

Estimation of Biogas Yield and Electricity Output during Cattle Manure Fermentation and Adding Vegetable Oil Sediment as a Co-substrate

Polischuk V. N., Titova L. L., Shvorov S. A.

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine

Kyiv, Ukraine

Gunchenko Y. A.

Odessa I. I. Mechnikov National University

Odessa, Ukraine

Abstract. The aim of this work is to increase the output of biogas and electricity power generation in biogas plants through the use of stimulating supplements in the form of vegetable oil sediment in the transition from periodic to quasi-continuous loading of the methane tank. To achieve this goal, the following tasks were solved: the biogas yield from cattle manure was defined at various temperature conditions with periodic loading of the methane tank; biogas yield was estimated during the cattle manure fermentation with the added vegetable oil sediment, using a mathematical, biogas yield was predicted for permanent loading of the methane tank. The research was carried out at the laboratory plant consisting of a methane tank useful volume of 30 liters and the gasholder of the wet type. The biogas yield was recorded for lifting of the cylinder-gauge is a wet gasholder with attached to it a scale, calibrated in centimeters. The biogas is burned on a gas stove. Calorific value of biogas was determined by its elemental composition, which was recorded by the gas analyzer. The most important results are according to the experimental researches of biogas in periodic mode, boot using this model provided prediction of biogas yield for quasi-continuous loading of the methane tank. As a result of experimental studies, it was established that during manure milling, the maximum yield of biogas was observed at 3-8 days of fermentation, and then it gradually decreased. When adding to the substrate 1.3% vegetable oil sediment the biogas yield increases and reaches a maximum value for 20 days and then it gradually decreased. The significance of the research results is that the use of vegetable oil sediment as co-substrate will allow almost three times increasing the yield of biogas and electricity generation, to reduce the payback period of a biogas plant with a capacity of 4 MW when using a green tariff to 5.1 years.

Keywords: biogas, substrate, cattle manure, vegetable oil sediment, dry matter, methane tank, biogas plant, methane fermentation.

DOI: 10.5281/zenodo.3367054

Estimarea producției de biogaz și energie electrică în timpul fermentării băligarului vitelor cornute mari la adăugarea scamei ca co-substrat

¹Polishchuk V.N., ¹Titova L.L., ¹Shvorov S.A., ²Gunchenko Yu.A.

¹Universitatea Națională de Științe ale Vieții și Mediului din Ucraina, Kiev, Ucraina

²Universitatea Națională din Odessa numită după I. I. Mechnikov, Odessa, Ucraina

Rezumat. Scopul lucrării constă în crește producția de biogaz și electricitate prin utilizarea unui aditiv stimulant sub formă de scamă în regim de încărcare continuă a digestiilor. S-a determinat cota producerii biogazului din băligarul vitelor cornute mari la diferite temperaturi la încărcarea periodică a metantancului și cu adăugarea scamei cu utilizarea soft-ului MATLAB Simulink pentru prognozarea producerii biogazului la încărcarea continuă a băligarului. Noutatea constă în faptul că, experimental s-a determinat producția biogazului la încărcare periodică, iar modelul matematic propus asigură prognoza producției biogazului la încărcarea continuă a digesterului. S-a constatat că, odată cu mono-digestia gunoiului de grajd, randamentul maxim se observă pentru 3-8 zile de fermentare, după care scade treptat. La adăugarea a 1,3% la substrat a scamei ieșirea biogazului crește și atinge valoarea maximă la a 20-ea zi după care scade treptat. Randamentul de ieșire a biogazului a fost studiat într-o instalație de biogaz de laborator cu un digester de 30 de litri și un rezervor de gaz de tip "umed". Metantancul a fost încărcat la cota 75% din volum la mono-fermentarea băligarului de vite cornute mari și cu cota de 50% din volum la fermentarea adaosului din băligar și scamă cu concentrația de 1.3%. Substratul era format din 40% băligar și 60% apă. Încărcarea substratului a fost efectuată în mod periodic. S-a demonstrat, că utilizarea scamei ca cosubstrat la încărcarea periodică aproape va triplă producția de biogaz și electricitate a unei instalații de biogaz de 4 MW și rambursarea investiției la tariful verde în 5.1 ani.

Cuvinte-cheie: biogaz, substrat, gunoi de grajd pentru bovine, sedimentului de uleiul vegetal, materie uscată, uzină de biogaz, fermentație de metan.

Оценка выхода биогаза и электроэнергии при моносбраживании навоза крупного рогатого скота и при добавлении фуза в качестве косубстрата

Полищук Виктор Николаевич, Титова Людмила Леонидовна, Шворов Сергей Андреевич

Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины

Киев, Украина

Гунченко Юрий Александрович

Одесский национальный университет имени И. И. Мечникова

Одесса, Украина

Аннотация. Целью работы является повышение выхода биогаза и выработки электроэнергии на биогазовых установках за счет использования стимулирующей добавки в виде фуза при переходе от периодической к квазинепрерывной загрузке метантенка. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи: определялся выход биогаза из навоза крупного рогатого скота при различных температурных режимах с периодической загрузкой метантенка; оценивался выход биогаза при сбраживании навоза крупного рогатого скота с добавлением фуза; с помощью математической модели прогнозировался выход биогаза для квазинепрерывной загрузки метантенка. Исследования проводились на лабораторной биогазовой установке, состоящей из метантенка полезным объемом 30 л и газгольдера мокрого типа. Выход биогаза фиксировался по поднятию цилиндра-уровнемера мокрого газгольдера с помощью закрепленной на нем шкалы, отградуированной в сантиметрах. Биогаз сжигался на газовой плите. Теплота сгорания биогаза определялась по его элементному составу, который фиксировался газоанализатором. Наиболее важными результатами являются следующие: по данным экспериментальных исследований выхода биогаза при периодическом режиме загрузки с использованием данной модели обеспечивается прогнозирование выхода биогаза для квазинепрерывной загрузки метантенка. В результате экспериментальных исследований установлено, что при моносбраживании навоза максимальный выход биогаза наблюдается на 3-8 сутки брожения, после чего постепенно уменьшается. При добавлении к субстрату 1.3% фуза выход биогаза увеличивается и достигает максимального значения на 20 сутки, после чего плавно уменьшается. Значимость результатов исследований состоит в том, что использование фуза в качестве косубстрата позволит почти в три раза увеличить выход биогаза и выработку электроэнергии, снизить срок окупаемости биогазовой установки мощностью 4 МВт при использовании "зеленого" тарифа до 5.1 года.

Ключевые слова: биогаз, субстрат, навоз крупного рогатого скота, фуз, сухое вещество, метантенок, биогазовая установка, метановое брожение.

LIST OF ABBREVIATIONS

ЛЖК – летучие жирные кислоты; СВ – сухое вещество; COB – сухое органическое вещество; ХПК – химическое потребление кислорода; VS – летучее твердое вещество.

Введение

Навоз крупного рогатого скота (КРС) часто используется для получения биогаза. Это доступный субстрат, который уже содержит в своем составе метанобразующие бактерии, что улучшает процесс метаногенеза. Субстраты из навоза КРС имеют идеальные показатели (рН, соотношение азота и углерода и др.) для жизнедеятельности сообщества метанобразующих бактерий. Вместе с тем, вследствие наличия в навозе большого количества сырой клетчатки, выход биогаза при его сбраживании относительно низкий.

I. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для увеличения выхода биогаза практикуется совместное сбраживание навоза КРС с сельскохозяйственным сырьем: зеленой массой и силосом травы, кукурузы,

ее смесью с подсолнечником. Вместе с тем, это сырье можно использовать в качестве корма для сельскохозяйственных животных и продуктов питания для человека. Поэтому для улучшения выхода биогаза из навоза желательно использовать более дешевое сырье – отходы производств, при этом уменьшаются затраты на их утилизацию.

II. АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В работе [1] утверждается, что выход биогаза из навоза животных составляет $450 \text{ м}^3/\text{кг} \cdot \text{VS}$, что значительно меньше по сравнению с выходом биогаза при сбраживании кукурузного силоса ($650 \text{ м}^3/\text{кг} \cdot \text{VS}$) или пищевых отходов ($660 \text{ м}^3/\text{кг} \cdot \text{VS}$). Меньший выход биогаза при сбраживании навоза КРС по сравнению с кукурузным силосом подтверждено также в работе [2]. В месте с тем, выход биогаза при сбраживании навоза

КРС ($0.31 \text{ м}^3/\text{кг} \cdot \text{VS}$), как утверждается в работе [3], выше по сравнению со сбраживанием пищевых отходов ($0.17 \text{ м}^3/\text{кг} \cdot \text{VS}$), а в [4] – по сравнению с птичьим пометом и соломой (0.034 , 0.030 и $0.142 \text{ м}^3/\text{кг}$ соответственно). При этом содержание метана в биогазе составляет 60% и 62% и 74% соответственно. В работе [5] оптимальный pH для сбраживания навоза КРС определен 7.0, температура процесса – 37°C . Предварительная термическая обработка навоза уменьшала выход биогаза, механическая обработка на выход биогаза влияет не систематически. В работах [6], [7] проведена оценка сбраживания коровьего навоза при температуре 35°C . Было обнаружено, что производство биогаза превышало $0.3 \text{ м}^3/\text{кг DM}$. Содержание метана в биогазе составляло около 60% после 6 дней ферментации.

Наилучшие показатели производства биогаза, как отмечается в [8], фиксировались при температуре брожения 39.5°C , а в работе [9] – 45°C , со средним выходом метана $166 \text{ л/кг} \cdot \text{VS}$, что на 12.8% и 9.6% выше, чем при 37°C и 55°C . В работе [10] описано исследование состава метаногенного сообщества в метантенке при мезо- ($35\text{--}37^\circ\text{C}$) и термофильном ($55\text{--}57^\circ\text{C}$) режимах. В течение всего термофильного режима наблюдалось количество бактериальных клеток в 6.25 раз больше, чем количество археальных, тогда как отношение количества клеток в мезофильном процессе варьировалось от 0.2 до 8.5. Это говорит о том, что термофильный процесс более стабилен, но также о том, что относительное обилие между бактериями и археями может варьироваться без серьезного влияния на производство биогаза. Как отмечается в [11], изменение условий сбраживания с мезофильных ($T=35^\circ\text{C}$) до термофильных ($T=55^\circ\text{C}$) приводит к увеличению выхода биогаза с $0.18\text{--}0.29 \text{ м}^3/\text{м}^3 \cdot \text{сутки}$ до $0.39\text{--}0.96 \text{ м}^3/\text{м}^3 \cdot \text{сутки}$. В работе [12] отмечается, что при увеличении органической нагрузки до $7.3 \text{ кг ХПК/м}^3 \cdot \text{сутки}$ в мезофильном режиме (37°C), произошло уменьшение выхода биогаза, чего не наблюдается в термофильном режиме (55°C). Сбраживание жиротходов исследовалось в работе [13], где описаны результаты совместного сбраживания навоза свиней и фуза от производства оливкового масла при

мезофильном режиме (37°C) с выходом метана, который варьировался от 150.9 л/кг VS за сутки до 274.3 л/кг VS за сутки. В работе [14] приведены результаты сбраживания навоза свиней и отходов растительного масла при этой же температуре с выходом биогаза от $0.16 \text{ дм}^3/\text{г VS}$ до $0.32 \text{ дм}^3/\text{г VS}$. В работе [15] отмечается, что чрезмерное добавление жиров к субстрату на начальной стадии снижало метаногенную активность, однако в дальнейшем производство биогаза увеличилось на 21.7%. В исследовании [16] указано, что при загрузке метантенка в $2.0 \text{ г} \cdot \text{VS/л}$ в сутки добавление 5% жира вызвало прекращения брожения, тогда как при добавлении $4.0 \text{ г} \cdot \text{VS/л}$ в сутки процесс оставался стабильным в течение 10 дней до накопления ЛЖК, что вызвало снижение pH и, таким образом, уменьшало выработку биогаза. Добавление NaOH для реактивации реакторов только улучшало значение pH, но не оказывало существенного влияния на производство биогаза и концентрацию ЛЖК. Эффективное решение было достигнуто путем рециркуляции 50% дигестата реакторов, что привело к увеличению выхода биогаза и стабильной работе реакторов. Максимально допустимые загрузки жира с жиротловителя при сбраживании совместно с навозом КРС отходов, как указано в [17], составили 23%. При этом выход биогаза был на 67% больше, чем при сбраживании только отходов. Смешивание пищевых отходов и жира с жиротловителя при содержании липидов 55% и их загрузке 1.61 г/л сутки, в работе [18] было доказано целесообразным, при этом максимальный выход метана увеличился на 68%, в сравнении с моносбраживанием пищевых отходов. Соотношение жиров и пищевых отходов 50:50, при содержании 85% липидов и 15% белка, как указано в [19], дало высокий выход метана – 1040 мл/ч VS (против 118 мл/ч VS при моносбраживании пищевых отходов). В работе [20] установлено, что при гипертермофильном режиме (70°C) добавление 60% жиров в навоз КРС значительно увеличивает максимальное производство метана в $673.1 \pm 14.0 \text{ мл}$ по сравнению с $316.4 \pm 14.3 \text{ мл}$ метана при моносбраживании навоза КРС. Поскольку моносбраживание растительного масла тормозит анаэробную деградацию, в работе [21] описаны результаты смешивания его со

свиным навозом. Выход метана составлял $0.3\text{-м}^3/\text{кг VS}$ при равном смешивании компонентов и $0.22\text{ м}^3/\text{кг VS}$ при трехкратном преимуществе в добавлении навоза.

Итак, из анализа предыдущих исследований следует, что выход биогаза из навоза КРС в разных источниках оценивался в разных единицах, что усложняет систематизацию: от 287 до $450\text{ м}^3/\text{кг VS}$ за сутки, $0.31\text{ м}^3/\text{кг}$, $0.3\text{ м}^3/\text{кг}\cdot\text{CB}$, $58.6\text{ м}^3/\text{т}$, коэффициент выхода метана от 0.13 до 0.20 л/час ХПК , а с добавлением жиросодержащих – от 150.9 до $274.3\text{ л/кг}\cdot\text{VS}$ за сутки, от $0.16\text{ дм}^3/\text{г}\cdot\text{VS}$ до $0.32\text{ дм}^3/\text{г VS}$, $0.22\text{-}0.3\text{ м}^3/\text{кг}\cdot\text{VS}$, 1040 мл/г VS . Средний выход метана при сбраживании чистого навоза КРС составляет $55\text{-}60\%$. Отмечается, что чрезмерное добавление жиров к субстрату на начальной стадии ингибировало метаногенную активность, однако в дальнейшем производство биогаза увеличилось на 21.7% . Улучшению выхода биогаза способствует рециркуляция 50% дигестата реакторов. В исследованиях отмечается увеличение выхода биогаза при добавлении до 23% жира к субстрату. В некоторых исследованиях указывается, что оптимальная температура субстрата при сбраживании должна составлять 39.5°C или 45°C , но большинство исследователей выражают мнение, что выход биогаза в термофильном режиме выше, чем в мезофильном режиме. Анализ проведенных исследований показывает, что требуется дальнейшее изучение вопросов интенсификации выхода биогаза и выработки электроэнергии на основе сбраживания навоза КРС со стимулирующими добавками. При этом в рассмотренных выше работах оценка выхода биогаза осуществлялась только по данным экспериментальных исследований, что требует значительных временных и стоимостных затрат, особенно при периодической загрузке субстратов. Хотя в настоящее время большое количество современных биогазовых установок работает в системе с квазинепрерывной (постепенной) загрузкой. Одним из подходов к устранению указанных недостатков является применение математических моделей прогнозирования выхода биогаза при переходе от периодической к квазинепрерывной загрузке

метантенка.

Целью работы является повышение выхода биогаза и выработки электроэнергии из навоза КРС за счет добавления стимулирующей добавки в виде фуза при переходе от периодической к квазинепрерывной загрузке метантенка. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: определить выход биогаза из навоза КРС при различных температурных режимах с периодической загрузкой метантенка; оценить выход биогаза при сбраживании навоза КРС с добавлением фуза, с помощью математического моделирования спрогнозировать выход биогаза и выработку электроэнергии для квазинепрерывной загрузки метантенка.

III. МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования проводились на лабораторной биогазовой установке, состоящей из метантенка полезным объемом 30 л и мокрого газгольдера (рис. 1). Метантенок I состоит из внешнего и внутреннего корпусов, между которыми помещается водяная рубашка с электронагревателем. Водяная рубашка служит для передачи тепла субстрату, который размещается во внутреннем корпусе. Свежий субстрат подается в активную зону метантенка через трубу, которая доходит почти до дна. Поэтому свежий субстрат подается в нижнюю часть активной зоны метантенка, тем самым вытесняя отработанный дигестат через трубу, которая размещена на уровне границы субстрата и биогаза. Для неизменности микрофлоры комплекса метанообразующих бактерий при заправке метантенка необходимо сохранить в нем не менее $1/3$ отработанного дигестата для наличия в нем маточной культуры бактерий. Для слива всего дигестата при техническом обслуживании метантенка служит труба, расположенная в нижней конусной части ферментатора. Выход биогаза фиксируется по поднятию цилиндра-уровнемера мокрого газгольдера с помощью, закрепленной на нем шкалы, отградуированной в сантиметрах. Биогаз сжигается на газовой плите, нагревая при этом воду в измерителе теплотворности. При необходимости его можно сбросить в атмосферу.

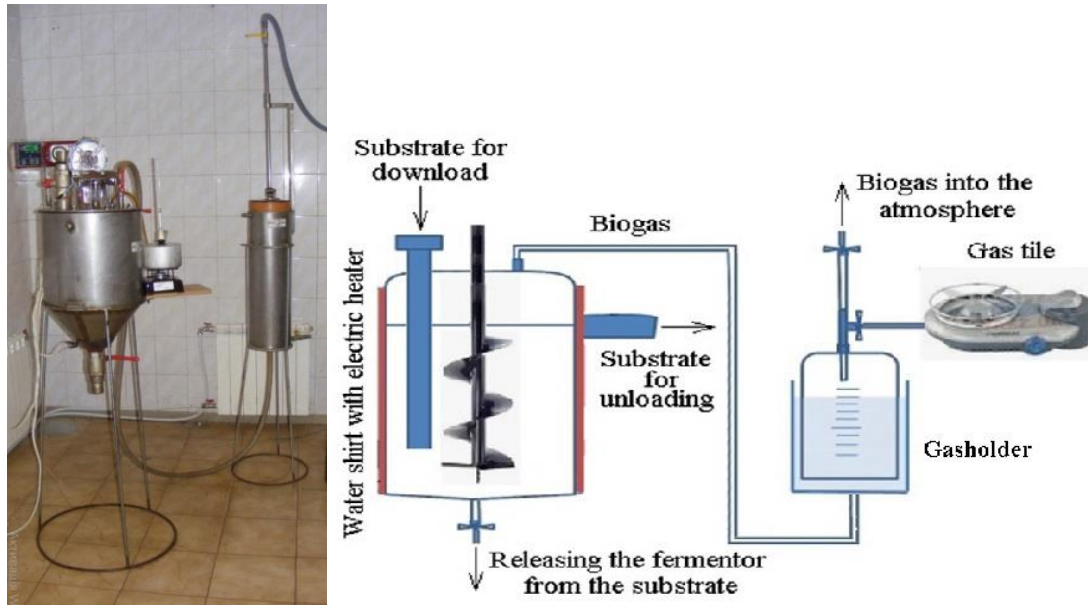


Рис.1. Лабораторная биогазовая установка. ¹

Режим загрузки субстрата в метантенк – периодический. Субстрат готовится путем смешивания отмеренного количества навоза КРС с водой. В некоторых опытах к навозу КРС добавлялся фуз. Метантенк заполнен субстратом на 3/4. При закладке нового опыта меняется не более 1/3 объема субстрата для сохранения сообщества метаногенов. Выход биогаза фиксируется по поднятию цилиндра мокрого газгольдера с помощью закрепленной на нем шкалы, отградуированной в сантиметрах.

В большинстве литературных источников выход биогаза из субстрата оценивается в л/кг COB. Поэтому чтобы можно было сравнивать полученные результаты с данными из литературных источников, переведем их в размерность л/(час·кг COB). Для этого определяется масса СВ субстрата, который загружается в метантенк, за уравнением:

$$M_{DMs} = \frac{M_s \cdot DM}{100}, \quad (1)$$

где M_{DMs} – масса СВ субстрата, кг; M_s – масса субстрата, кг; DM – содержание СВ в субстрате, %.

После этого определяется масса COB субстрата, который загружается в метантенк, за уравнением:

$$M_{DOMs} = \frac{M_{DMs} \cdot DOM_{DM}}{100}, \quad (2)$$

где M_{DOMs} – масса COB субстрата, кг; DOM_{DM} – содержание COB в СВ субстрата, %.

Если известно процентное содержание COB в субстрате, то масса COB субстрата, который загружается в метантенк, определяется за уравнением:

$$M_{DOMs} = \frac{M_{DMs} \cdot DOM}{100}, \quad (3)$$

где DOM – содержание COB в субстрате, %.

Тогда производительность метантенка по биогазу, отнесенная к содержанию в субстрате COB, определяется за уравнением:

$$q_{b/DOM} = 10^{-3} \cdot \frac{q_b}{M_{DOMs}}, \quad (4)$$

где $q_{b/DOM}$ – производительность метантенка по биогазу, отнесенная к содержанию в субстрате COB, л/(час·кг COB); q_b – производительность метантенка по биогазу, см³/час.

Относительная влажность субстрата, состоящего из нескольких компонентов, при известной относительной влажности этих компонентов определяется за уравнением:

¹ Appendix 1

$$W_s = \frac{m_1 \cdot W_1 + m_2 \cdot W_2 + \dots + m_n \cdot W_n}{m_s}, \quad (5)$$

где W_s – относительная влажность многокомпонентного субстрата, %; W_1, W_2, W_n – относительная влажность 1-го, 2-го, n-го компонента субстрата, %; m_s – масса многокомпонентного субстрата, кг; m_1, m_2, m_n – масса 1-го, 2-го, n-го компонента субстрата, кг.

Теплота сгорания биогаза определяется его элементарным составом за уравнением Менделеева:

$$Q = 128CO + 108H_2 + 234H_2S + 339CH_4 + 589C_nH_m, \quad (6)$$

где Q – низшая теплота сгорания биогаза, кДж/м³; CO, H_2, CH_4, C_nH_m – состав газообразного топлива, проценты по объему при нормальных условиях (0°C, давление 760 мм.рт.ст.).

Элементарный состав биогаза определяется газоанализатором GEM-500.

В некоторых случаях теплота сгорания определялась экспресс-методом энергией, затраченной на нагрев стандартного объема воды.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование выхода биогаза при сбраживании навоза КРС. В метантенк загружалась порция субстрата весом 8,5 кг, который состоял из 3,5 кг навоза КРС и 5,0 кг воды.

В твердой фракции навоза КРС содержится 16,4% СВ, из которых около 80% COB.

Тогда масса СВ субстрата с уравнения 1 составляет:

$$M_{DMs} = \frac{3,5 \cdot 16,5}{100} = 0,587 \text{ кг}, \quad (7)$$

а масса COB субстрата с уравнения 3:

$$M_{DOMs} = \frac{0,587 \cdot 80}{100} = 0,462 \text{ кг}, \quad (8)$$

Относительная влажность твердой фракции навоза КРС составляет 84%, воды – 100%. Относительная влажность такого двухкомпонентного субстрата составляет:

$$W_s = \frac{3,5 \cdot 84 + 5,0 \cdot 100}{8,5} = 93,4\%. \quad (9)$$

Температурный режим метантенка при исследовании устанавливался как 40°C, 45°C, 50°C и 55°C, то есть исследования осуществлялись в мезофильном и термофильном режимах. Они проводились в трех повторах. Результаты исследований представлены на рис. 2.

Установлено, что на всех температурных режимах наблюдается типичный для периодической загрузки метантенка процесс брожения, который включает лаг-фазу (фазу привыкания), логарифмическую фазу, стационарную фазу и фазу отмирания бактерий.

Однако при большей температуре брожения время логарифмической фазы и начальной стадии фазы отмирания уменьшается, что обеспечивает интенсификацию брожения.

Стационарная фаза очень короткая, ее даже трудно выделить. При уменьшении температуры брожения участки, отвечающие логарифмической фазе и начальной стадии фазы отмирания, становятся более пологими, а стационарную фазу легче выделить.

Конечная стадия фазы отмирания для всех исследований продолжалась в течение большого промежутка времени и с окончанием опытов не была завершена. Лаг-фаза наблюдалась только при температуре брожения 55°C в первой повторности.

Генерирование биогаза при этом происходило неравномерно: в логарифмической фазе оно росло, в короткой стационарной фазе было равномерным и в фазе отмирания снижалось.

Такой тип генерации биогаза характерен для любого температурного режима метантенка при периодическом способе его загрузки.

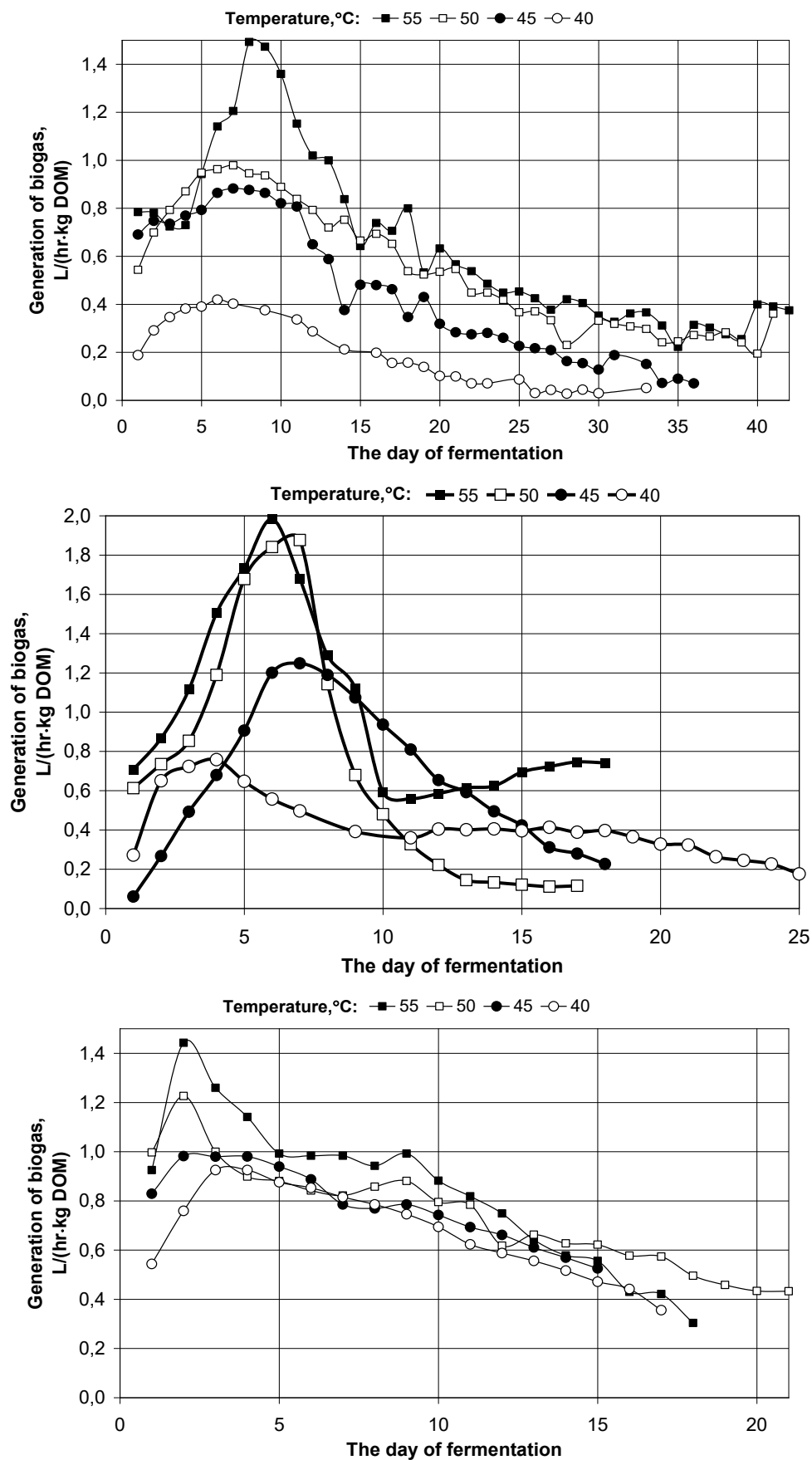


Рис.2. Динамика выхода биогаза при сбраживании навоза КРС для различных температурных режимов метантенка: 1– первый повтор; 2– второй повтор; 3– третий повтор.²

Поскольку фаза отмирания длится очень долго и характеризуется низким выходом биогаза, целесообразно останавливать цикл брожения на 5-6 суток после начала фазы отмирания. То есть весь цикл брожения

(рациональный цикл брожения) при этом будет продолжаться 13-14 суток.

Максимальный выход биогаза при сбраживании навоза КРС наведен в табл. 1.

Таблица 1³

Максимальный выход биогаза при сбраживании навоза КРС

Температура сбраживания, °С	Максимальный выход биогаза, л/(час·кг СОВ)			
	Повтор 1	Повтор 2	Повтор 3	Среднее
40	0.419	0.788	0.925	0.701
45	0.882	1.248	0.982	1.037
50	0.979	1.876	1.226	1.360
55	1.493	1.982	1.443	1.639

Зависимость среднего максимального выхода биогаза от температуры брожения приведена на рис. 3. Коэффициент пересчета

с размерности выхода биогаза л/(час·кг СОВ) в размерность л/(час·кг) – 18.398 кг/кг СОВ.

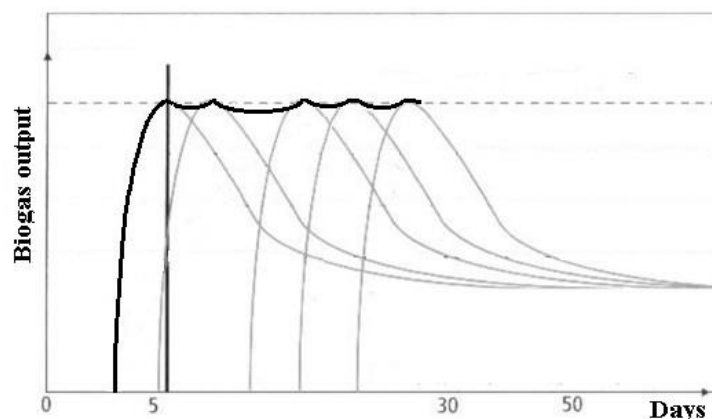


Рис.3. Схема моделирования выхода биогаза при постепенной (непрерывной) загрузке метантенка на основе данных выхода биогаза при периодической загрузке метантенка, рисунок доработанный из [22, Fig. 2.5].⁴

На практике на действующих биогазовых установках периодический режим загрузки метантенка применяется редко, чаще используется квазинепрерывный режим загрузки, когда субстрат в метантенк загружается малыми порциями через определенный промежуток времени (как правило, около 1 ч.). При этом выход биогаза достигает максимального значения от того, какой может быть получен при периодической системе загрузки, и держится на таком уровне в течение всего времени работы биогазовой установки (рис. 3). Поэтому на основе опытов при периодической системе загрузки метантенка можно смоделировать выход биогаза при квазинепрерывной системе загрузки. При этом он будет близок к максимальному выходу биогаза при периодической системе

загрузки. Математическая модель, описывающая во времени процессы развития метанобразующих бактерий (C), концентрации питательных веществ в субстрате (S) и генерирования биогаза (V) будет иметь вид:

$$\begin{cases} \frac{dC}{dt} = \left(\frac{\mu_m \cdot S}{a + S} - \frac{\mu_d \cdot b}{b + S} - p \right) \cdot C, \\ \frac{dS}{dt} = \delta \cdot (S_0 - S) - \left(\alpha \cdot \mu_m \cdot C + \frac{\beta \cdot S \cdot \mu_m}{a + S} \cdot C + \frac{k}{\rho_a} \cdot \frac{dV}{dt} \right), \\ \frac{dV}{dt} = \gamma \cdot S, \end{cases} \quad (10)$$

где C – концентрация бактерий, кг/м³; S – концентрация питательных веществ в субстрате, кг/м³; V – выход биогаза, м³/м³; μ_m , μ_d – максимально возможные

относительные скорости прироста и отмирания бактерий, сутки⁻¹; α , β – безразмерные коэффициенты усвоения субстрата; p – относительная скорость поступления субстрата, сутки⁻¹; γ – коэффициент скорости преобразования питательных веществ субстрата в биогаз, м⁶/кг; a – константа, численно равная такой концентрации вещества, при которой скорость роста достигает половины предельной, кг/м³; b – эмпирический коэффициент, кг/м³; dV/dt – изменение выхода биогаза во времени, м³/(м³·сутки).

Начальными условиями для решения системы дифференциальных уравнений являются:

– начальная концентрация биомассы метанобразующих бактерий C_0 в метантенке – 1 кг/м³;

– начальная концентрация питательных веществ в субстрате S_0 определялась из результатов экспериментальных исследований: в метантенк рабочим объемом 30 л загружалось 8.5 кг субстрата, в т.ч. 3.5 кг гноя КРС и 5 кг воды; следовательно, $S_0 = 3.5/(30 \cdot 1000) = 115$ кг/м³;

– начальный выход биогаза $V_0 = 0$ м³/м³.

Было проведено имитационное моделирование процесса генерации биогаза, который описывает система дифференциальных уравнений 10. Плотность биогаза в системе уравнений 10 определяется по уравнению:

$$\rho_{\delta} = \frac{\sum \rho_k \cdot A_k}{\sum A_k} \quad (11)$$

Если биогаз состоит из 60% метана и 40% углекислого газа, то его плотность за уравнением 11 будет составлять:

$$\rho_{\delta} = \frac{0,7 \cdot 60 + 1,98 \cdot 40}{60 + 40} = 1.212 \text{ кг/м}^3.$$

С учетом того, что с 1 г уксусной кислоты образуется 0.27 г метана, коэффициент преобразования питательных веществ субстрата в биогаз принимается как $k = 0.27$.

В случае периодической загрузки метантенка относительная скорость поступления субстрата $p = 0$ суток⁻¹.

Имитационная модель уравнение 10 предполагает выход биогаза в размерности м³/кг, тогда как в результате экспериментальных исследований нами получены зависимости выхода биогаза с размерностью л/(час·кг СОВ).

Для приведения результатов экспериментальных исследований к размерности имитационной модели, значения с размерностью л/(час·кг СОВ) делились на $100 \cdot K$, где K – коэффициент пересчета выхода биогаза из размерности л/(час·кг СОВ) в размерность л/(час·кг). Для моносображивания навоза КРС $K = 18.398$ кг/кг СОВ, для совместного сбраживания навоза КРС с 1.3% фуза – 15.828 кг/кг СОВ.

Путем подбора параметров μ_m , μ_d , a , b , α , β , γ добивались того, чтобы имитационная модель была наиболее близка к зависимости выхода биогаза во времени, полученного экспериментальным путем.

При имитационном моделировании всех субстратов принималось, что коэффициенты принимали значения $\alpha = 10^{-9}$, $\beta = 25$, $b = 0.01$ кг/м³, $a = 14$ кг/м³. Коэффициенты μ_m , μ_d и γ определялись путем подбора и сравнения данных имитационного моделирования с экспериментальными данными до получения возможно более высокого коэффициента детерминации R^2 .

Коэффициенты имитационной модели выхода биогаза при моносображивании навоза КРС для различных температур брожения приведены в табл. 2.

Таблица 2⁵

Коэффициенты имитационной модели выхода биогаза при моносображивании навоза КРС для различных температур брожения

№	Температура брожения, °C	Коэффициенты полинома				R ²
		b_3	b_2	b_1	b_0	
1	55	-	-0,6696	35,843	-28,8	0,998
2	50	-	-0,6823	31,554	-20,9	0,9978
3	45	-0,074	1,4677	12,453	1,3	0,9999
4	40	-0,0258	0,3325	14,27	-7,7	0,9998

Коэффициенты μ_m , μ_d и γ в табл. 2 описываются полиномами Ньютона второго порядка:

$$\mu_m = -0.0001 \cdot t^2 + 0.0021 \cdot t + 0.4765$$

при $R^2=0.9993$; (13)

$$\mu_d = -0.00006 \cdot t^2 + 0.003 \cdot t + 0.075$$

при $R^2=0.9930$; (14)

$$\gamma = -3 \cdot 10^{-9} \cdot t^2 + 9.47 \cdot 10^{-7} \cdot t + 2.5 \cdot 10^{-5}$$

при $R^2=0.9994$. (15)

Коэффициенты имитационной модели выхода биогаза при сбраживании навоза КРС

с добавлением фуза при температуре брожения 40°C имеют значения: $\mu_m = 0.114$ суток⁻¹, $\mu_d = 0.034$ суток⁻¹, $\gamma = 0.000023$ м⁶/кг.

Поскольку коэффициенты детерминации имитационной модели выхода биогаза при моносбраживании навоза КРС и сбраживании навоза КРС с добавлением фуза, приближаются к единице, то они достаточно точно отражают экспериментальные данные.

При проверке по критерию Фишера установлена значимость коэффициента детерминации.

Смоделированный выход биогаза при сбраживании навоза КРС для квазинепрерывной системы загрузки метантенка приведен на рис. 4.

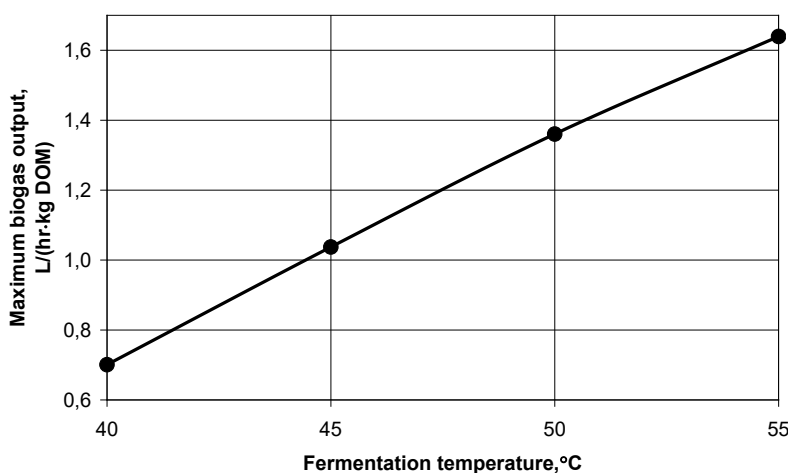


Рис.4. Смоделированный выход биогаза при сбраживании навоза КРС для квазинепрерывной системы загрузки метантенка. ⁶

Смоделированный выход биогаза при сбраживании навоза КРС для квазинепрерывной системы загрузки метантенка аппроксимируется линейной функцией:

$$q_{bmod} = 0.0628 \cdot T - 1.8, \text{ при } R^2=0.9982 \quad (16)$$

где q_{bmod} – смоделированный выход биогаза для постепенной системы загрузки метантенка, л/кг СОР; T – температура брожения, °C.

Коэффициент детерминации аппроксимированной линейной функции (16), описывающий смоделированный выход биогаза при сбраживании навоза КРС при квазинепрерывной системе загрузки метантенка, приближается к единице, что

говорит о том, что полученное уравнение регрессии достаточно точно отражает экспериментальные данные.

Еще одной характеристикой метанового сбраживания сырья в метантенке является накопленный (кумулятивный) выход биогаза. Среднее значение кумулятивного выхода биогаза при сбраживании навоза КРС в пределах одного температурного режима приведено на рис. 5.

С рис. 5 можно сравнить средний кумулятивный выход биогаза для различных температурных режимов метантенка. Так, за 14 суток брожения средний кумулятивный выход биогаза при температуре брожения 55°C составляет 336 л/кг СОВ, при температуре брожения 50°C – 283 л/кг СОВ, 45°C – 257 л/кг СОВ, 40°C – 184 л/кг СОВ. Приведенные результаты экспериментальных

исследований близки к значениям, указанным в литературных источниках, уточняя их в зависимости от температурного режима.

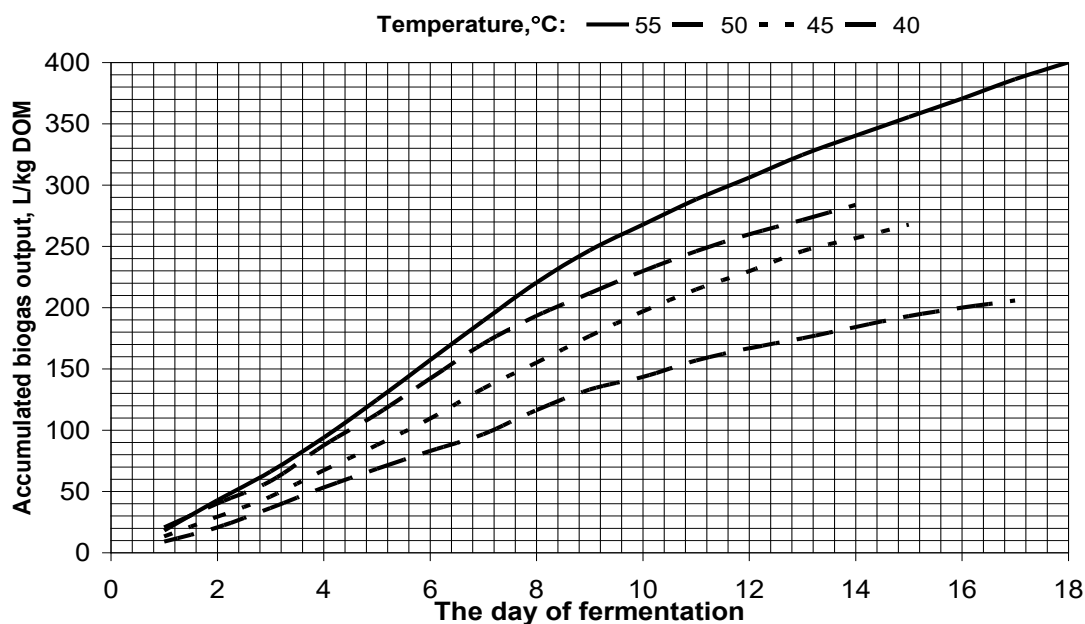


Рис.5. Средний кумулятивный выход биогаза при сбраживании навоза КРС.⁷

Средний кумулятивный выход биогаза при сбраживании навоза КРС аппроксимируется полиномом Ньютона:

$$q_{bcum} = b_n \cdot t^n + b_{n-1} \cdot t^{n-1} + b_1 \cdot t + b_0, \quad (17)$$

где q_{bcum} – средний кумулятивный выход

биогаза, л/кг СОР; t – время брожения, суток; b – коэффициенты полинома; n – степень полинома.

Коэффициенты полинома, описывающие средний кумулятивный выход биогаза при сбраживании навоза КРС приведены в табл. 3.

Таблица 3⁸

Коэффициенты полинома, описывающие средний кумулятивный выход биогаза при сбраживании навоза КРС

№	Температура брожения, °C	Коэффициенты полинома				R ²
		b_3	b_2	b_1	b_0	
1	55	-	-0.6696	35.843	-28.8	0.998
2	50	-	-0.6823	31.554	-20.9	0.9978
3	45	-0.074	1.4677	12.453	1.3	0.9999
4	40	-0.0258	0.3325	14.27	-7.7	0.9998

Коэффициенты детерминации аппроксимированных кривых с коэффициентами, приведенными в табл. 4, приближаются к единице, что говорит о том, что полученные уравнения регрессии достаточно точно отражают экспериментальные данные. При проверке по критерию Фишера установлена значимость коэффициента детерминации. Проверка по критерию Стьюдента показала, что все коэффициенты полиномов уравнение 17

значимы.

Содержание метана в биогазе составило 50.4%, углекислого газа – 49.6%. Низшая теплота сгорания биогаза, определенная за уравнением 6, составляла $Q_n = 1339 \cdot 50.4 = 17.1$ МДж/м³.

Исследования выхода биогаза при добавлении фуза к навозу КРС.

Масляным фузом называется баковый отстой, выделяемый из масла при его хранении, который состоит из фосфолипидов,

масла, влаги и примесей белкового характера.

При экспериментальном исследовании выхода биогаза при сбраживании навоза КРС к субстрату, который состоял из 1.5 кг навоза КРС и 2.25 кг воды, добавлялось 50 мл фуза. Коэффициент загрузки метантенка составлял 0.5. При добавлении новой порции субстрата переброженный субстрат менялся наполовину (коэффициент опорожнения –

0.5). Температурный режим метантенка при исследовании составлял 40°C.

Масса СОВ субстрата на основе навоза КРС с добавлением фуза составляет 0.24 кг, относительная влажность – 92.6%. При этом содержание фуза в субстрате составляет 1.3%. Результаты исследований представлены на рис. 6.

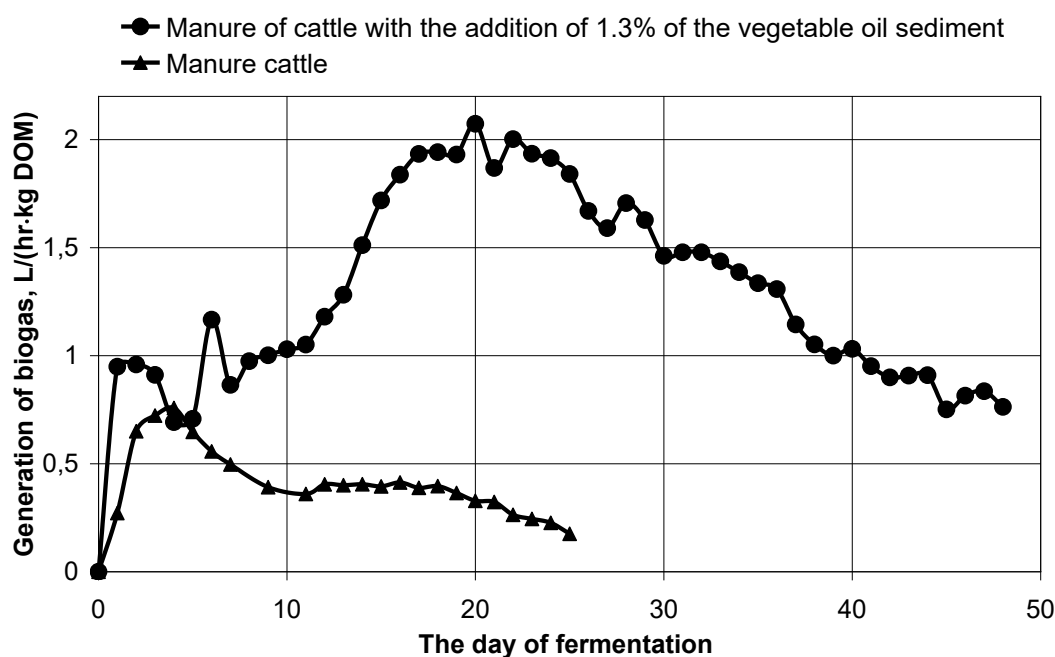


Рис.6. Динамика выхода биогаза при сбраживании навоза КРС с добавлением фуза при температуре брожения 40°C.⁹

Из рис. 6 видно, что при сбраживании навоза КРС с добавлением фуза характерна диауксия (наличие двух максимумов выхода биогаза). Первый пик выхода биогаза сравнительно небольшой, второй пик выхода биогаза в два раза больше первого и растягивается на гораздо большее время. Однако появление второго пика наблюдается только на 20 сутки брожения.

Максимальный выход биогаза (постоянный при постепенной загрузке метантенка) составляет 2.073 л/(час·кг СОВ), который однако наступает лишь на 20 сутки брожения. Коэффициент пересчета из размерности выхода биогаза л/(час·кг СОВ) в размерность л/(час·кг) – 15.828 кг/кг СОВ.

Кумулятивный выход биогаза при сбраживании навоза КРС с добавлением фуза приведен на рис. 7. На этом же рисунке для сравнения приведены кумулятивный выход биогаза при сбраживании навоза КРС. Из рис. 7 видно, что на 11 сутки брожения

кумулятивный выход биогаза при сбраживании навоза КРС с добавлением фуза составляет 273.6 л/кг СОВ и почти в три раза больше, чем кумулятивный выход биогаза при сбраживании навоза КРС без добавления косубстрата (99.2 л/кг СОВ). На 33 сутки брожения кумулятивный выход биогаза при сбраживании навоза КРС с добавлением фуза в 7.5 раза выше по сравнению с кумулятивным выходом биогаза при сбраживании навоза КРС без добавления косубстрата (1140.5 л/кг СОВ против 150.2 л/кг СОВ). На 48 сутки брожения кумулятивный выход биогаза при сбраживании навоза КРС с добавлением фуза доходит до 1504.1 л/кг СОВ.

Накопленный выход биогаза при сбраживании навоза КРС с добавлением 1.3% фуза к содержимому субстрата при температуре брожения 40°C аппроксимируется полиномом уравнение 17 с коэффициентами, приведенными в табл. 4.

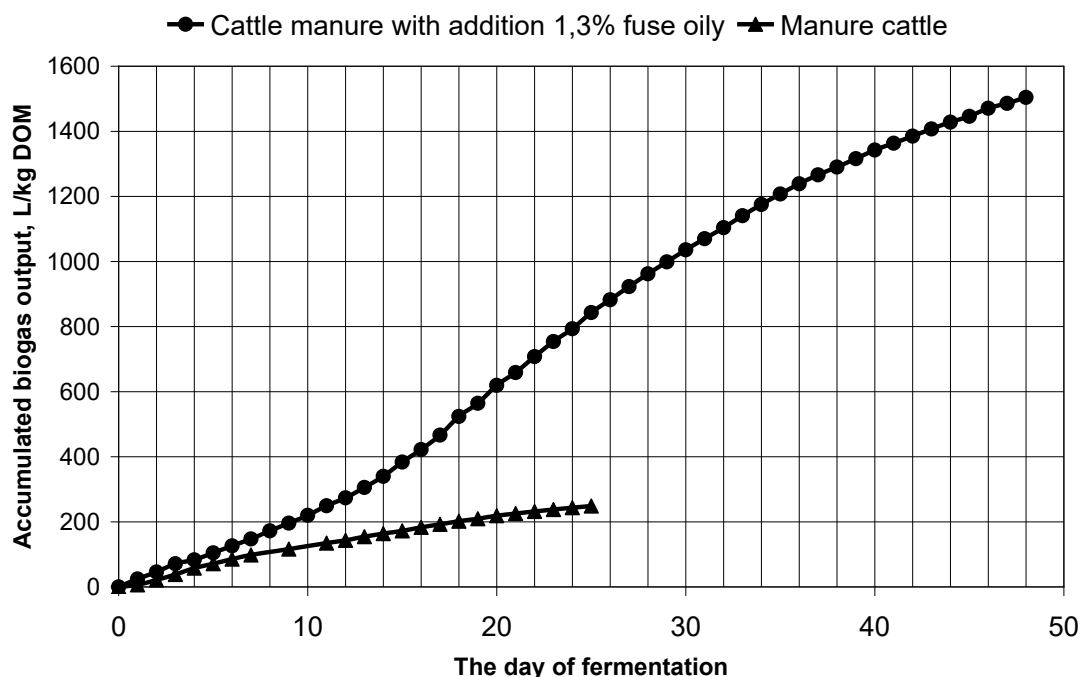


Рис.7. Сравнение кумулятивных выходов биогаза при сбраживании навоза КРС с добавлением фуза и без использования косубстрата при температуре брожения 40°C. ⁹

Таблица 4 ¹⁰

Коэффициенты полинома, описывающего средний кумулятивный выход биогаза при сбраживании навоза КРС с добавлением 1.3% фуза при температуре брожения 40°C

Коэффициенты полинома					R ²
b_4	b_3	b_2	b_1	b_0	
0.00029	-0.0488	2.3136	-0.044	33.8	0,9994

Коэффициент детерминации аппроксимированной кривой уравнение 17 с коэффициентами полинома, приведенные в табл. 5, приближается к единице, что говорит о том, что полученное уравнение регрессии достаточно точно отражает экспериментальные данные.

При проверке по критерию Фишера установлена значимость коэффициента детерминации. Проверка по критерию Стьюдента показала, что все коэффициенты $b_0 - b_3$ полинома уравнение 17, табл. 5, значимые, а коэффициент b_4 ненадежный.

Однако удаление коэффициента b_4 приведет к изменению направления аппроксимированной кривой на конечном промежутке времени брожения, что может дать неверные результаты при дальнейшем прогнозировании.

Новизна работы заключается в том, что по данным экспериментальных исследований выхода биогаза при периодическом режиме

загрузки обеспечивается прогнозирование выхода биогаза для квазинепрерывной загрузки метантенка.

При сбраживании навоза с фермы на 1000 голов КРС (из них 500 дойных коров) суточный выход биогаза составит 10.6 тыс. м³. При этом срок окупаемости биогазовой установки в составе двух метантенков объемом по 2500 м³ (один из которых выступает в роли дображивателя, где вырабатывается до 20% биогаза) при цене электроэнергии, полученной из биогаза по "зеленому" тарифу, 0.145 \$/кВт·час, составляет 10.1 года. При добавление к субстрату на основе навоза КРС фуза из близлежащего завода по переработке масличных семян, суточный выход биогаза увеличится до 31.2 тыс. м³, а срок окупаемости биогазовой установки мощностью 6.7 МВт при использовании «зеленого» тарифа сократится до 5.1 года (рис. 8).

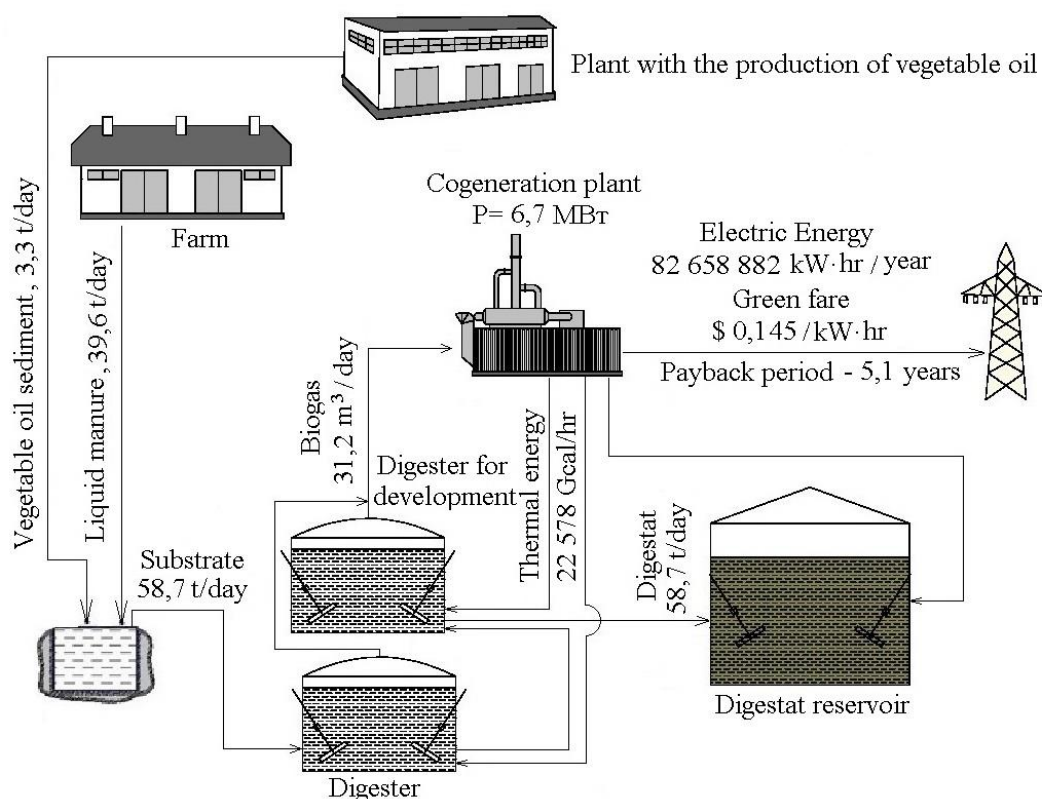


Рис.8. Схема производства биогаза с навоза ВРХ и фуза с выработкой тепловой и электрической энергии. ¹¹

V. ВЫВОДЫ

1. Выход биогаза при сбраживании субстрата на основе навоза КРС зависит от температуры брожения. При увеличении температуры брожения выход биогаза увеличивается. Так, за 14 суток брожения средний кумулятивный выход биогаза при температуре брожения 55°C составляет 336 л/кг СОВ, при температуре брожения 50°C – 283 л/кг СОВ, 45°C – 257 л/кг СОВ, 40°C – 184 л/кг СОВ.

2. При сбраживании субстрата на основе навоза КРС с добавлением фуза на 11 сутки брожения кумулятивный выход биогаза составляет 273.6 л/кг СОВ, что почти в три раза больше, чем при сбраживании навоза КРС без добавления косубстрата (99.2 л/кг СОВ). На 48 сутки брожения кумулятивный выход биогаза при сбраживании навоза КРС с добавлением фуза доходит до 1504.1 л/кг СОВ. Максимальный выход биогаза при периодическом режиме загрузки метантенка наступает на 20 сутки брожения, тогда как при моносбраживании навоза КРС – на 3-8 сутки.

3. Прогнозируемый выход биогаза при квазинепрерывной загрузке метантенка по результатам экспериментальных исследований

выхода биогаза при периодическом режиме загрузки при добавлении к навозу КРС 1.3% фуза может вырасти до 2.073 л/(час·кг СОВ). Использование фуза в качестве косубстрата позволит почти в три раза увеличить выход биогаза и выработку электроэнергии.

4. При реализации нового методического подхода к прогнозированию выхода биогаза результаты расчетов показывают, что в ходе сбраживания навоза КРС с добавлением фуза суточный выход биогаза с фермы на 1000 голов КРС увеличивается до 31.2 тыс. м³, а срок окупаемости биогазовой установки при использовании "зеленого" тарифа сократится до 5.1 года.

Appendix 1

¹Fig. 1. Laboratory biogas plant.

²Fig. 2. Dynamics of biogas output during the fermentation of cattle manure for various temperature regimes of the digester: 1 – first repetition; 2 – second repeat; 3 – third repeat.

³Fig. 3. Scheme of biogas yield modeling with gradual (continuous) loading of the digester based on biogas yield data with periodic loading of the digester, the modified image from [22, Fig. 2.5].

⁴Fig. 4. Simulated biogas output during the fermentation of cattle manure for a quasicontinuous digester loading system.

⁷**Fig. 5.** The average accumulated yield of biogas during the fermentation of cattle manure.

⁹**Fig. 6.** Dynamics of biogas output during the fermentation of cattle manure with the addition of vegetable oil sediment at a fermentation temperature of 40°C.

¹⁰**Fig. 7.** Comparison of the accumulated output of biogas during the fermentation of cattle manure with the addition of vegetable oil sediment and without using co-substrate at a fermentation temperature of 40°C.

¹¹**Fig. 8.** Biogas production scheme in the cattle manure fermentation with the added vegetable oil sediment with the generation of heat and electric energy.

⁹**Table 1.** The maximum yield of biogas.

⁵**Table 2.** Coefficients of a simulation model of biogas output during mono-digestion of cattle manure for various fermentation temperatures.

⁸**Table 3.** The coefficients of the polynomial describing the average accumulated output of biogas during the fermentation of cattle manure.

¹⁰**Table 4.** Polynomial coefficients describing the average accumulated output of biogas during the fermentation of a mixture of cattle manure with the addition of 1.3% vegetable oil sediment to the contents of the substrate at a fermentation temperature of 40°C.

References

- [1] Lijo L., Gonzalez-Garcia S., Bacenetti J., Moreira M.T. The environmental effect of substituting energy crops for food waste as feedstock for biogasproduction. *Energy*, 2017, vol. 137. pp. 1130-1143. doi: 10.1016/j.energy.2017.04.137.
- [2] Bilandzija N., Voca N., Kricka T., Jurisic V., Matin A. Biogas production on dairy farms: A Croatia case study. *Mljekarstvo*, 2013, vol. 63, no. 1. pp. 22-29. (WOS).
- [3] Samuna I., Saeeda R., Abbasa M., Rehanb M., Nizami A.-S., Asam Z.-ul-Z. Assessment of bio-energy production from solid waste. *Energy Procedia*, 2017, vol. 142. pp. 655-660. doi: 10.1016/j.egypro.2017.12.108.
- [4] Rahman K.M., Harder M.K., Woodard R. Energy yield potentials from the anaerobic digestion of common animal manure in Bangladesh. *South African Energy & Environment*, 2018, vol. 29, no. 8. pp. 1338-1353. doi: 10.1177/0958305X18776614.
- [5] Guarino G., Di Cristofaro F., Carotenuto C., Morrone B., Minale M. Effect of thermal and mechanical pre-treatments on the CH₄-H₂ production from water buffalo manure in different process conditions. *Chemical Engineering Transactions*, 2014, vol. 38. pp. 205-210. doi: 10.3303/CET1438035.
- [6] Ren Z.Z., Ning P., Jia L.J., Qu G.F., Xiong X.F., Feng H., Zhou C. Biogas production from cow manure in an experimental 20 m³ reactor with a jet mixing system. *Advanced Materials Research*, 2012, vol. 518-523. pp. 3290-3294. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.518-523.3290.
- [7] Xiong X.F., Jia L.J., Ning P., Qu G.F., Zhou C. (2015). Jet mixing improving biogas production performance of mesophilic anaerobic fermentation with cow manure. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, vol. 31. pp. 222-227. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.19.031.
- [8] Sumardiono S., Matin H.H.A., Widiasta I.N., Budiyono B. Optimization of total solid (TS), temperature, and rumen fluid content during biogas production from cattle manure using response surface methodology. *Advanced Science Letters*, 2018, vol. 24, no. 12. pp. 9791-9793. doi: 10.1166/asl.2018.13142.
- [9] Hupfauf S., Plattner P., Wagner A.O., Kaufmann R., Insam H., Podmirseg S.M. Temperature shapes the microbiota in anaerobic digestion and drives efficiency to a maximum at 45 degrees C. *Bioresource Technology*, 2018, vol. 269. pp. 309-318. doi: 10.1016/j.biortech.2018.08.106.
- [10] Yu D., Kurola J.M., Lahde K., Kymalainen M., Sinkkonen A., Romantschuk M. Biogas production and methanogenic archaeal community in mesophilic and thermophilic anaerobic co-digestion processes. *Journal of Environmental Management*, 2014, vol. 143. pp. 54-60. doi: 10.1016/j.jenvman.2014.04.025.
- [11] Kerroum D., Mossaab B.L.Hassen M.A. Production of bio-energy from organic waste: effect of temperature and substrate composition. *International Journal of Energy Research*, 2014, vol. 38, no. 2. pp. 270-276. doi: 10.1002/er.3044.
- [12] Hu Y., Kobayashi T., Qi W.K., Oshibe H., Xu K.-Q. Effect of temperature and organic loading rate on siphon-driven self-agitated anaerobic digestion performance for food waste treatment. *Waste Management*, 2018, vol. 74. pp. 150-157. doi: 10.1016/j.wasman.2017.12.016.
- [13] Orive M., Cebrian M., Zufia J. Techno-economic anaerobic co-digestion feasibility study for two-phase olive oil mill pomace and pig slurry. *Renewable Energy*, 2016, vol. 97. pp. 532-540. doi: 10.17159/sajs.2016/20160013.
- [14] Grosser A., Worwag M., Neczaj E., Grobelak A. Semi-continuous anaerobic co-digestion of mixed sewage sludge and waste fats of vegetable origin. *Rocznik Ochrona Srodowiska*, 2013, vol. 15. no. 3. 2108-2125. (WOS).

- [15] Kurade M.B., Saha S., Salama E., Patil S.M., Govindwar S.P., Jeon B.H., Acetoclastic methanogenesis led by Methanosarcina in anaerobic co-digestion of fats, oil and grease for enhanced production of methane. *Bioresource Technology*, 2019, vol. 272. pp. 351-359. doi: 10.1016/j.biortech.2018.10.047.
- [16] Awe O.W., Lu J.X., Wu S.B., Zhao Y.Q., Nzihou A., Lyczko N., Minh D.P. Effect of oil content on biogas production, process performance and stability of food waste anaerobic digestion. *Waste And Biomass Valorization*, 2018, vol. 9, no. 12. SI. pp. 2295-2306. doi: 10.1007/s12649-017-0179-4.
- [17] Razaviarani V., Buchanan I.D., Malik S., Katalambula H. Pilot-scale anaerobic co-digestion of municipal wastewater sludge with restaurant grease trap waste. *Journal of Environmental Management*, 2013, vol. 123. pp. 26-33. doi: 10.1016/j.jenvman.2013.03.021.
- [18] Wu L.J., Kobayashi T., Kuramochi H., Li Y.Y., Xu K.Q., Lv Y.K. High loading anaerobic co-digestion of food waste and grease trap waste: Determination of the limit and lipid/long chain fatty acid conversion. *Chemical Engineering Journal*, 2018, vol. 338. pp. 422-431. doi: 10.1016/j.cej.2018.01.041.
- [19] Ohemeng-Ntiamoah J., Datta T. Evaluating analytical methods for the characterization of lipids, proteins and carbohydrates in organic substrates for anaerobic co-digestion. *Bioresource Technology*, 2018, vol. 247. pp. 697-704. doi: 10.1016/j.biortech.2017.09.154.
- [20] Alqaralleh R.M., Kennedy K., Delatolla R., Sartaj M. Thermophilic and hyper-thermophilic co-digestion of waste activated sludge and fat, oil and grease: Evaluating and modeling methane production. *Journal of Environmental Management*, 2016, vol. 183. pp. 551-561. doi: 10.1016/j.jenvman.2016.09.003.
- [21] Hidalgo D., Martin-Marroquin J.M., Sastre E. Single-phase and two-Phase anaerobic co-digestion of residues from the treatment process of waste vegetable oil and pig manure. *Bioenergy Research*, 2014, vol. 7, no. 2. pp. 670-680. doi: 10.1007/s12155-013-9396-2.
- [22] Schulz H. Biogas-Praxis: Grundlagen, Planung, Anlagenbau, Wirtschaftlichkeit, Beispiele, 1996, Freiburg, Germany: Ökobuch, p. 187.

Information about authors.



Polischuk Viktor Nikolaevich. National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Department of Occupational Safety and Environmental Engineering, candidate of technical sciences, associate professor. Main field of research: technologies and technical means of production biofuels. E-mail: polischuk.v.m@gmail.com



Shvorov Sergey Andreevich. National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Department of Automation and Robotic Systems named after academician I.I. Martynenko, doctor of technical sciences, professor. Main field of research: the creation of robotic systems for the collection and processing of organic raw materials. E-mail: sosdok@i.ua



Titova Liudmyla Leonidivna. National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Department of Mechanical and Technology, candidate of technical sciences, associate professor. Main field of research: technologies and technical means of production biofuels. E-mail: L_titova@nubip.edu.ua



Gunchenko Yuriy Alexandrovich. Odessa I.I. Mechnikov National University, Department of Mathematical Support of Computer Systems, Department of the system software and technologies of distance learning, doctor of technical sciences, professor. Main field of research: AC and DC power systems, specialized and unconventional computing systems, low-level microcontroller programming. E-mail: gunchenko@onu.edu.ua