

Use of Apple Pomace for Intensification of Biogas Production in the Anaerobic Digestion of Cattle Manure

¹Polishchuk V., ¹Shvorov S., ²Kucheruk P., ¹Zablodskiy M., ¹Galchynska Ju.,
¹Zubok T., ¹Pasichnik N., ¹Valiev T.

¹ National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

² Institute of Engineering Thermophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Abstract. The goal of the work is to increase the yield of methane in biogas plants due to the joint methane fermentation of cattle manure with apple pomace. To achieve this goal, the following tasks were solved: the yield of biogas from cattle manure was determined with the addition of apple pomace to the substrate and fermentation in psychrophilic and mesophilic temperature conditions of the biogas plant. Based on the obtained experimental data of fermentation at temperatures of $22\pm 1^\circ\text{C}$ and $36\pm 1^\circ\text{C}$ of the fermenter, the biogas yield was assessed and the rational temperature regime for the operation of the biogas plant was determined. The studies were carried out on a laboratory biogas plant, consisting of a fermenter and a wet-type gasholder. A glass container with a total volume of 3 dm^3 was used as a fermenter. The novelty of the chosen topic lies in the fact that the maximum methane output rate was determined under periodic loading of the fermenter, which for the psychrophilic temperature regime is $0.0033\text{ m}^3/(\text{kg DOM}\cdot\text{day})$, and in the mesophilic temperature regime mode 4 times more - $0.012\text{ m}^3/(\text{kg DOM}\cdot\text{day})$. The significance of the results lies in the fact that based on the results of the dynamics of methane output during periodic loading of the fermenter, it is possible to predict a constant methane output in industrial biogas plants that operate in a quasi-continuous mode, which will be equal to the maximum methane output during periodic loading of the fermenter.

Keywords: biogas, methane, apple pomace, cattle manure, fermenter.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2024.4-64.05>

UDC: 662.763.3.2

Utilizarea rumegușului de mere pentru intensificarea producției de biogaz în digestia anaerobă a gunoii de grajd

¹Polisciuk V., ¹Șvorov S., ²Kuceruk P., ¹Zablodsky N., ¹Galicinskaya Y., ¹Zubok T., ¹Pasicinik N.,
¹Valiev T.

¹Universitatea Națională de Bioresurse și Management al Naturii din Ucraina, Kiev, Ucraina

²Institutul de Termofizică Tehnică al Academiei Naționale de Științe a Ucrainei, Kiev, Ucraina

Rezumat. Scopul lucrării este de a crește randamentul de metan în instalațiile de biogaz datorită fermentării metanice comune a gunoii de grajd cu borhot de mere. Pentru a atinge acest obiectiv, au fost rezolvate următoarele sarcini: s-a determinat randamentul de biogaz din gunoii de grajd al bovinelor cu adăugarea de marc de mere la substrat și fermentarea în condiții de temperatură psihofilă și mezofilă a instalației de biogaz. Pe baza datelor experimentale obținute privind fermentarea la temperaturi de $22\pm 1^\circ\text{C}$ și $36\pm 1^\circ\text{C}$ ale fermentatorului, a fost evaluată producția de biogaz și a fost determinat regimul rațional de temperatură pentru funcționarea instalației de biogaz. Studiile au fost efectuate pe o instalație de biogaz de laborator, compusă dintr-un fermentator și un gasholder de tip umed. Ca fermentator a fost utilizat un recipient din sticlă cu un volum total de 3 dm^3 . Noutatea subiectului ales constă în faptul că rata maximă de ieșire a metanului a fost determinată la încărcarea periodică a fermentatorului, care pentru regimul de temperatură psihofilă este de $0,0033\text{ m}^3/(\text{kg MOU}\cdot\text{zi})$, (MOU – materie organică uscată) iar în regimul de temperatură mezofilă de 4 ori mai mult - $0,012\text{ m}^3/(\text{kg MOU}\cdot\text{zi})$. Semnificația rezultatelor constă în faptul că, pe baza rezultatelor dinamicii producției de metan în timpul încărcării periodice a fermentatorului, este posibil să se prevadă o producție constantă de metan în instalațiile industriale de biogaz care funcționează într-un mod cvasi-continuu, care va fi egală cu producția maximă de metan în timpul încărcării periodice a fermentatorului.

Cuvinte-cheie: biogaz, metan, borhot de mere, gunoi de grajd, fermentator.

Использование яблочных выжимок для интенсификации производства биогаза при анаэробном сбраживании навоза крупного рогатого скота

¹Полищук В., ¹Шворов С., ²Кучерук П., ¹Заблудский Н., ¹Гальчинская Ю., ¹Зубок Т., ¹Пасичник Н., ¹Валиев Т.

¹Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, Киев, Украина

²Институт технической теплофизики Национальной академии наук Украины, Киев, Украина

Аннотация. При переработке яблок образуется большое количество побочных продуктов, к которым относятся выжимки, вытерки, очистки, богатые питательными и биологически активными веществами, но из-за высокой влажности они не устойчивы при хранении и быстро портятся, поэтому возникает необходимость их утилизации с помощью биогазовых установок. Целью работы является повышение выхода метана на биогазовых установках за счет совместного метанового сбраживания навоза крупного рогатого скота с выжимками яблок. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи: определялся выход биогаза из навоза крупного рогатого скота с добавлением к субстрату выжимок яблок и метановом сбраживании в психрофильном и мезофильном температурных режимах работы биогазовой установки. На основе полученных экспериментальных данных сбраживания при температуре $22 \pm 1^\circ\text{C}$ и $36 \pm 1^\circ\text{C}$ ферментера осуществлялось оценивание выхода биогаза и определялся рациональный температурный режим работы биогазовой установки. Исследования проводились на лабораторной биогазовой установке, состоящей из ферментера и газгольдера мокрого типа. В качестве ферментера использовано стеклянную емкость общим объемом 3 дм³. Выход биогаза фиксировался за поднятием цилиндра мокрого газгольдера с помощью закрепленной на нем шкалы, отградуированной в сантиметрах. Содержание метана в биогазе устанавливалось с помощью газоанализатора. Измерение объема вырабатываемого биогаза проводилось каждые сутки. Новизна выбранной темы заключается в том, что определена максимальная скорость выхода метана при периодическом режиме загрузки ферментера, который для психрофильного температурного режима составляет $0.0033 \text{ м}^3/(\text{кг СОВ} \cdot \text{сутки})$, а в мезофильном режиме – $0.012 \text{ м}^3/(\text{кг СОВ} \cdot \text{сутки})$. Значимость результатов заключается в том, что на основании результатов динамики выхода метана при периодическом режиме загрузки ферментера можно спрогнозировать постоянный выход метана в промышленных биогазовых установках, работающих в квазинепрерывном режиме, который будет равен максимальному выходу метана при периодической загрузке ферментера.

Ключевые слова: биогаз, метан, яблочные выжимки, навоз крупного рогатого скота, ферментер.

Введение

Постепенное сокращение природных ископаемых энергетических ресурсов в мире приводит к расширению использования альтернативных источников энергии. К таким источникам энергии относятся биогазовые установки. За счет использования отходов сельского хозяйства и пищевых производств в биогазовой установке одновременно можно решить проблемы дополнительного получения электрической и тепловой энергии с минимизацией негативного воздействия на окружающую среду. В частности, таким образом можно утилизировать такие вещества, как навоз, накапливающийся на животноводческих фермах. Кроме того, объемы отходов пищевых производств на планете также значительно возрастают, их необходимо также утилизировать и направить на энергетические потребности человечества. Поэтому производство энергоносителей из разных видов отходов становится одним из важнейших приоритетов при решении энергетических, а также экологических проблем и имеет глобальную перспективу для дальнейшего развития.

Как известно, навоз крупного рогатого

скота часто используется для получения биогаза, из которого вырабатывается электрическая и тепловая энергия. Однако, вследствие наличия в навозе большого количества сырой клетчатки, выход биогаза при его метановом сбраживании с помощью биогазовых установок относительно низкий. Поэтому актуальной задачей является повышение выхода биогаза из навоза крупного рогатого скота за счет использования различных стимулирующих метановое брожение добавок (косубстратов). Если же такой стимулирующая добавка является отходом производства, при этом решается задача ее утилизации, тем самым улучшается экологическая ситуация в регионе.

I. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

С целью повышения выхода биогаза и выработки энергии на данное время широко практикуется совместное метановое сбраживание навоза крупного рогатого скота с силосом кукурузы. Вместе с тем, данное сырье можно использовать в качестве корма для животных и продуктов питания для человека. Среди альтернативных источников

энергии все большее значение приобретает получение биогаза из навоза и отходов яблочных производств. В Украине каждый год образуется большое количество отходов плодоовощной и консервной промышленности, одним из направлений которой является переработка яблок. По данным Госкомстата Украины, производство яблок в Украине ежегодно составляет примерно 1179.6 тыс. тонн. Переработка яблок заключается в извлечении соков, пюре, компотов и другой продукции, а также в получении побочной продукции. К побочным продуктам относятся выжимки, вытерки, очистки, богатые питательными и биологически активными веществами, но из-за высокой влажности они не устойчивы при хранении и быстро портятся, поэтому возникает необходимость их утилизации с помощью биогазовых установок. Для решения данной задачи возникает необходимость в разработке рекомендаций с целью получения биогаза из смеси навоза крупного рогатого скота с отходами яблочных производств, которые необходимо утилизировать с минимальными затратами, улучшая при этом экологию и повышая выработку электроэнергии на биогазовых установках.

II. АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Пищевая промышленность создает большие объемы органических побочных продуктов, требующих надлежащей экологически чистой утилизации. При получении яблочного сока образуются яблочные выжимки, содержание которых составляет 28-36% [1], по другим данным - 25-30% исходного веса яблок [2; 3]. Яблочные выжимки относятся к сахаросодержащему сырью, которое может быть использовано для производства биоэтанола [4]. Вместе с тем, часто яблочные выжимки захоранивают в землю, что приводит к неконтролируемым выбросам парниковых газов [5]. В работе [6] указано, что яблочные выжимки можно перерабатывать в биогаз. Почти 80% органики яблочных выжимок можно превратить в заменитель природного газа. Яблочные выжимки вместе с травами в весовом соотношении 50:50 рекомендуется заготавливать путем их силосования для

дальнейшего использования в качестве субстрата для биогазовых установок [7].

В работе [8] отмечается, что отходы яблочных выжимок, богатые свободными сахарами и структурными углеводами, могут стать хорошим сырьем для производства биотоплива и химикатов с добавленной стоимостью. В этой работе яблочные выжимки использовали для производства пектина и биотоплива путем обработки разбавленной серной кислотой (1% масс./об.). Наивысший выход метана (120 мл/г летучих твердых веществ (VS)) был получен после 60-минутной обработки кислотой при 94°C. В работе [9] были оценены два разных типа яблочных выжимок: от производства сока и сидра. Из них первоначально был произведен биоэтанол и биобутанол и исследованы остатки брожения для производства биогаза. Также было исследовано совместное метановое брожение яблочных выжимок и свиного навоза. Удельный выход метана из остатков брожения при производстве биоэтанола и биобутанола составлял 463 и 290 мл/г VS соответственно. Выход метана при совместном метановом сбраживании яблочных выжимок и свиного навоза составлял 596 мл/г VS, с процентом яблочных выжимок 14.6% и концентрацией субстрата 9.38 г VS/л. В работе [10] отмечается, что при совместном метановом сбраживании 7.5% яблочных выжимок и 15% свиного навоза выход метана составляет 412.3 ± 62.6 мл/г VS-сутки, при том, что выход метана при метановом моносбраживании яблочных выжимок составляет 381.8 ± 134.1 мл/г VS-сутки, а при метановом моносбраживании свиного навоза – 421.7 ± 153.6 мл/г VS-сутки. В работе [11] проведена оценка анаэробного метанового сбраживания яблочных выжимок с точки зрения их предварительной обработки. Результаты показали, что яблочные выжимки, обработанные ультразвуком с частотой 53 кГц при температуре 60°C в течение 45 минут, имели наивысший выход метана 1519 мл/сутки VS после анаэробного сбраживания, что было в среднем на 40.9% выше, чем при метановом сбраживании необработанных яблочных выжимок. Результаты экспериментальных исследований метанового сбраживания смеси яблочных выжимок и кукурузного силоса описаны в работе [12]. Установлено, что наибольший выход биогаза (203 дм³/кг сухого вещества (СВ)) получено при содержании в

субстрате 75% кукурузного силоса и 25% яблочных выжимок. При этом содержание метана в биогазе составляло 50.2%, а выход метана – 101.9 дм³/кг СВ. При увеличении в субстрате количества яблочных выжимок выход биогаза снижается. Так, при содержании в субстрате 50% кукурузного силоса и 50% яблочных выжимок, выход биогаза составлял 195 дм³/кг СВ, содержание метана в биогазе – 53.8%, а выход метана – 104.9 дм³/кг СВ. То есть, выход метана несколько возрастает. При содержании в субстрате 25% кукурузного силоса и 75% яблочных выжимок выход биогаза составлял 184 дм³/кг СВ, содержание метана в биогазе – 26.4%, а выход метана – 48.6 дм³/кг СВ. В работе [13] приведены результаты исследования совместного метанового сбраживания кислых отходов переработки фруктов (FPW) и активного ила отходов (WAS). Эксперименты при периодической загрузке ферментера показали, что совместное метановое сбраживание FPW и WAS устраняет накопление кислоты и увеличивает кумулятивное производство биогаза. Когда соотношение летучих твердых веществ (VS) FPW к WAS составляло 2:1, кумулятивное производство биогаза было наивысшим (4695.47 мл), оно выросло на 5.2% и 10.5% по сравнению с соотношениями VS 3:1 и 1:1, соответственно. Эксперименты при квазинепрерывной загрузке ферментера показали, что метановое брожение было наиболее стабильным, когда соотношение VS было 2:1, без накопления кислоты или чрезмерного потребления общей щелочности. В работе [14] утверждается, что максимальный выход метана 381.8 мл/г VS в сутки был достигнут при добавлении до 15% яблочных выжимок к субстрату на основе свиного навоза. Более высокая концентрация яблочных выжимок может привести к более низкому выходу метана. Выход биогаза при метановом сбраживании яблочных выжимок составляет в пределах 620-980 см³/г СВ [15]. В работе [16] приведены результаты метанового моносбраживания яблочных выжимок, кукурузного силоса и совместного метанового сбраживания яблочных выжимок и кукурузного силоса в соотношении 50/50% и 75/25%. Установлено, что самый высокий общий выход биогаза (210 дм³/кг) был в образце, в котором соотношение яблочных выжимок и кукурузного силоса составляло 50/50%. Как указано в работе [17], средний

выход биогаза при метановом сбраживании биомассы яблок составляет 1.020 л/г сухого органического вещества (COB) при выходе метана 0.451 л/г COB, что превышает показатели выхода биогаза при метановом сбраживании тыквенной биомассы (выход биогаза – 1.095 л/г COB при выходе метана 0.422 л/г COB) и биомассы костного мозга (выход биогаза – 0.768 л/г COB при выходе метана 0.274 л/г COB). Результаты совместного метанового сбраживания яблочной мякоти с отходами бойни (свиной кишечник и содержимое бычьего желудка) приведены в работе [18]. Производство биогаза достигло удовлетворительных значений в течение всего теста (0.8 м³/кг COB), подтверждая, что процесс поддерживается в стабильных условиях pH (около 8.0), а летучие жирные кислоты всегда были ниже 3000 мг/л, когда количество пульпы было менее 100 г в мезофильных условиях. В работе [19] утверждается, что совместное метановое сбраживание яблочных выжимок с оливковым жмыхом и яблочных выжимок с томатной мякотью в массовом соотношении 1:1 дают выход биогаза 885 мл/л (62% метана) и 574 мл/л (6 метана) соответственно, что почти вдвое меньше выхода биогаза при совместном метановом сбраживании томатной мякоти с оливковым жмыхом - 1096 мл/л (до 70% метана). В работе [20] приведены результаты исследований различных фруктовых и овощных отходов (яблок, бананов, моркови, масляных орехов, картофеля), в сочетании со сточными водами с фруктово-овощного рынка, используя активированный ил в качестве инокулят. Температура метанового сбраживания составляла 40°C. Наибольший выход биогаза был получен при метановом сбраживании яблок (595 мл/сутки) и бананов (585 мл/сутки). Результаты исследований совместного метанового сбраживания конского навоза, яблочных выжимок и жома сахарной свеклы представлены в работе [21]. Установлено, что оптимальное соотношение этих ко-субстратов по массе составило 2:1:3. При этом выход биогаза составлял 189.7 мл/г СВ. Однако предварительная обработка субстрата значительно повышает выход биогаза. Наивысшая эффективность производства биогаза была обнаружена как 329.4 мл/г СВ из субстрата, предварительно термически обработанного при температуре 150°C в течение 60 минут. В результате

щелочной предварительной обработки субстрата (NaOH до 20% твердого вещества) был установлен выход биогаза 300.9 мл/г СВ. Как результат предварительной кислотной обработки (HNO₃ до 20% твердого вещества), выход биогаза составлял как 310.4 мл/г СВ.

В работе [22] указано, что выход биогаза из яблочек составляет 320-490 м³/т VS. В работе [23] утверждается, что средний выход биогаза из яблочных отходов составляет 35 мл/мл отходов, а содержание метана в биогазе составляет примерно 60%. В работе [24] установлено, что оптимальное соотношение куриного помета и яблочной пульпы в субстрате составляет 2:1, а свиного навоза и яблочной пульпы – 4:1. При квазинепрерывном режиме загрузки ферментера угнетение образования метана происходило, когда уровень органической нагрузки (OLR) метанового монображивания помёта выше 2.4 г VS/сутки. Однако совместное метановое браживание куриного помёта с мякотью яблочек в указанном соотношении позволило работать при OLR 4.8 г VS/л сутки и получить наивысший удельный выход метана (0.34 л/г VS).

Итак, в рассматриваемых литературных источниках описано анаэробное метановое монображивание яблочных выжимок и яблочных отходов и их метановое браживание совместно с другими косубстратами. Установлено, что яблочные выжимки хорошо браживаются в биогазовых установках как самостоятельно,

так и совместно с другими косубстратами, в частности, с активным илом, свиным навозом, куриным пометом и другими. Вместе с тем, в литературе отсутствует упоминание о эффективности метанового браживания яблочных выжимок совместно с коровьим навозом.

Поэтому целью работы является экспериментальное исследование возможности повышения выхода биогаза из навоза крупного рогатого скота при его совместном метановом браживании с выжимками яблочек.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: определить выход биогаза и метана из навоза крупного рогатого скота с добавлением выжимок яблочек в условиях метанового браживания смесей в психрофильном (22±1°C) и мезофильном (36±1°C) температурных режимах при периодической загрузке ферментера.

III. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Процесс метанового брожения навоза крупного рогатого скота с добавлением яблочных выжимок осуществлялся на опытной биогазовой установке при периодическом режиме загрузки ферментера.

В эксперименте использовались бесподстилочный навоз крупного рогатого скота, яблочные выжимки и инокулят со стартовой популяцией метаногенов. Состав субстратов представлен в табл. 1.

Таблица 1

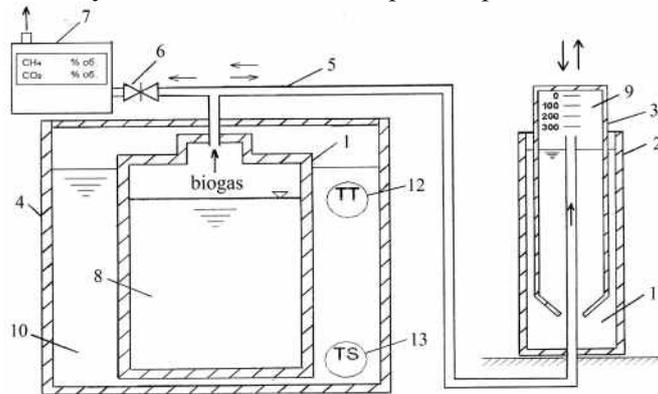
Состав субстратов при проведении экспериментальных исследований.¹

Субстрат	Объем, мл	Масса, г	СВ, г	СОВ, г
<i>Психрофильный температурный режим</i>				
Инокулят	900.0	936.0	31.7	26.930
Яблочные выжимки	80.8	64.65	19.4	18.350
Коровий навоз	769.2	800.00	46.9	41.346
ВСЕГО	1 750.0	1 800.7	98.0	86.6
Процент ЯВ в субстрате		3.6%	19.8%	21.2%
Процент ЯВ в смеси с коровьим навозом		7.5%	29.2%	30.7%
<i>Мезофильный температурный режим</i>				
Инокулят	900.0	936.0	31.7	26.930
Яблочные выжимки	80.8	64.65	19.4	18.350
Коровий навоз	769.2	800.00	46.9	41.346
ВСЕГО	1 750.0	1 800.7	98.0	86.6
Процент ЯВ в субстрате		3.6%	19.8%	21.2%
Процент ЯВ в смеси с коровьим навозом		7.5%	29.2%	30.7%

¹ Appendix 1

Опытная биогазовая установка (рис.1), включает в себя ферментер и газгольдер для накопления биогаза. В качестве ферментера использовано стеклянную емкость общим объемом 3 л, которая устанавливается в большую емкость, наполненную теплоносителем, в качестве которого используется вода. Для герметизации газового пространства в верхней части стеклянной емкости использовано капроновую крышку с штуцером для отвода биогаза. Штуцер соединен с помощью гибкой трубки из прозрачного ПВХ с алюминиевой трубкой, герметично встроенной в днище неподвижной части газгольдера – пластиковой бутылки диаметром 100 мм с заглушкой. Алюминиевая трубка выходит за край патрубка на 5 мм для предотвращения попадания воды в систему газоотведения.

Неподвижную часть газгольдера установлено стационарно на горизонтальной поверхности и заполнено 5% водным раствором NaCl, который позволяет избегать потерь составляющих биогаза путем абсорбции. Отбор биогаза на анализ и его отвод выполняется с помощью дополнительной отводной гибкой трубки, на конце которой вмонтирован газовый кран. Нагрев и контроль температуры воды в емкости, где находится ферментер, осуществляется с помощью ТЭНа, подключенного к терморегулятору. Для интенсивного отвода и равномерного распределения тепла от обогревателя использовано насос погружного типа, работающий в непрерывном режиме. Измерение температуры воды производится с помощью лабораторного ртутного термометра.



1 – емкость ферментера; 2 – неподвижная часть газгольдера; 3 – подвижная часть газгольдера; 4 – емкость с теплоносителем; 5 – трубка ПВХ; 6 – газовый кран; 7 – газоанализатор; 8 – рабочая среда ферментера; 9 – внутреннее пространство газгольдера с биогазом; 10 – теплоноситель (вода); 11 – 5% водный раствор NaCl; 12 – ртутный термометр; 13 – терморегулятор ($\Delta T = \pm 1^\circ C$).

Рис. 1. Схема опытной установки для периодического метанового брожения.²

При выделении биогаза за счет повышения давления газа в герметичной системе ферментер-газгольдер, подвижная часть газгольдера поднимается на высоту, соответствующую определенному значению объема биогаза на градуированной шкале. Фиксация объема выделенного биогаза осуществлялась дискретно, путем визуального считывания с градуированной шкалы газгольдера. Измеренный объем биогаза приводился к нормальным условиям (273.15 К; 101.3 кПа). Содержание CH_4 в биогазе определялось с помощью портативного цифрового газоанализатора типа Landtec GEM-500.

Совместное метановое сбраживание навоза крупного рогатого скота и яблочных

выжимок проводилось при периодическом режиме загрузки ферментера в психрофильном (температура в ферментере $22 \pm 1^\circ C$) и мезофильном (температура в ферментере $36 \pm 1^\circ C$) режимах. Для сравнения результатов по скорости выхода биогаза был также выполнен опыт с моносбраживанием коровьего навоза в периодическом психрофильном режиме.

Степень распада органического вещества определялся как соотношение массы выделенного биогаза к массе внесенного СОВ субстрата.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Средняя удельная скорость выхода метана при моносбраживании коровьего навоза в

психрофильном режиме составила 0,022 л/(л·сутки).

При совместном метановом сбраживании навоза крупного рогатого скота и яблочных выжимок в психрофильном режиме при температуре $22\pm 1^\circ\text{C}$ в ферментер загружалось 900 мл инокулята, 900 мл свежего навоза крупного рогатого скота и 63.93 г выжимок яблок.

Доля СОВ яблочных выжимок в смеси с навозом КРС составила 28.1%. Начальная концентрация СОВ смеси навоза КРС и яблочных выжимок в реакторе составила 34 г/л.

На рисунке 2 показана динамика изменения скорости выхода биогаза и метана,

а на рис. 3 – их кумулятивный выход, при совместном сбраживании навоза крупного рогатого скота с яблочными выжимками в психрофильном режиме при температуре $22\pm 1^\circ\text{C}$.

Общая степень распада смеси субстратов в ходе данного эксперимента составила 14% за 26 суток, при этом заметное замедление интенсивности распада органики наблюдалось на 15-й день эксперимента (рис. 4).



Рис. 2. Динамика изменения скорости выхода биогаза и метана при метановом сбраживании смеси навоза крупного рогатого скота с яблочными выжимками (28.1% по СОВ) в психрофильном режиме при температуре $22\pm 1^\circ\text{C}$.³

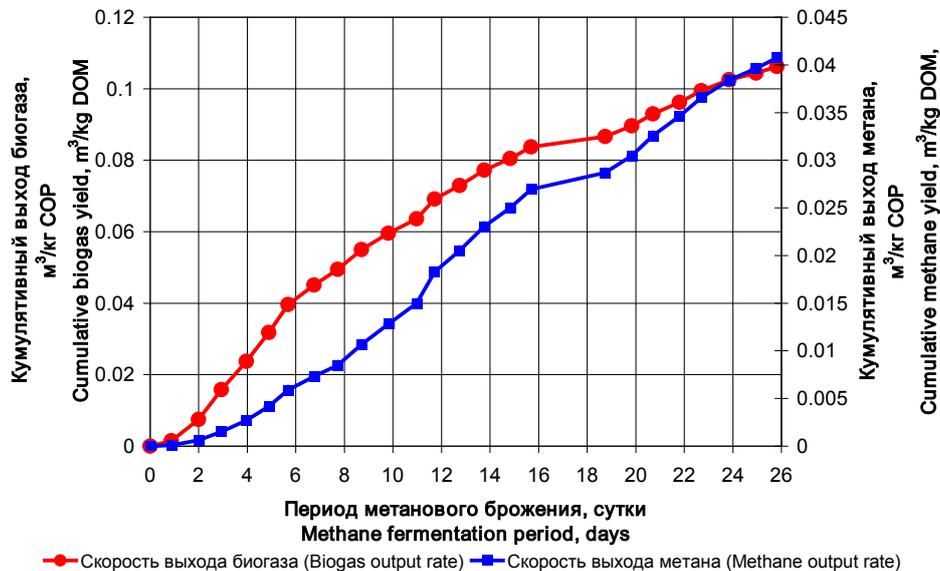


Рис. 3. Кумулятивный выход биогаза и метана при метановом сбраживании смеси навоза крупного рогатого скота с яблочными выжимками (28.1% по СОВ) в психрофильном режиме при температуре $22\pm 1^\circ\text{C}$.⁴



Рис. 4. Динамика распада органического вещества при сбраживании смеси навоза крупного рогатого скота с яблочными выжимками (28.1% по СОВ) в психрофильном режиме при температуре $22\pm 1^\circ\text{C}$.⁵

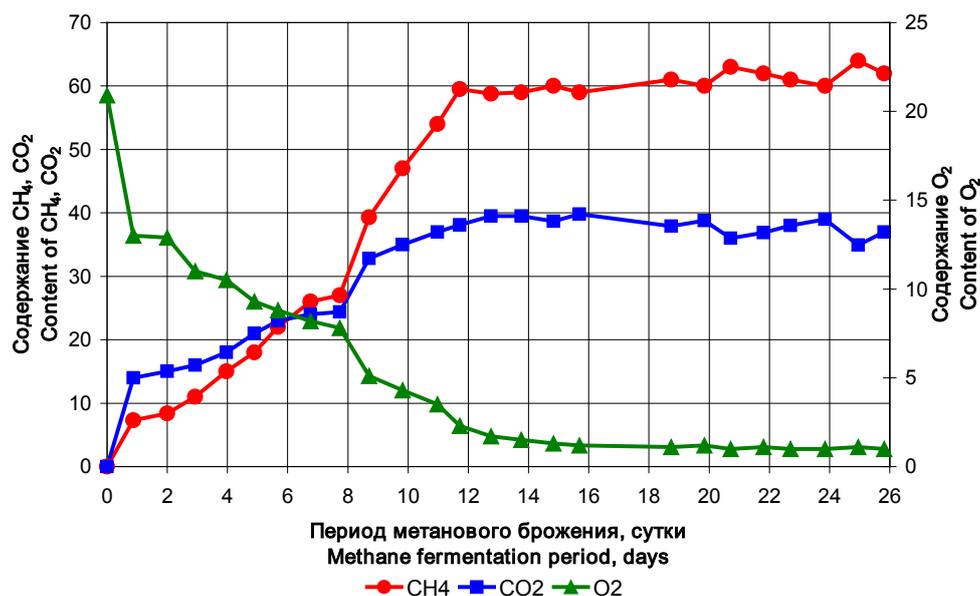


Рис. 5. Изменение состава биогаза во времени при сбраживании смеси навоза крупного рогатого скота с яблочными выжимками (28.1% по СОВ) в психрофильном режиме при температуре $22\pm 1^\circ\text{C}$.⁶

Как видно из рис. 4, в смеси навоза крупного рогатого скота с яблочными выжимками довольно медленно распадается органика. Объясняется это низкой удельной скоростью роста метаногенных бактерий при данной температуре. При этом, более высокая скорость роста кислотогенных бактерий,

нежели у метаногенов, может приводить к избыточному накоплению метаболитов, таких как высшие кислоты, спирты, что дополнительно снижает метаболическую активность метаногенных групп бактерий.

Выход метана снизился на конец эксперимента по сравнению с пиковым значением на 94.9%, что свидетельствовало

о завершении эффективного процесса распада органики. Средний выход биогаза в ходе данного эксперимента составил 0.0044 м³/кг СОВ·сутки. Концентрация метана в

выделяемом биогазе в установившемся режиме (на 12 сутки метанового брожения) колебалась в пределах 62.0-67.0 % (рис. 4).

Таблица 2

Основные показатели серии экспериментальных исследований эффективности сбраживания смеси навоза крупного рогатого скота с яблочными выжимками в психрофильном режиме при температуре 22±1°С.⁷

Показатели Indicators	Навоз КРС + выжимки яблоч (28.1% СОВ) Cattle manure + apple pomace (28.1% VS)
Степень распада органического вещества, % Organic matter decay rate, % через 5 суток in 5 days через 10 суток in 10 days через 15 суток in 15 days через 20 суток in 20 days	1.3 4.1 7.9 10.8
Максимальная скорость выхода биогаза, м ³ /(кг СОВ·сутки) / день эксперимента Maximum biogas output rate, m ³ /(kg DOM·day)/day of experiment	0.0083 / 3
Максимальная скорость выхода метана, м ³ /(кг СОВ·сутки) / день эксперимента Maximum methane output rate, m ³ /(kg DOM·day)/day of experiment	0.0033 / 12
Прогнозируемая средняя скорость выхода биогаза за сутки, м ³ /(кг СОВ ·сутки) Predicted average biogas output rate per day, m ³ /(kg DOM·day)	0.0044
Среднее содержание метана, % Average methane content, %	44.3
Кумулятивный выход биогаза / метана, м ³ /кг СОВ / день эксперимента Cumulative biogas yield / methane yield, m ³ /kg DOM / day of experiment	0.106 / 0.041 / 26

Как видно из табл. 2, в случае метанового сбраживания яблочных отходов заметно отличаются интенсивности выхода биогаза и метана, что указывает на доминирующую роль стадии кислотогенеза в начальный период эксперимента.

Необходимо отметить, что добавление яблочных выжимок заметно повысило эффективность метанового сбраживания навоза крупного рогатого скота.

При этом средняя скорость выхода биогаза по сравнению с таковой при моносбраживании навоза крупного рогатого скота в психрофильном режиме (0.00042 м³/кг СОВ·сутки)) выросла в 10.5 раза. Кумулятивный выход биогаза на 26 день

исследования составлял 0.106 м³/кг СОВ, кумулятивный выход метана – 0.041 м³/кг СОВ.

Как видно из рис. 2, максимальная скорость выхода метана при периодическом режиме загрузки ферментера в психрофильном режиме составляет 0.0033 м³/кг СОВ·сутки. Такой выход метана фиксируется на 12 сутки метанового сбраживания субстрата. В соответствии с нашими предыдущими исследованиями, максимальный выход биогаза (или метана) при периодическом режиме загрузки метантенка соответствует постоянному выходу биогаза (или метана) при квазинепрерывном режиме загрузки

ферментера. Поэтому, на основании результатов экспериментальных исследований при периодическом режиме загрузки ферментера можем спрогнозировать постоянный выход метана при квазинепрерывном режиме загрузки ферментера, при котором работают все промышленные биогазовые установки. Для психрофильного температурного режима постоянный выход метана в промышленных биогазовых установках будет составлять 0.0033 м^3 метана из одного килограмма СОВ за одни сутки работы установки.

В следующем эксперименте к 900 мл инокулята было добавлено 800 мл свежего навоза крупного рогатого скота и 64.65 г яблочных выжимок. Доля СОВ выжимок в смеси с навозом КРС составила 30.7%. Начальная концентрация СОВ смеси навоза КРС и яблочных выжимок в реакторе составила 33.2 г/л.

Динамика изменения скорости выхода биогаза и метана показана на рисунке 6, при совместном сбраживании навоза крупного рогатого скота с яблочными выжимками в психрофильном режиме при температуре $22 \pm 1^\circ\text{C}$, а их кумулятивный выход на рис. 7. Динамика распада органического вещества показана на рис. 8, а изменение состав

биогаза в процессе метанового сбраживания – на рис. 9.

Как видно из рисунка 8, характер выхода биогаза и метана во времени не изменился по сравнению с таковым при сбраживании смеси навоза крупного рогатого скота с яблочными выжимками при психрофильном режиме.

Пик выхода биогаза ($0.034 \text{ м}^3/(\text{кг СОВ}\cdot\text{сутки})$) пришелся на 2-й день эксперимента, при этом концентрация метана в нем составила 31.0%.

Пик выхода метана пришелся на 5-й день эксперимента и составил $0.012 \text{ м}^3/(\text{кг СОВ}\cdot\text{сутки})$ при его концентрации 76.5%.

На 20-й день эксперимента степень распада органического вещества по выходу метана составила 39.7%. Заметное замедление интенсивности распада наблюдалось в данном эксперименте на 13-й день (рис. 6).

Выход метана упал на конец эксперимента по сравнению с пиком до 74.2%. Средняя скорость выхода метана в течение эксперимента составила $0.076 \text{ м}^3/(\text{кг СОВ}\cdot\text{сутки})$. Концентрация метана в установившемся режиме колебалась в пределах 67.6-76.5%, и несколько снизилась к концу эксперимента (рис. 7).

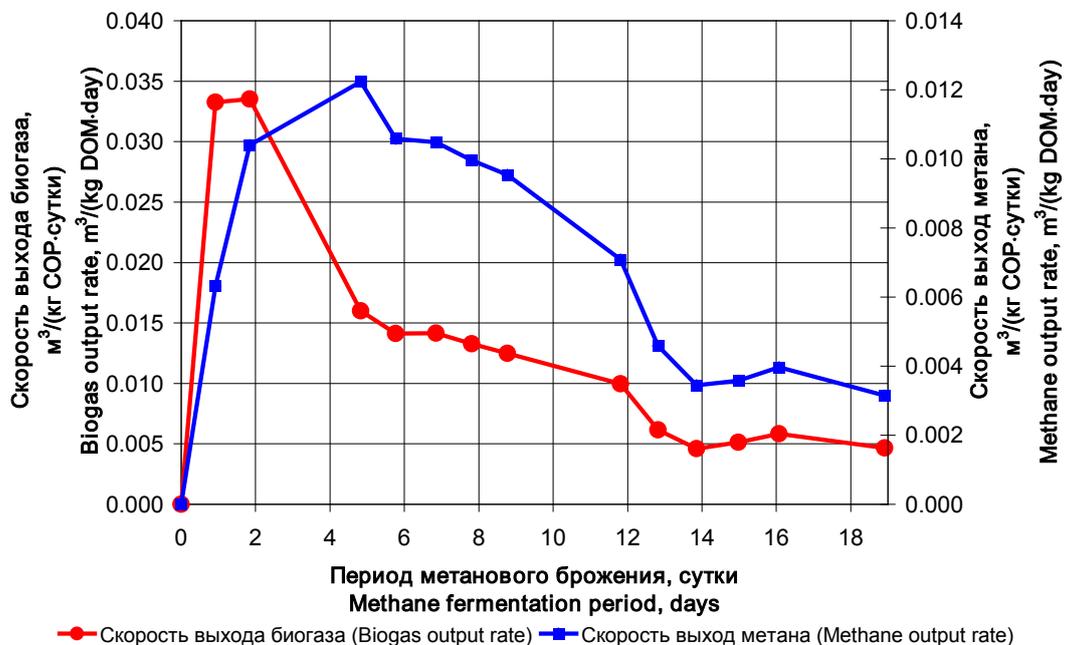


Рис. 6. Динамика изменения скорости выхода биогаза при метановом сбраживании смеси навоза крупного рогатого скота с яблочными выжимками (30.7% по СОВ) в мезофильном режиме при температуре $36 \pm 1^\circ\text{C}$.⁸

⁸ Appendix 1

Как видно из таблицы 3, степень распада органики заметно выросла по сравнению с психрофильным режимом. При этом также выросла средняя концентрация метана в биогазе.

При добавлении яблочных выжимок к коровьему навозу средний выход биогаза в мезофильном режиме при периодической

загрузке ферментера составляет $0.013 \text{ м}^3/(\text{кг COB} \cdot \text{сутки})$, что в 1.8 раза больше, чем средний выход биогаза при метановом сбраживании коровьего навоза в мезофильном режиме. Кумулятивный выход биогаза на 19 день исследования составлял $0,173 \text{ м}^3/\text{кг COB}$, кумулятивный выход метана – $0,095 \text{ м}^3/\text{кг COB}$.

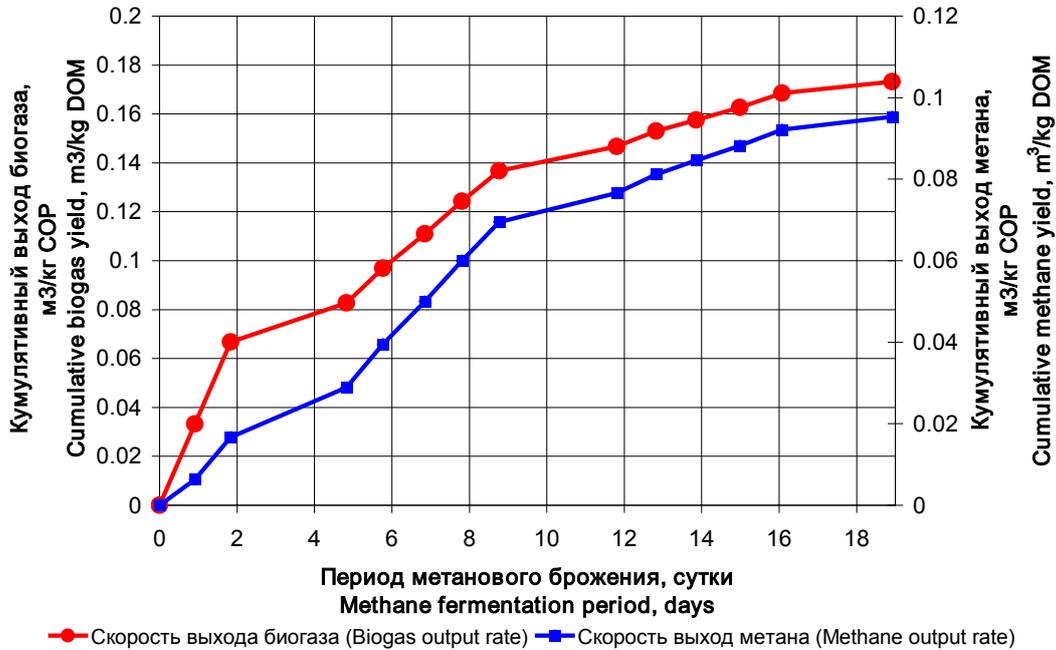
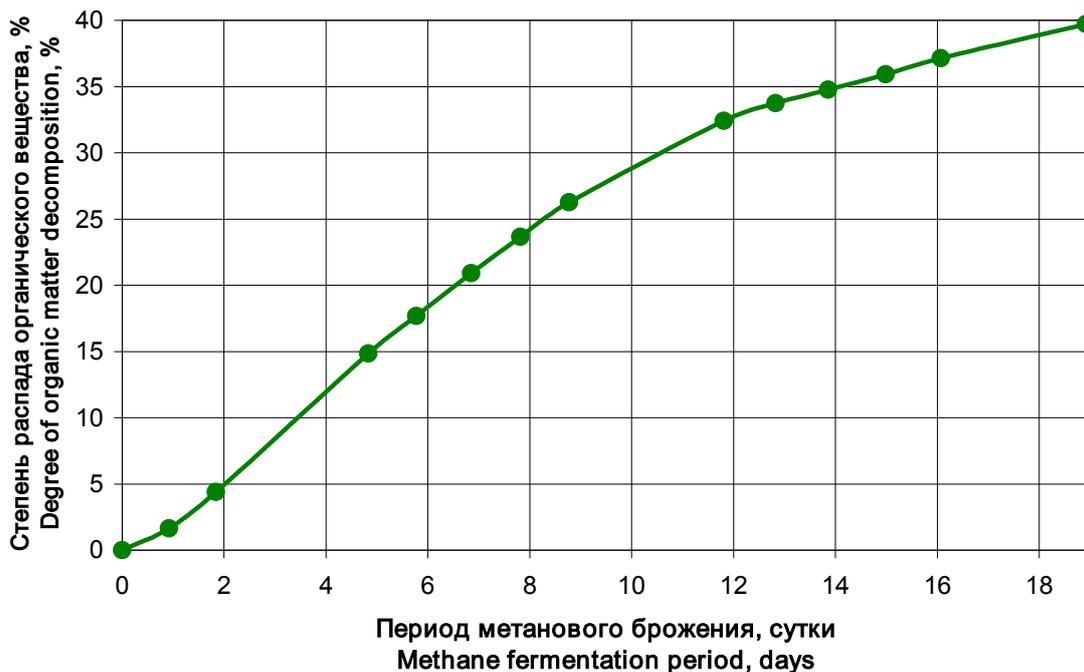


Рис. 7. Кумулятивный выход биогаза и метана при метановом сбраживании смеси навоза крупного рогатого скота с яблочными выжимками (30.7% по COB) в мезофильном режиме при температуре $36 \pm 1^\circ\text{C}$.⁹



^{9, 10} Appendix 1

Рис. 8. Динамика распада органического вещества при сбраживании смеси навоза крупного рогатого скота с яблочными выжимками (30.7% по СОВ) в мезофильном режиме при температуре $36\pm 1^\circ\text{C}$.¹⁰

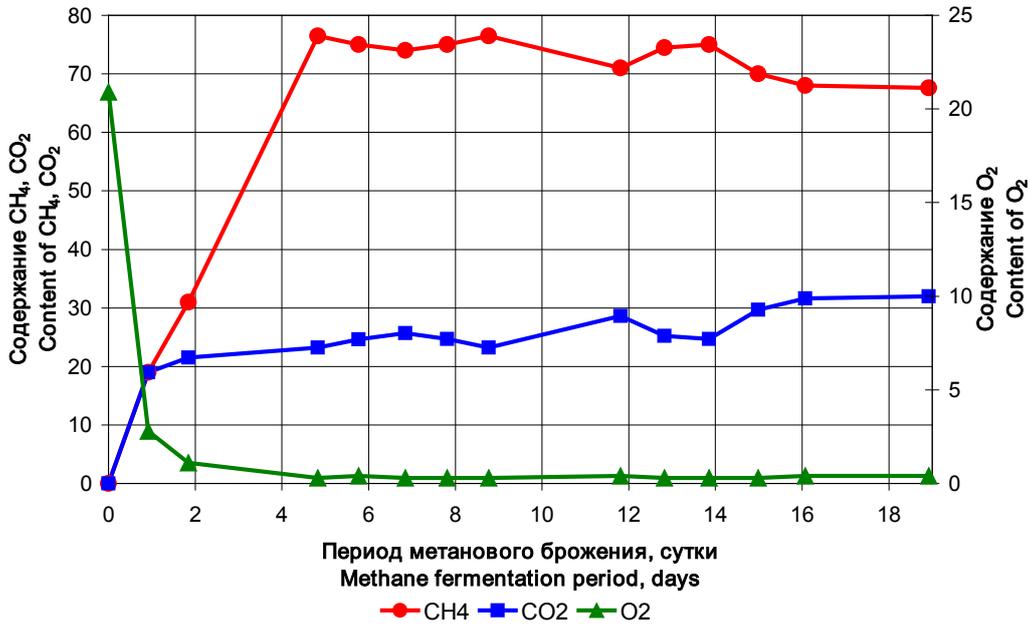


Рис. 9. Изменение состава биогаза во времени при сбраживании смеси навоза крупного рогатого скота с яблочными выжимками (30.7% по СОВ) в мезофильном режиме при температуре $36\pm 1^\circ\text{C}$.¹¹

Как видно из рис. 6, максимальная скорость выхода метана при периодическом режиме загрузки ферментера в мезофильном режиме составляет $0.012 \text{ м}^3/(\text{кг СОВ}\cdot\text{сутки})$, что более чем в 1.6 раза превышает максимальную скорость выхода метана при метановом моносбраживании навоза крупного рогатого скота ($0.0075 \text{ м}^3/(\text{кг СОВ}\cdot\text{сутки})$). В соответствии с нашими предыдущими исследованиями, максимальный выход биогаза (или метана) в биогазовой установке с периодическим режимом загрузки ферментера соответствует постоянному выходу биогаза (или метана) в биогазовой установке с квазинепрерывным режимом загрузки ферментера. Поэтому, для мезофильного температурного режима, постоянный выход метана в промышленных биогазовых установках будет составлять 0.012 м^3 метана из одного кг субстрата за одни сутки работы биогазовой установки.

Сравнивая полученные результаты с научными исследованиями на аналогичную тематику, можно отметить следующее. В работе [25] проведено исследование метанового моносбраживания коровьего навоза в мезофильном режиме (37°C). Максимальный кумулятивный выход

биогаза на 40 сутки метанового сбраживания при органической нагрузке ферментера 26 г VS/л составлял 193 мл/г VS . При этом, на 19 сутки метанового сбраживания выход биогаза составлял 50 мл/г VS , что почти в 3.5 раза ниже по сравнению с кумулятивным выходом биогаза, полученным нами при аналогично температурном режиме ферментера на 19 сутки совместного метанового сбраживания смеси коровьего навоза и яблочных выжимок. Самый высокий кумулятивный выход метана наблюдался при органической нагрузке ферментера 30 г VS/л и на 40 сутки метанового сбраживания составлял 63.42 мл/г VS . При этом на 19 сутки метанового сбраживания выход метана составлял 10 мл/г VS , что в 9.5 раза ниже по сравнению с кумулятивным выходом биогаза, полученным нами при аналогично температурном режиме ферментера на 19 сутки совместного метанового сбраживания смеси коровьего навоза и яблочных выжимок (95 мл/г VS). В работе [26] согласно графического изображения кумулятивный выход биогаза при метановом сбраживании коровьего навоза при температуре 36°C на 18 сутки составляет приблизительно 120 мл/г СОВ ,

¹¹ Appendix 1

что в 1,4 раза ниже, чем выход биогаза, полученный нами при совместном метановом сбраживании смеси коровьего навоза и яблочных выжимок (0.168 м³/кг COB). В работе [27] максимальный выход биогаза при температуре 40°C наблюдался на 3 сутки метанового сбраживания и составлял 0.95 л/(час·кг COB), за сутки

составляет 22.8 л/кг COB, или 0.0228 м³/кг COB, тогда как за нашими результатами максимальный выход биогаза при совместном метановом сбраживании смеси коровьего навоза и яблочных выжимок фиксируется на вторые сутки метанового сбраживания и составляет 0.036 м³/кг COB.

Таблица 3

Основные показатели серии экспериментальных исследований эффективности сбраживания смесей навоза крупного рогатого скота с яблочными выжимками в мезофильном режиме при температуре 36±1°C.¹²

Показатели Indicators	Навоз КРС + выжимки яблок (30.7% COB) Cattle manure + apple pomace (30.7% DOM)
Степень распада органического вещества, % Organic matter decay rate, % через 5 суток in 5 days	14.8
через 10 суток in 10 days	28.3
через 15 суток in 15 days	35.9
через 20 суток in 20 days	1.659 / 2
Максимальная скорость выхода биогаза, м ³ /(кг COB·сутки) / день эксперимента Maximum biogas output rate, m ³ /(kg DOM·day)/day of experiment	0.034 / 2
Максимальная скорость выхода метана, м ³ /(кг COB·сутки) / день эксперимента Maximum methane output rate, m ³ /(kg DOM·day)/day of experiment	0.012 / 5
Прогнозируемая средняя скорость выхода биогаза за сутки, м ³ /(кг COB ·сутки) Predicted average biogas output rate per day, m ³ /(kg DOM·day)	0.013
Среднее содержание метана, % Average methane content, %	57.3
Степень распада органического вещества, % Organic matter decay rate, %	65.6
Кумулятивный выход биогаза / метана, м ³ /кг COB / день эксперимента Cumulative biogas yield / methane yield, m ³ /kg DOM / day of experiment	0.173 / 0.095 / 19

Что касается исследований совместного метанового сбраживания навоза с яблочными выжимками, в работе [28] описаны результаты экспериментального исследования метанового сбраживания яблочных выжимок в мезофильном (37°C) режиме в лабораторном ферментере емкостью 600 мл и рабочей емкостью 400-500 мл. Установлено, что максимальное суточное

производство биогаза в мезофильном режиме наблюдалось на 22 сутки метанового сбраживания (20.16 мл/г VS), тогда как наши исследования максимум выхода биогаза на вторые сутки метанового сбраживания. При этом максимальный выход биогаза составлял 33,5 мл/г COB, что в почти в 1,7 больше чем описано в работе [28]. В работе [29] проводилось исследование совместного

метанового сбраживания яблочных выжимок и сточных вод в психрофильном режиме (22°C). Как видно из графика, кумулятивный выход метана на 26 сутки метанового брожения находится на уровне 40-50 л/г СОВ, что соотносится с нашими исследованиями.

V. ВЫВОДЫ

1. В результате проведенных исследований установлено, что при метановом сбраживании навоза крупного рогатого скота с выжимками яблок (30.7% по СОВ) в мезофильном режиме максимальный выход биогаза наблюдался на вторые сутки метанового брожения и составил 0.034 м³/(кг СОВ·сутки), при этом максимальный выход метана составил 0.012 м³/(кг СОВ·сутки) на пятые сутки метанового брожения. Для психрофильного режима максимальный выход биогаза составляет 0.0083 м³/(кг СОВ·сутки), метана - 0.0033 м³/(кг СОВ·сутки)

2. Средняя скорость выхода биогаза при метановом сбраживании смеси навоза с выжимками яблок (30.7% по СОВ) при температуре 36±1°C выросла в 1.8 по сравнению с моносбраживанием навоза крупного рогатого скота в мезофильном режиме, что не противоречит данным известных литературных источников. При этом степень распада органического вещества через 15 суток составляла 35.9%.

3. На основе скорости газообразования и кумулятивного производства газа исследование показало, что наиболее рациональным режимом ферментации яблочных выжимок и коровьего навоза является мезофильный.

APPENDIX 1

²**Fig. 1.** Scheme of experimental setup for periodic anaerobic digestion: 1 - fermenter vessel; 2 – non-movable part of the gas holder; 3 - movable part of the gas holder; 4 - container with coolant; 5 - PVC tube; 6 – ball gas valve; 7 - gas analyzer; 8 – working space of the fermenter; 9 – the inner gas space of the gasholder; 10 - coolant (water); 11 - 5% aqueous NaCl solution; 12 - mercury thermometer; 13 - thermostat ($\Delta T = \pm 1^\circ \text{C}$).

³**Fig. 2.** Dynamics of change in the rate of biogas yield during methane fermentation of a mixture of cattle manure with apple pomace (28.1% by DOM) in a psychrophilic temperature regime at 22±1°C.

⁴**Fig. 3.** Cumulative yield of biogas and methane during methane fermentation of a mixture of cattle manure with apple pomace (28.1% by DOM) in a psychrophilic mode at a temperature of 22±1°C.

⁵**Fig. 4.** Organic matter decay rate during anaerobic digestion of a mixture of cattle manure and apple

pomace (28.1% by DOM) in a psychrophilic temperature regime at 22±1°C.

⁶**Fig. 5.** Composition of biogas over time during the anaerobic digestion of a mixture of cattle manure and apple pomace (28.1% by DOM) in psychrophilic temperature regime at 22±1°C.

⁸**Fig. 6.** Dynamics of change in the rate of biogas yield during methane fermentation of a mixture of cattle manure with apple pomace (30.7% by DOM) in a mesophilic temperature regime at 36±1°C.

⁹**Fig. 7.** Cumulative yield of biogas and methane during methane fermentation of a mixture of cattle manure with apple pomace (30.7% by DOM) in a mesophilic mode at a temperature of 36±1°C.

¹⁰**Fig. 8.** Organic matter decay rate during anaerobic digestion of a mixture of cattle manure and apple pomace (30.7% by DOM) in mesophilic temperature regime at 36±1°C.

¹¹**Fig. 9.** Composition of biogas over time during the anaerobic digestion of a mixture of cattle manure and apple pomace (30.7% by DOM) in mesophilic temperature regime at 36±1°C.

¹**Table 1.** Composition of substrates during experimental studies.

⁷**Table 2.** The main indicators of a series of experimental studies of the efficiency of anaerobic digestion of a mixture of cattle manure and apple pomace in psychrophilic temperature regime at 22±1°C.

¹²**Table 3.** The main indicators of a series of experimental studies of the efficiency of anaerobic digestion of a mixture of cattle manure with apple pomace in mesophilic temperature regime at 36±1°C..

Библиография (References)

- [1] Vtorichnye materialnie resursy pishевой promyshlennosti [Secondary material resources of the food industry]. Moscow: Economics, 1984. 164 p.
- [2] Ampese, L.C., Ziero, H., Velásquez Piñas, J.A., Sganzerla, W.G., Forster-Carneiro, T. Apple pomace management by anaerobic digestion and composting: a life cycle assessment. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*. 2022, Vol. 17, no. 1, pp. 29-45. doi: 10.1002/bbb.2446.
- [3] Piskunova, L.E., Yeremenko, O.I., Zubok, T.O., Serbeniuk, H.A., Korzh, Z.V. Scientific and methodological aspects of solid biofuel production processes in compliance with labor protection and environmental safety measures. *Polityka energetyczna – energy policy Journal*. 2022, Vol. 25, no. 1, pp. 143–154. doi: 10.33223/epj/144008.
- [4] Volodko O.I., Ivanova T.S., Kulichkova G.I., Lukashevych K.M., Blume Ya.B., Tsygankov S.P. Fermentation of sweet sorghum syrup under reduced pressure for bioethanol production. *The Open Agriculture Journal*. 2020, Vol. 14, pp. 235–245. doi: 10.2174/1874331502014010235.
- [5] Kell, C.J.K. Anaerobic co-digestion of fruit juice industry wastes with lignocellulosic biomass, 2019.

- Stellenbosch: Stellenbosch University, 112 p.
- [6] Jewell, W.J., Cummings, R.J.. Apple Pomace Energy and Solids Recovery. *Journal of Food Science*. 2006, Vol. 49, no. 2, pp. 407-410. doi: 10.1111/j.1365-2621.1984.tb12433.x.
- [7] Kupryś-Caruk, M., Podlaski, S. Intensification of Biogas Production in the Process of Co-Fermentation of Silages From Perennial Grasses Blended with Maize or Waste From the Agro-Food Industry. *Polish Journal of Natural Sciences*. 2019, Vol. 34, no. 2, pp. 233–243.
- [8] Vaez, S., Karimi, K., Denayer, J.F.M., Kumar, R. Evaluation of apple pomace biochemical transformation to biofuels and pectin through a sustainable biorefinery. *Biomass and Bioenergy*. 2023, Vol. 172, a/n 106757. doi: 10.1016/j.biombioe.2023.106757.
- [9] Molinuevo-Salces, B., Riaño, B., Hijosa-Valsero, M., González-García, I., Paniagua-García A.I., Hernández, D., Garita-Cambronero, Je., Díez-Antolínez, R., García-González, M.C. Valorization of apple pomaces for biofuel production: A biorefinery approach. *Biomass and Bioenergy*. 2020, Vol. 142, a/n 105785. doi: 10.1016/j.biombioe.2020.105785.
- [10] González-García, I., Berta Riaño, B., Molinuevo-Salces B., García-González M.C. Energy and Nutrients from Apple Waste Using Anaerobic Digestion and Membrane Technology. *Membranes*. 2022, Vol. 12, no. 9, a/n 897. doi: 10.3390/membranes12090897.
- [11] Tulun, Ş., Bilgin, M. Enhanced Soluble Protein and Biochemical Methane Potential of Apple Biowaste by Different Pretreatment. *Earth Systems and Environment*. 2018, Vol. 2, no. 1, pp. 85-94. doi: 10.1007/s41748-017-0033-7.
- [12] Kuźnia, M., Magiera, A., Jerzak W., Pielichowska, K., Sikora J. Biogas production from agricultural and municipal waste. *For results International Conference: Energy and Fuels 2018* (September 19-21, 2018, Krakow, Poland), *E3S Web of Conferences*, 2019. Vol. 108. 02010. doi: 10.1051/e3sconf/201910802010.
- [13] Zhang, L., Peng, B., Wang, L., Wang, Q. Potential of anaerobic co-digestion of acidic fruit processing waste and waste-activated sludge for biogas production. *Green Processing and Synthesis*. 2022, Vol. 11, no. 1, pp. 1013-1025. doi: 10.1515/gps-2022-0089.
- [14] Blum, J. Anaerobic Digestion and Membrane Technology for Energy and Nutrient Recovery from Apple Waste. *Journal of Inflammatory Bowel Diseases & Disorders*. 2022, Vol. 7, no. 3, pp. 163-164.
- [15] Bondar S.N., Chabanova O.B., Nedobiychuk T.V. Study of the process of obtaining biogas from fruit canning waste. *Ecological safety*. 2008, Vol. 2, no. 2, pp. 68–72.
- [16] Sikora, J., Rutkowski, K. Determining The Amount of Biogas Derived From Cosubstrate on Base Executed Corn Silage and Wastes of Agricultural Industries. *For results 5th International Conference on Trends in Agricultural Engineering (September 03-06, 2013, Prague, Czech Republic), Trends in Agricultural Engineering*, 2013. pp. 581-585.
- [17] Dubrovskis, V., Plume, I. Biogas from wastes of pumpkin, marrow and apple. *Agronomy Research*. 2017, Vol. 15, no. 1, pp. 69-78.
- [18] Coalla, H.L., Fernández, J.M.B., Morán, M.A.N., Bobo, M.R.L. Biogas generation apple pulp. *Bioresource Technology*. 2009, Vol. 100, no. 17, pp. 3843-3847.
- [19] Hernández, D., Pinilla, F., Rebolledo-Leiva, R., Aburto-Hole, J., Díaz, J., Quijano, G., González-García, S., Tenreiro, C. Anaerobic Co-Digestion of Agro-Industrial Waste Mixtures for Biogas Production: An Energetically Sustainable Solution. *Sustainability*. 2024, Vol. 16, no. 6, a/n 2565. doi: 10.3390/su16062565.
- [20] Mkhize, N., Mjoli, N.S., Khumalo, S.M., Tetteh, E.K., Mahlangu, T.P., Rathilal, S. Enhanced Biogas Production through Anaerobic Co-Digestion of Agricultural Wastes and Wastewater: A Case Study in South Africa. *International Journal of Energy Production and Management*. 2023, Vol. 8, no. 2, pp. 123-131. doi: 10.18280/ijepm.080209.
- [21] Bayrak Isik, E.H. The Effect of Different Pretreatment Applications on Biogas Production from Plant and Animal Wastes. *Journal of Agricultural Faculty of Gaziosmanpasa University*. 2021, Vol. 38, no. 3, pp. 151-156. doi: 10.13002/jafag4783.
- [22] Kulichkova, G.I., Ivanova, T.S., Köttner, M., Volodko, O.I., Spivak, S.I., Tsygankov, S.P., Blume, Ya.B. Plant feedstocks and their biogas production potentials. *The Open Agriculture Journal*. 2020, Vol. 14. pp. 219-234. doi: 10.2174/1874331502014010219.
- [23] Arachchige, U., Rasenthiran, K., Maduraperuma, L.L., Madalagama, L., Pathirana, P., Sandupama, S. The Potential of Biogas from Apple Juice. *International 2019*, Vol. 11, no. 4, pp. 2349-3585.
- [24] Li, K., Liu, R., Cui, Sh., Yu, Q., Ma, R. Anaerobic co-digestion of animal manures with corn stover or apple pulp for enhanced biogas production. *Renewable Energy*. 2018, Vol. 118. pp. 335-342. doi: 10.1016/j.renene.2017.11.023.
- [25] Hamzah, A.F.A., Hamzah, M.H., Man, H.Ch., Nur Syakina Jamali, N.S., Siajam, S.I., Ismail, M.H. Effect of organic loading on anaerobic digestion of cow dung: Methane production and kinetic study. *Heliyon*. 2023, Vol. 9, no. 6, a/n e16791. doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e16791.
- [26] Ouahid, E., Elamin, A.M. Optimization of Treatment and Energetic Valorization of Chicken Droppings by Anaerobic Digestion. *Chiang Mai Journal of Science*. 2017, Vol. 44, no. 4, pp. 1347-1355.
- [27] Rogovskii I.L., Polishchuk V.M., Titova L.L., Sivak I.M., Vyhovskyi A.Yu., Drahnev S.V.,

Voinash S.A. Study of Biogas During Fermentation of Cattle Manure Using A Stimulating Additive In Form Of Vegetable Oil Sediment. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2020. Vol. 15, no. 22. pp. 2652–2663.

[28]Sami, M., Akram, A., Sharifi, M. Potential Evaluation and Modeling of Biogas Production from Apple Pomace. *Journal of Agricultural Machinery*. 2021, Vol. 11, no. 2, pp. 305-316. doi: 10.22067/jam.v11i2.80322.

[29]White, T.E., Malecki, D.J., Jewell, W.J. Anaerobic Treatment of Apple Pomace and Wastewater. *For results 43rd Industrial Waste Conference* (May 10-12, 1988, Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA), CRC Press, 1989. pp. 551–560. eBook ISBN9781351076012.

Сведения об авторах.



Полищук Виктор. Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, доктор технических наук, профессор. Основная область исследований: технологии и технические средства производства биотоплива.
E-mail: polischuk.v.m.@gmail.com



Гальчинская Юлия. Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, доктор экономических наук, профессор. Основная область исследований: устойчивый маркетинг, стратегический маркетинг, биоэнергетика.
E-mail: galchynskaya@gmail.com



Шворов Сергей. Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, доктор технических наук, профессор. Основная область исследований: создание робототехнических систем для сбора и переработки органического сырья.
E-mail: sosdok@nubip.edu.ua



Зубок Татьяна. Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент. Основная область исследований: безопасность труда в биотопливных производствах.
E-mail: tanyzubok@gmail.com



Кучерук Петр. Институт технической теплофизики НАН Украины, Кандидат технических наук (PhD). Основная область исследований: технологии и экономика производства и энергетической утилизации биогаза, оценка воздействия парниковых газов на атмосферу, переработка отходов АПК.
E-mail: pitku@i.ua



Пасичник Наталия. Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины. Кандидат сельскохозяйственных наук, доцент. Основная область исследований: технологии конверсии биомассы в биогаз по сокращенной ферментации.
E-mail: N.Pasichnyk@nubip.edu.ua



Заблодский Николай. Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, доктор технических наук, профессор. Основная область исследований: технологии конверсии биомассы в биогаз под воздействием электромагнитного поля, переработка побочных продуктов животноводства в топливо.
E-mail: zalodskiyinn@gmail.com



Валиев Тимур. Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, кафедра охраны труда и биотехнических систем в животноводстве, аспирант. Основная область исследований: технологии и технические средства производства биогаза.
E-mail: timuraliev@gmail.com