6,7 %. Объемы производства сахара в России обеспечивают как рациональное потребление, так и продовольственное самообеспечение [5].

Отходы данной технической культуры обладают меньшей степенью утилизации и вовлечённости в замкнутый цикл, в отличие от тростникового жмыха, который применяется в качестве биотоплива на местах производства [6].

При среднем уровне выхода продукта в 12 – 13 % от переработанной свеклы образуются следующие побочные материалы:

- свекловичный жом составляет 80 – 83 %; формируется в результате реакции несахаров диффузионного сока с известью и диоксидом углерода. Около 40 % этого отхода используется при кормлении скота в свежем виде, а часть подвергается сушке;

- меласса (5 – 5,5 %) – побочный продукт, который выделяется при центрифугировании сахароносного утфеля на последнем этапе кристаллизации. Из патоки производят этиловый спирт, глицерин, бутанол, ацетон, а также различные кислоты (молочная, уксусная, лимонная и щавелевая);

- фильтрационный осадок занимает 10 – 12 %; применяется для улучшения структуры почвы, производства извести и цемента, а также для создания строительных и асфальтобетонных материалов.

По оценке Института конъюнктуры аграрного рынка (ИКАР), в сезоне 2024/25 г.г. объём производства свекловичного сахара в России с учётом переработки мелассы и сиропа превысил 6,1 млн тонн. Таким образом, только за один перерабатывающий сезон в России образовалось порядка 1,7 – 2,2 млн тонн мелассы.

Несмотря на отсутствие высокого класса опасности (V класс по ГОСТ Р 58427–2020), меласса требует специализированных условий хранения и утилизации. В большинстве случаев её складируют на территории предприятий, что приводит к вторичному загрязнению почв и вод, особенно при длительном хранении.

В связи с этим, разработка технологий, обеспечивающих включение мелассы в экологически замкнутые циклы переработки органических отходов, становится приоритетной задачей. Одним из таких решений является использование патоки в качестве субстрата при анаэробном сбраживании навоза, что позволяет повысить выход биогаза и обеспечить дополнительную утилизацию трудноиспользуемых органических остатков [7].

Существующая проблема образования куриного помёта является актуальной для многих сельскохозяйственных предприятий. Куриный помёт — это один из самых концентрированных видов органических удобрений, однако его неправильное хранение и использование могут привести к ряду экологических и санитарных проблем. Усредненная норма выхода помета с учетом усушки до 65 – 70 % составляет на 1 голову взрослой птицы и молодняка — 42 кг в год. По данным на 2024 год в России насчитывается около 497 миллионов куриц. Следовательно, ежегодно образуется 30 – 35 млн т куриного помёта (рис.1).

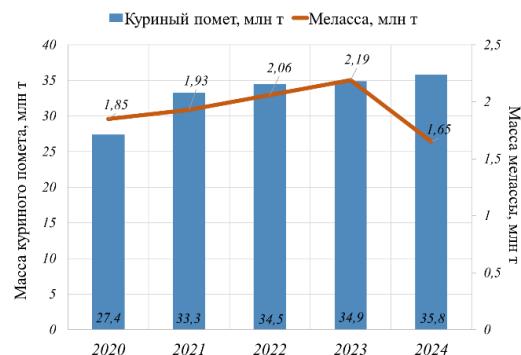


Рисунок 1 – Динамика образования органических отходов

Figure 1 – Dynamics of organic waste generation

Настоящее исследование направлено на обоснование и экспериментальную проверку применения свекловичной мелассы в качестве субстрата для интенсификации процесса анаэробного сбраживания куриного помёта. Разработка и оптимизация таких техно-

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ СБРАЖИВАНИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ ОСТАТКОВ АГРОПРОИЗВОДСТВА С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ВЫХОДА БИОГАЗА

логических решений способствуют решению сразу нескольких задач: экологической, энергетической и агрономической, формируя основу для устойчивого развития агропромышленного сектора.

МЕТОДЫ

На первом этапе определен химический состав субстратов для анаэробного сбраживания. Состав мелассы (по массе): сухие вещества – 76 – 85 %, сахара – 46 – 51 %, общий азот – 1,5 – 2 %, бетаин – 4 – 7 %, редуцирующие вещества – 0,5 – 2,5 %, раффиноза – 0,6 – 1,4 %, молочная кислота – 4 – 6 %, муравьиная и уксусная кислота – по 0,2 – 0,5 %, красящие вещества – 4 – 8 %, зола – 6 – 11 %.

Свежий куриный помёт относится к III классу опасности, а перепревший – к IV. Состав данного сельхозотхода может варьироваться в зависимости от возраста курицы и её рациона. Содержит в своем составе 60 % воды, 4,5 % азота, 1,5 % фосфора, 0,9 % калия и 3,1 % других микроэлементов, таких как кальций и магний, а также 30 % неперевариваемых остатков и балластных веществ.

На следующем этапе проводился эксперимент по получению биогаза, который включал в себя два параллельных опыта: в одном случае в качестве сырья использовался свежий куриный помёт (35 г), а во втором – к нему добавлялась меласса. В реактор (рис. 2), в качестве которой выступала трехгорлая круглодонная колба (3) с мешалкой объемом 2 дм³, помещалось 35 г куриного помёта для первого случая, для второго случая добавлялось 35 г патоки. Из отечественных и зарубежных литературных данных известно, что для процесса образования биогаза необходимо оптимальное соотношение смещивания навоз:вода, равное 1:3 [8, 9], поэтому в реакционную смесь добавлялось 200 см³ дистиллированной воды.

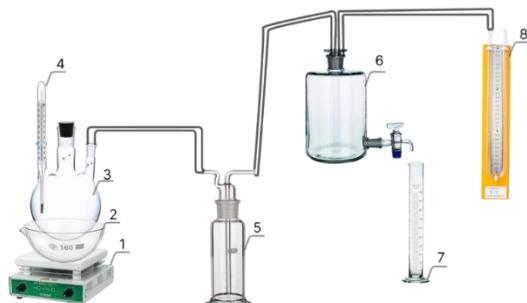


Рисунок 2 – Лабораторная установка для получения биогаза: 1 – электрическая плита с терморегулятором, 2 – водяная баня, 3 – трехгорловая круглодонная колба, 4 – термометр, 5 – склянка Дрекслера, 6 – бутыль Вульфа, 7 – цилиндр, 8 – жидкостной манометр

Figure 2 – Laboratory installation for biogas production:

- 1 - electric stove with thermostat, 2 - water bath, 3 - three-necked round-bottomed flask, 4 - thermometer, 5 - Drexel vial, 6 - Wolf bottle, 7 - cylinder, 8 - liquid manometer

Реактор (3) герметизировался для создания анаэробных условий. С целью проведения этапа адаптации микроорганизмов к питательной среде реакционная смесь выдерживалась при температуре 20 °C в течении двух суток. Для поддержания температуры использовалась электрическая плита с терморегулятором (1), а контроля данного критерия – термометр внутри реактора (4). В последующем реакционная масса нагрева-

лась на водяной бане (2) до необходимой температуры для создания различных режимов сбраживания. Образующийся в результате процесса брожения биогаз проходил через склянку Дрекслера (5), где очищался от углекислого газа и поступал в бутыль Вульфа (6), заполненную водой. Вытесненный объём воды в цилиндре (7) соответствовал объёму выделившегося биогаза. Для контроля герметичности системы лабораторная установка заканчивалась жидкостным манометром (8).

Присутствие метана фиксировалось по характерному синему цвету пламени.

В рамках исследования проводился сравнительный анализ всех трёх температурных режимов анаэробного сбраживания: психрофильного, мезофильного и термофильного (табл. 1).

Таблица 1 – Условия режимов сбраживания

Table 1 – Conditions of digestion modes

Режим	Температура	Время, сут
Психрофильный	До 25 °C	От 30
Мезофильный	25 – 45 °C	20 – 30
Термофильный	Более 45 °C	10 – 20

Перспективным является термофильный диапазон поскольку обеспечивает ускоренное (в 3 – 5 раз) разложение органического субстрата, наибольший выход биогаза с единицы сухого вещества и высокую концентрацию метана. Важным преимуществом является инактивация патогенной микрофлоры, что исключает санитарно-гигиенические риски и упрощает использование остатка в качестве удобрения. Также данный режим позволяет сократить объём биореактора и, как следствие, капитальные затраты. Основной недостаток – повышенные энергозатраты на поддержание температуры, однако они компенсируются высокой производительностью установки [10].

Поддержка оптимальной температуры в течении определенно времени является ключевым фактором, который определяет количество и качество получаемого биогаза, а также продолжительность процесса.

Основными факторами интенсификации процесса получения биогаза являются:

- анаэробные условия в реакторе;
- температура биомассы;
- влажность биомассы;
- перемешивание биомассы;
- продолжительность процесса брожения;
- содержание питательных веществ;
- кислотно-щелочной баланс биомассы в реакторе.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе исследования проанализированы характеристики процесса анаэробного сбраживания при трёх температурных режимах: психрофильном, мезофильном и термофильном. Установлено, что психрофильный режим ($t \leq 25^{\circ}\text{C}$), реализуемый без подогрева, целесообразен только в регионах со среднегодовой температурой около 20 °C. Термофильный режим ($t > 45^{\circ}\text{C}$) обеспечивает ускоренное разложение органического субстрата, повышает выход биогаза и эффективно подавляет патогенную микрофлору. Его высокая энергоёмкость и необходимость строгого температурного контроля (отклонение на $\pm 1^{\circ}\text{C}$ снижает эффективность) компенсируются небольшим размером реакторов и, как следствие меньшими капитальными и эксплуатационными затратами. В то же время частично согласуются с выводами отечественных авторов, показавших, что мезофильный диапазон (30 –

40 °C) обеспечивает наибольшую устойчивость микрофлоры и эффективность процесса при сбраживании куриного помёта [11].

На первый взгляд оптимальные результаты достигались при мезофильном режиме (30 ± 2 °C), который обеспечил выработку биогаза при температурных колебаниях в пределах ± 4 °C. Тем не менее анализ влияния влажности показал, что её недостаток удлиняет процесс ферментации, тогда как избыток снижает выход биогаза вследствие накопления летучих жирных кислот. Поддержание оптимального влагосодержания, перемешивание реакционной массы и обеспечение нейтрального или слабоосновного pH оказались критически важными факторами стабильности процесса.

Согласно литературным данным и экспериментальным наблюдениям, исходный субстрат должен содержать 75 – 85 % органических и 15 – 25 % минеральных веществ. Существенным параметром является соотношение углерода и азота (C:N). При высоком значении C:N наблюдается дефицит азота и замедление метabolизма, при низком – токсичное накопление амиака. Оптимальный интервал – C : N = 20 ± 8. Для жизнедеятельности метанобактерий также необходимы микроэлементы (S, P, K, Na, Fe и др.) при отсутствии ингибирующих веществ.

По результатам лабораторного эксперимента установлено следующее распределение фаз развития микробной биомассы: лаг-фаза длилась 3–5 часов, экспоненциальная – до 4 суток, стационарная – около 10 суток, фаза отмирания начиналась после 13 суток загрузки субстрата. Максимальный выход биогаза (770 см³) зафиксирован в стационарной фазе. Совокупный объём биогаза за 20 суток составил 1012 см³, что подтверждает эффективность применения мелассы в качестве ко-субстрата для интенсификации сбраживания куриного помёта при термофильном режиме.

Динамика накопления биогаза в процессе анаэробного сбраживания представлена на рисунке 3.

На начальном этапе (0 – 2 сутки) объём газа был минимальным или отсутствовал, что соответствует фазе адаптации микроорганизмов. В это время бактерии растут и готовятся к делению. В этот период происходит активное накопление нуклеиновых кислот, белка и других компонентов.

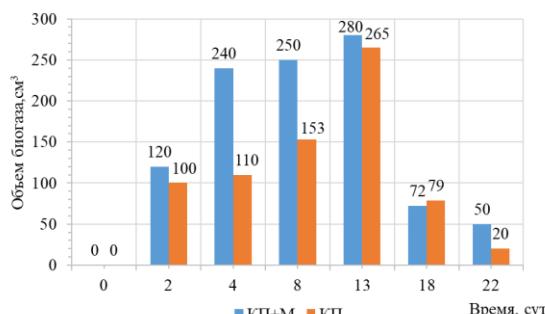


Рисунок 3 – Динамика образования биогаза: КП – куриный помёт; КП+М – куриный помёт + меласса

Figure 3 – Dynamics of biogas production: CM – chicken manure; CM+M – chicken manure + molasses

Как следует из рисунка 2, экспоненциальная фаза микробного роста, сопровождающаяся активным делением бактерий и наибольшей скоростью газообразования, охватывает интервал с 2-х по 8-е сутки. В этот период клетки наиболее чувствительны к усло-

виям среды, особенно к изменению концентрации легкоусвояемых питательных веществ. Добавление свекловичной мелассы к куриному помёту в массовом соотношении 1:1 обеспечивает прирост выхода биогаза на 40 % по сравнению с контролем. Это объясняется высоким содержанием доступных углеводов, стимулирующих рост и метаболическую активность анаэробной микрофлоры.

На 8-ые сутки наступает стационарная фаза, при которой скорость деления клеток уравновешивается с уровнем их отмирания, а объём продуцируемого биогаза достигает максимальных значений. После 13-х суток, наблюдается снижение газообразования, что указывает на наступление фазы деградации биомассы, вызванной истощением питательной среды и накоплением метаболитов, тормозящих активность микрофлоры.

На основании экспериментальных данных установлены оптимальные параметры процесса утилизации органических отходов:

- соотношение компонентов – навоз : меласса : вода – 1 : 1 : 3;
- температурный режим – 45 ± 5 °C и выше (термофильный диапазон);
- регулярное перемешивание бродильной массы для поддержания однородности среды.

Указанные условия обеспечивают устойчивое течение анаэробного процесса и максимизацию выхода биогаза при переработке куриного помёта.

В результате проведенных лабораторных экспериментов предложена принципиальная блок-схема производства биогаза и биоудобрения, образующихся в результате брожения реакционной массы из куриного помёта и мелассы (рис. 4).

Процесс совместной переработки отходов птицеводства и производства сахарной свеклы представлен следующим образом. С помощью насоса-дозатора (3) компоненты из бункеров 1 и 2 подаются в ванну (4), где происходит смешение реакционной массы с водой до нужной консистенции при соотношении навоз : меласса : вода = 1:1:3.

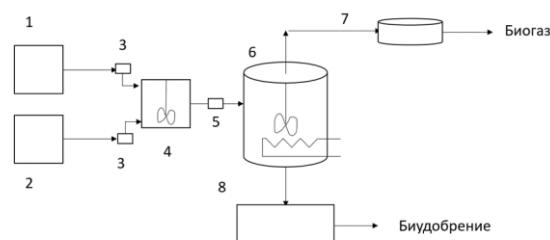


Рисунок 4 – Принципиальная схема совместной утилизации куриного помёта и мелассы: 1 – бункер для куриного помёта; 2 – бункер для мелассы; 3 – фекальный насос с дозатором; 4 – ванна для приготовления субстрата; 5 – фекальный насос с дозатором; 6 – биореактор; 7 – газгольдер; 8 – реактор для получения биоудобрения

Figure 4 – Schematic diagram of combined utilization of chicken manure and molasses: 1 - bunker for chicken manure; 2 - bunker for molasses; 3 - fecal pump with doser; 4 - bath for substrate preparation; 5 - fecal pump with doser; 6 - bioreactor; 7 - gas holder; 8 - tank for preparation of finished products

Затем подготовленная смесь с помощью насоса 5 поступает в биореактор (6), где происходит адаптация микроорганизмов в течение первых 2-3 суток при температуре 20 ± 2 °C. В последующем создаются условия, соответствующие термофильному режиму сбраживания (45 ± 5 °C) органических отходов в анаэ-

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ СБРАЖИВАНИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ ОСТАТКОВ АГРОПРОИЗВОДСТВА С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ВЫХОДА БИОГАЗА

робных условиях. Образующийся биогаз аккумулируется и хранится в газгольдере (7) для дальнейшего применения потребителями. Сброшенный осадок направляется на стадию обезвоживания и дезактивации (8), и, в последующем, фасуется к продаже в виде органического удобрения.

Таким образом, применение уже существующего комплекса БУГ-3 по переработке сельхозотходов (табл. 2) позволит получить 667,5 м³ биогаза и 597,13 кг органического удобрения при загрузке 280 кг куриного помёта, 280 кг мелассы и 1,6 м³ воды при продолжительности цикла ферментации 20 сут. При этом учитывалось, что теплотворная способность биогаза с содержанием метана 60 % составляет 21,48 МДж/м³, при расчётном коэффициенте полезного действия установки на уровне 40 % энергетическая мощность биогаза достигнет 2,4 кВт·ч/м³.

На основании предложенной принципиальной

схемы совместной утилизации куриного помета и мелассы произведен технико – экономический расчет при переработке 10 т отходов. Для расчетов выбраны свободные рыночные цены технологического оборудования, учтены затраты на транспортировку, заготовительные расходы и на монтаж. Для снижения себестоимости биогаза и биоудобрения предложено использование типового набора оборудования, включающего бункеры хранения отходов, фекальные насосы, биореактор с газгольдером и резервуар для конечной продукции. Совокупная стоимость основного оборудования составит примерно 2 142 000 рублей (табл. 2)

С учётом транспортно-заготовительных расходов (4 %) и затрат на монтаж (10 %), общие капитальные вложения достигнут 2 441 880 рублей.

Дополнительно учитывались затраты на дорогостоящий инструмент (10 %) и хозяйственный инвентарь (3 %), что сформировало полную сумму капитальных вложений в размере 2 459 444 рублей.

Таблица 2 – Затраты на основное оборудование / Table 2 – Costs of capital equipment

Наименование оборудования	Номер обозначения на схеме	Стоимость, руб	Характеристики
Горизонтальная ёмкость для хранения куриного помета	1	45 000	Объем – 2000 дм ³
Горизонтальная ёмкость для хранения мелассы	2	45 000	Объем – 2000 дм ³
Погружной фекальный насос	3	88 000	Номинальный расход – 15 м ³ /ч
Погружной фекальный насос	3	88 000	Номинальный расход – 15 м ³ /ч
Биореактор комплекс БУГ-3	4, 5, 6 ,7, 8	1 876 000	Питание 380 В, расход электроэнергии в сутки до 40 кВт, объем биореактора 12 м ³ , объем газгольдера 2 м ³ , объем загрузки субстрата 2400 дм ³ в сутки, выход биогаза 12 – 25 м ³ в сутки, выход удобрения 2400 дм ³ в сутки, занимаемая площадь до 50 м ²
Итого		2 142 000	

При нормативе 10 % годовая сумма амортизационных отчислений составит 245 945 руб при объёме производства 10 т.

Материальные расходы на производство 1 тонны биоудобрения и сопутствующего объёма биогаза (885 м³) с учетом затрат на транспортировку сырья, потребления технической воды и электроэнергии составят 170 399 руб.

При отпускной цене биогаза 9 руб/м³ и биоудобрения 200 руб/кг, суммарная выручка составит 207 965 рублей, а прибыль – 37 565 руб на каждую тонну продукции.

Сравнительный анализ с традиционным способом захоронения отходов показывает, что предлагаемая технология исключает убытки, свойственные складированию, и обеспечивает годовую прибыль, одновременно снижая нагрузку на окружающую среду. Помимо экономической выгоды, технология демонстрирует значительные экологические преимущества — отсутствие загрязнения почв, снижение выбросов парниковых газов и устранение санитарных рисков, учитывая, что навоз, особенно куриный, является резервуаром патогенных микроорганизмов и химических загрязнителей [12].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрена актуальная задача утилизации органических отходов агропромышленного комплекса с одновременным получением энергетического и арохимического продукта.

В качестве исследуемого объекта выбрана технология анаэробного сбраживания куриного помёта с добавлением свекловичной мелассы. Проведён лабора-

торный эксперимент по оценке влияния добавки мелассы на динамику образования биогаза. Установлено, что при соотношении компонентов навоз : меласса : вода = 1 : 1 : 3 и температуре более 45 °С достигается прирост газообразования на 40 % по сравнению с контролем, где использовался только куриный помёт.

Показана технологическая и санитарная целесообразность применения термофильного режима сбраживания сельхозотходов, применение которого позволяет не только ускорить процесс ферментации, но и повысить выход метанообогащённого биогаза, сократить объём оборудования и обеспечить микробиологическую безопасность органического остатка.

Предложенная принципиальная схема переработки включает все этапы — от дозированной подачи сырья и подготовки субстрата до получения биогаза и биоудобрений. Расчёты материального баланса показали, что при производстве 1 тонны биоудобрения формируется 885 м³ биогаза, а потери органической массы не превышают 130 кг, большая часть которых может быть возвращена в процесс.

Экономический анализ подтвердил эффективность решения: при затратах 170 399 рублей и выручке в 207 965 рублей, чистая прибыль составила 37 565 рублей с каждой тонны продукции.

С экологической точки зрения технология демонстрирует устойчивые преимущества перед традиционными методами утилизации: отсутствие загрязнения почв, снижение выбросов парниковых газов и минимизация вторичного загрязнения за счёт замкнутого производственного цикла.

Таким образом, предложенное решение представляет собой эффективный подход к переработке агропромышленных отходов, сочетающий повышение энергетической независимости хозяйств, снижение экологической нагрузки и получение конкурентоспособной продукции — биогаза и биоудобрений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проблемы и решения утилизации отходов в сельском хозяйстве URL: <https://dairynews.ru/news/problemy-i-resheniya-utilizatsii-otkhodov-v-selsko.html> (дата обращения: 18.07.2025).
2. Rguibi O. Food Loss and Waste in the Food Supply Chain: Current Situation and Potential Solutions // PQDT-Global. 2021.
3. Хисамова, А. Ш., Степанова, С. В., Алексеева, А. А. Использование шелухи пшеницы в качестве природного сорбционного материала для ликвидации разливов нефти // Ползуновский вестник. 2025. №2. С. 187–192. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.29.
4. Титова, И. В. Использование отходов сельского хозяйства для получения возобновляемой энергии // Стратегии и векторы развития АПК: Сборник статей по материалам национальной конференции, посвященной 100-летию Кубанского ГАУ, Краснодар, 15 ноября 2021 года. Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, 2021. С. 381-384.
5. Тенденции мирового производства сахарной свеклы и уровень потребления сахара / Кузнецова А.Р. [и др.]. // Аграрная наука. 2024. № 3. С. 157-162. doi: 10.32634/0869-8155-2024-380-3-157-162.
6. Векленко В. И. Тенденции развития и устойчивости производства сахарной свеклы в ведущих странах и регионах РФ // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2022. №. 2. С. 114-12.
7. Ндайкенгуркумие Д. Продуктивные качества переполов при введении органического концентратса на основе биоотходов птицеводства в рационы: дис. ... канд. биол. наук. Казань, 2022. 160 с.
8. Zareei S., Khodaei J. Modeling and optimization of biogas production from cow manure and maize straw using an adaptive neuro-fuzzy inference system / Renewable Energy. 2017. V. 114. pp. 423-427. doi.org/10.1016/j.renene.2017.07.050.
9. Руководство по биогазовым технологиям URL: https://www.rosbiogas.ru/literatura/rukovodstvo-po-biogazovim-tehnologiyam/vibor-razmerra-reaktora-dlya-biogazovoj-ustanovki.html?utm_source (дата обращения: 18.07.2025).
10. Анализ факторов, влияющих на производство биогаза при сбраживании осадка сточных вод / Седнин В. А. [и др.] //Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2009. №. 5. С. 49-58.
11. Хабибуллин Р. Э., Шарифуллин В. Н. Исследование процесса анаэробного сбраживания куриного помета и инженерная методика технологического расчета биореактора // Вестник Казанского технологического университета. 2010. №. 9. С. 639-646.
12. Резник Н. Л. Метаморфозы навоза // Химия и жизнь, 2022. №10. С. 40–45.

Информация об авторах

Р. Д. Сайфутдинова, магистр кафедры «Инженерная экология» Казанского национального исследовательского технологического университета

С. В. Степанова, д. т. н., доцент кафедры «Инженерная экология» Казанского национального исследовательского технологического университета

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 07 июня 2025; одобрена после рецензирования 24 ноября 2025; принятая к публикации 28 ноября 2025.

The article was received by the editorial board on 07 June 2025; approved after editing on 24 Nov 2025; accepted for publication on 28 Nov 2025.

А. А. Алексеева, к. т. н., доцент кафедры «Инженерная экология» Казанского национального исследовательского технологического университета

REFERENCES

1. Dairynews.ru. (2025). *Problems and solutions of waste disposal in agriculture*. Retrieved from <https://dairynews.ru/news/problemy-i-resheniya-utilizatsii-otkhodov-v-selsko.html> (In Russ.).
2. Rguibi, O. (2021). Food loss and waste in the food supply chain: *Current situation and potential solutions*. PQDT-Global.
3. Khisamova, A.Sh., Stepanova, S.V., & Alekseeva, A.A. (2025). Use of wheat husk as a natural sorption material for oil spill response. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 187–192. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.29.
4. Titova, I.V. (2021). Use of agricultural waste for obtaining renewable energy. In *Strategii i vektory razvitiya APK: In Strategies and Vectors of Agro-Industrial Complex Development: Proceedings of the National Conference dedicated to the 100th Anniversary of Kuban State Agrarian University, Krasnodar, November 15, 2021*, Krasnodar: Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin, pp. 381–384. (In Russ.).
5. Kuznetsova, A.R., Vasilieva, E.N., Semyonov, P.V., & Orlova, M.S. (2024). Global trends in sugar beet production and sugar consumption. *Agricultural Science*, (3), 157–162. (In Russ.). doi: 10.32634/0869-8155-2024-380-3-157-162
6. Veklenko, V.I. (2022). Trends in the development and sustainability of sugar beet production in leading countries and regions of the Russian Federation. *Bulletin of the Kursk State Agricultural Academy*, (2), 114–122. (In Russ.).
7. Ndayikengurukiye, D. (2022). Productive qualities of quails with inclusion of organic concentrate from poultry bio-waste in diets. Extended abstract of candidate's thesis. Kazan. (In Russ.).
8. Zareei S., Khodaei J. Modeling and optimization of biogas production from cow manure and maize straw using an adaptive neuro-fuzzy inference system / *Renewable Energy*. 2017. V. 114. pp. 423-427. doi.org/10.1016/j.renene.2017.07.050.
9. About Biogas. Biogas Technology Guide/ Retrieved from https://www.rosbiogas.ru/literatura/rukovodstvo-po-biogazovim-tehnologiyam/vibor-razmerra-reaktora-dlya-biogazovoj-ustanovki.html?utm_source (In Russ.).
10. Sednin, V.A., Zaitsev, V.I., Kulikova, S.M., & Malysheva, I.V. (2009). Analysis of factors influencing biogas production during sewage sludge digestion. *Energetika. Power Engineering. Proceedings of Higher Educational Institutions and Energy Associations of the CIS*, (5), 49–58. (In Russ.).
11. Khabibullin, R.E. & Sharifullin, V.N. (2010). Study of anaerobic digestion of poultry manure and engineering calculation method of the bioreactor. *Bulletin of Kazan Technological University*, (9), 639–646. (In Russ.).
12. Reznik, N.L. (2022). Manure metamorphoses. *Chemistry and Life*, (10), 40–45. (In Russ.).

Information about the authors

R. D. Sayfutdinova, postgraduate student of the Department of «Engineering Ecology» of the Kazan National Research Technological University

S. V. Stepanova, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of «Engineering Ecology» of the Kazan National Research Technological University

A. A. Alekseeva, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of «Engineering Ecology» of the Kazan National Research Technological University.