

Increase of the Biogas Output during Fermentation of Manure of Cattle with Winemaking Waste in Biogas Plants

¹Polishchuk V.M., ¹Shvorov S.A., ²Krusir G.V., ¹Davidenko T.S.

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

² Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa, Ukraine

Abstract. The aim of the work is to increase biogas output and generation of electricity in biogas plants due to the joint fermentation of cattle manure with winemaking waste. To achieve this goal, the following tasks have been solved: the biogas yield from cattle manure with winemaking waste was determined during periodic loading of the digester; based on the obtained experimental data, a mathematical model was calibrated to estimate the biogas yield during fermentation of cattle manure with the addition of winemaking waste. Because of the studies, it had been found that when manure was fermented with part of the water replaced in the substrate 2% of the winemaking waste, the fermentation dynamics in the substrate are similar to the fermentation of pure cattle manure. Biogas obtained by fermentation of manure with the addition of 2%, 6.5% and 13% of wastewater from wine production instead of water in the first day of fermentation either did not burn at all or burned poorly. The addition of winemaking waste to a substrate based on manure in an amount of 13% allows increasing the maximum biogas yield by a third to 1,372 l/(hr·kg dry organic matter). The significance of the research results lies in the fact that the use of winemaking waste as a substrate will allow a third increase in biogas output and power generation, and a reduction in the payback period of a 4,4 MW biogas plant using the green tariff to 6,5 years.

Keywords: biogas, substrate, cattle manure, winemaking waste, dry organic matter, digester, biogas plant, methane fermentation.

DOI: 10.5281/zenodo.3898326

UDC: 662.763.3.2

Creșterea producției de biogaz și electricitate din fermentația gunoiului de grajd bovine cu deșeurii de vinificație în uzine de biogaz

¹Polishchuk V.M., ¹Shvorov S.A., ²Krusir G.V., ¹Davidenko D.S.

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

²Academia Națională de Tehnologii Alimentare din Odessa, Odessa, Ucraina

Rezumat. Obiectivul lucrării este orientat spre majorarea producției de biogaz și generarea de electricitate în instalațiile de biogaz, datorită fermentației comune a gunoiului de grajd cu deșeurile de vinificație. Pentru atingerea acestui obiectiv, s-au rezolvat următoarele probleme: a fost determinat randamentul de producere a biogazului din gunoiul de grajd a vitelor cu suplamente a deșeurilor vinificației în timpul încărcării periodice a digesterului; pe baza datelor experimentale obținute, un model matematic a fost calibrat pentru a estima randamentul de biogaz în timpul fermentației gunoiului de vacă cu adăugarea deșeurilor de vinificație; folosind un model matematic calibrat, randamentul biogazului a fost prevăzut pentru încărcarea cvasi-continuă a digesterului. Studiile au fost efectuate pe o instalații de biogaz de laborator, formată dintr-un rezervor de metan cu un volum util de 30 l și un rezervor de gaz umed. Producția de biogaz a fost înregistrată prin ridicarea cilindrului de ecartament al rezervorului de gaz umed folosind o scală fixată pe acesta, calibrată în centimetri. Valoarea calorică a biogazului a fost determinată de compoziția sa elementară, care a fost înregistrată de un analizator de gaze. Cele mai importante rezultate sunt următoarele: conform studiilor experimentale ale producției de biogaz în regim de încărcare periodică folosind modelul matematic dezvoltat, randamentul biogazului este prevăzut pentru încărcarea cvasi-continuă a digesterului. Ca urmare a studiilor, s-a constatat că randamentul maxim de biogaz la 2% schimbare de apă pentru VCM în substrat este de 0,415 l / (părți per kg substanței organice uscate (SOU), 6,5% - 0,862 l / (părți per kg SOU), 13% - 1,372 l / (h. kg de SOU).

Cuvinte-cheie: biogaz, substrat, gunoi de grajd, deșeurii de vinificație, materie organică uscată, digester, uzină de biogaz, fermentație de metan.

Повышение выхода биогаза и электроэнергии при сбраживании навоза крупного рогатого скота с отходами виноделия в биогазовых установках

¹Полищук В. М., ¹Шворов С. А., ²Крусир Г. В., ¹Давиденко Д. С.

¹ Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, Киев, Украина

² Одесская национальная академия пищевых технологий, Одесса, Украина

Аннотация. Целью работы является повышение выхода биогаза и выработки электроэнергии на биогазовых установках за счет совместного сбраживания навоза крупного рогатого скота с отходами виноделия. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи: определялся выход биогаза из навоза крупного рогатого скота с отходами виноделия при периодической загрузке метантенка; на основе полученных экспериментальных данных осуществлялась калибровка математической модели оценки выхода биогаза при сбраживании навоза крупного рогатого скота с добавлением отходов виноделия; с помощью откалиброванной 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. 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 разработанной математической модели обеспечивается прогнозирование выхода биогаза для квазинепрерывной загрузки метантенка. В результате проведенных исследований установлено, что максимальный выход биогаза при 2% замене воды на СВВП в субстрате составляет 0,415 л/(ч·кг СОВ (сухого остатка вещества)), 6,5% – 0,862 л/(ч·кг СОВ), 13% – 1,372 л/(ч·кг СОВ). Значимость результатов исследований состоит в том, что использование отходов виноделия в качестве косубстрата позволит увеличить в хозяйстве с поголовьем 1000 голов КРС суточный выход биогаза до 20,5 тыс. м³, годовое производство электроэнергии – до 54,7 млн. МДж (15,2 млн. кВт·ч.), тепловой энергии – до 14,79 тыс. Гкал. При этом срок окупаемости биогазовой установки мощностью 4,4 МВт при использовании «зеленого» тарифа сократится до 6,5 года.

Ключевые слова: биогаз, субстрат, навоз крупного рогатого скота, отходы виноделия, сухое органическое вещество, метантенк, биогазовая установка, метановое брожение.

LIST OF ABBREVIATIONS

КРС – крупный рогатый скот; ЛЖК – летучие жирные кислоты; СВ – сухое вещество; СВВП – сточные воды винодельческих производств; СОВ – сухое органическое вещество; ХПК – химическое потребление кислорода; БПК – биохимическое потребление кислорода; VS – летучее твердое вещество, КРС – крупный рогатый скот.

Введение

Как известно, навоз КРС 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 сбраживании с помощью биогазовых установок относительно низкий. Поэтому актуальной задачей является повышение выхода биогаза из навоза КРС за счет использования различных стимулирующих добавок. Если же такая 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 сбраживание навоза КРС с силосом кукурузы. Вместе с тем, данное сырье можно использовать в качестве корма для животных и продуктов питания для человека. Поэтому для повышения выхода биогаза из навоза КРС целесообразно использовать более дешевое сырье, стимулирующее выход биогаза – отходы производств, которые необходимо утилизировать с минимальными затратами, улучшая при этом экологию.

Целью работы является повышение выхода биогаза и выработки электроэнергии из навоза КРС за счет добавления стимулирующей добавки в виде отходов виноделия.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

– определить выход биогаза из навоза КРС с добавлением отходов виноделия с периодической загрузкой метантенка;

– оценить выход биогаза при сбраживании навоза КРС с добавлением отходов виноделия;

– с помощью математической модели спрогнозировать выход биогаза и выработку электроэнергии для квазинепрерывной загрузки метантенка.

II. АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Как показано в работе [1] выход биогаза при сбраживании кукурузного силоса ($650 \text{ м}^3/\text{кг} \cdot \text{VS}$) или пищевых отходов ($660 \text{ м}^3/\text{кг} \cdot \text{VS}$) значительно выше, чем из навоза животных ($450 \text{ м}^3/\text{кг} \cdot \text{VS}$). Сбраживание отходов виноделия с навозом КРС в лабораторном реакторе с фиксированной пленкой при температуре 35°C обеспечивает выход метана 1048 л/кг VS . При этом также фиксировалось увеличение общего выхода метана по сравнению с моносбраживанием навоза КРС [2]. В работе [3] приведены результаты исследования процесса метанового сбраживания отходов производства красных вин с высоким содержанием танина ($2\text{-}3 \text{ г/л}$) и высокими концентрациями сульфатов ($3\text{-}8 \text{ г/л}$). Установлено, что дубильные вещества не тормозят образование кислоты и восстановление сульфата в ацидогенной фазе. Даже при концентрации 800 мг/л в ацидогенном реакторе было деградировано 30% дубильных веществ. Концентрация танинов 500 мг/л в метановом реакторе пропорционально на 20% ограничивала метаногенную биологическую активность.

В работе [4] приведены результаты исследования возможности утилизации сточных вод первичного винодельческого производства путем их метанового сбраживания, что в свою очередь является обоснованием для применения метаногенеза как наиболее эффективного метода очистки высококонцентрированных сточных вод. Влажность сточных вод винодельческих производств с осадком составляет 92% , что является оптимальным значением для эффективного процесса метанового сбраживания. Отношение C:N колеблется от $20:1$ до 100 . Сточные воды винодельческих предприятий первичного виноделия характеризуются слабощелочной средой, значение pH которых составляет $7,4$ с допустимым значением pH среды, при

котором процесс метанообразования протекает стабильно, в пределах $6,5\text{-}7,5$.

Результаты проведенных исследований, приведенных в работе [4], позволяют сделать вывод о том, что процесс образования биогаза начинается через 22 часов после загрузки субстрата и по мере увеличения выхода биогаза увеличивается и содержание в нем метана. Максимальный выход биогаза наблюдался на 21 сутки брожения и составил $5,65 \text{ дм}^3/\text{сутки}$ при содержании метана 67% . В работе [5] приведен усредненный состав сточных вод винодельческих предприятий. Сточные воды основного производства заводов первичного виноделия имеют следующие показатели: $\text{ХПК} = 380\text{-}6400 \text{ мг O}_2/\text{дм}^3$, $\text{БПК} = 300\text{-}4300 \text{ мг O}_2/\text{дм}^3$, $\text{pH} = 4,7\text{-}7,5$, цеха утилизации: $\text{ХПК} = 4000\text{-}30000 \text{ мг O}_2/\text{дм}^3$, $\text{БПК} = 2800\text{-}23000 \text{ мг O}_2/\text{дм}^3$, $\text{pH} = 4,4\text{-}6,0$, заводов вторичного виноделия: $\text{ХПК} = 80\text{-}1000 \text{ мг O}_2/\text{дм}^3$, $\text{БПК} = 40\text{-}900 \text{ мг O}_2/\text{дм}^3$, $\text{pH} = 7,2\text{-}9,6$. Как указано в [5], использование современных метантенков дает возможность поддерживать высокую концентрацию биомассы в зоне брожения ($60\text{-}80 \text{ г/дм}^3$), повысить нагрузку до $17\text{-}18 \text{ кг ХПК O}_2/\text{м}^3$ метантенка и сократить продолжительность очистки до $1,5\text{-}2$ суток.

В работе [6] высокий выход биогаза из отходов виноделия составил $855,5 \text{ л/кг VS}$ ($774,5 \text{ л/кг СВ}$), в [7] – от 400 до 600 л/кг ХПК , в [8] и [9] – $9 \text{ м}^3 \text{ CH}_4/\text{м}^3$, тогда как в [10] – 172 мл/ч VS , в [11] – $207 \text{ мл CH}_4/\text{ч ХПК}$, а в [12] – $43 \text{ мл CH}_4/\text{ч VS}$. Выход биогаза из стоков банановых вин при загрузке в ферментатор $62,4 \text{ м}^3/\text{сутки}$, согласно [13], составлял $163 \text{ м}^3/\text{сут}$.

Как указано в работе [14], метановое сбраживание стоков заводов по производству соков и вина с измельчением осадка в течение 15 суток позволило получить накопленный выход биогаза около 1600 мл/ч VS , без измельчения – около 800 мл/ч VS .

В работах [15-18] проводилось исследование совместного сбраживания отходов виноделия с активным илом в мезофильных условиях, выход биогаза при этом составил $0,4 \text{ м}^3/\text{кг СОР}$, тогда как в работе [19] при сбраживании в термофильных условиях – $0,64 \text{ л/ч VS}$ (для сравнения, при сбраживании только активного ила выход биогаза составил $0,38 \text{ л/ч VS}$), а при обработке ультразвуком – $1,411 \text{ л/ч VS}$ [20]. Авторы рекомендуют для термофильного сбраживания на одну часть активного ила

добавлять три части винных стоков.

Представленные результаты исследований в [21] показывают, что в процессе виноделия помимо сточных вод образуется много побочных продуктов, в основном виноградных косточек, виноградных стеблей и винных осадков. Анаэробное сбраживание особенно подходит для обработки отходов виноделия благодаря высокому содержанию богатых питательными веществами органических веществ и значительному энергетическому потенциалу. В работе показано, что на сегодняшний день широко представлены только результаты мезофильных тестов. В этом исследовании потенциальная продукция метана и кинетические константы были определены с помощью периодических испытаний в термофильных условиях и сопоставлены с мезофильными значениями, уже известными в литературе. Показано, что из виноградных отходов, произведенных в Италии (808 тысяч тонн в год) по итальянскому сценарию может быть произведено около 245 ГВт·ч. тепловой и 201 ГВт·ч. электрической энергии в год.

В исследовании [22] приведена оценка выработки биогаза и метана из выжимки винограда (сорт Каберне Фран). Были определены физические и химические характеристики сырья, а структурные полисахариды идентифицированы и проанализированы методом Ван-Соеста. Для оценки производства метана из выжимки винограда, мякоти и семян проведены периодические анаэробные сбраживания. При этом оценено влияние измельчения биомассы путем механической предварительной ее обработки на метановый потенциал. Показано, что предварительная обработка биомассы увеличивает анаэробную биоразлагаемость для выжимки, мякоти и семян винограда на 13,1%, 4,8% и 22,2% соответственно.

В работе [23] представлены результаты экспериментов, на лабораторных установках для оценки выхода биогаза и метана, полученных в результате анаэробного сбраживания свежих виноградных отходов. Результаты экспериментов показывают, что выход метана достигает до 110 м³/т с более высокой производительностью, чем из других видов биомассы. Включение виноградных косточек положительно влияет на выработку биогаза и метана. Кроме того, при

использовании измельченных виноградных отходов может быть достигнут более высокий процент СН₄.

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.

III. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Для проведения исследования использовалась лабораторная биогазовая установка с 30 л метантенком, мокрым газгольдером (рис. 1) и с периодической загрузкой субстрата, при которой метантенк полностью заполняется свежей порцией субстрата, которая удаляется из него лишь после окончания периода метанового брожения. Обогрев метантенка I осуществляется с помощью водяной рубашки с электронагревателем. Загрузка свежего субстрата в нижнюю часть активной зоны метантенка производится через трубку метантенка, что обеспечивает вытеснение отработанного дигестата на уровне границы субстрата и биогаза. При заправке метантенка в нем необходимо сохранить не менее 1/3 отработанного дигестата для неизменности микрофлоры комплекса метанообразующих бактерий. Выход биогаза фиксируется по шкале, отградуированной в сантиметрах. поднятия цилиндра-уровнемера мокрого газгольдера. Биогаз сжигается на газовой плите, нагревая при этом воду в измерителе теплотворности [24].

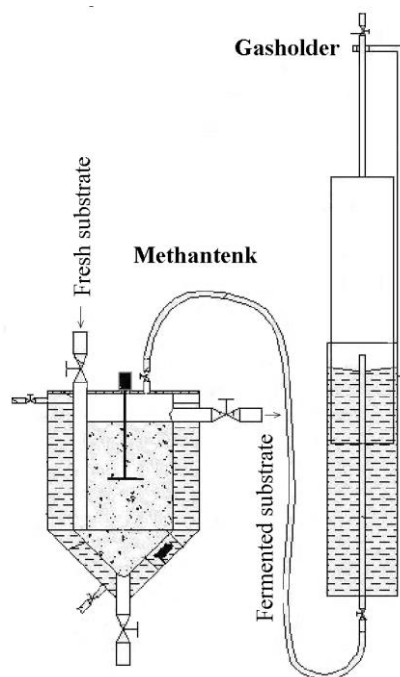


Рис. 1. Лабораторная биогазовая установка. ¹

Для проведения опытов с добавлением СВВП субстрат готовился путем добавления к водопроводной воде измельченных виноградных гребней в соотношении 10:1. В ходе исследований часть воды в субстрате была заменена сточными водами винодельческих производств, как показано в табл. 1.

Таблица 1²

Состав субстрата при исследовании влияния сточных вод винодельческих производств на выход биогаза при метановом сбраживании навоза КРС

Показатель	№ опыта			
	1	2	3	4
Навоз КРС, кг	3	3	3	3
Влага, кг, в которой:	4,5	4,5	4,5	4,5
Вода, кг	4,5	4,35	4	3,5
СВВП, кг	0	0,15	0,5	1
%	0	2	6,5	13
Содержание СОВ в субстрате, кг	0,46	0,40	0,41	0,42
%	5,44	5,34	5,47	5,65
Относительная влажность субстрата, %	93,40	93,5	93,4	93,2

Средний измеренный pH субстрата при содержании в нем 2% СВВП составил 7,86, при содержании 6,5% СВВП – 7,4, при

содержании 13% СВВП – 7,38.

Метантенк загружался субстратом наполовину (коэффициент загрузки – 0,5). При добавлении новой порции субстрата перебродивший субстрат менялся наполовину (коэффициент опорожнения – 0,5). То есть, при новой загрузке в метантенк добавлялось 7,5 кг субстрата. В качестве субстрата использовался навоз КРС (твердая фракция), собранный на пастбище, с его относительной влажностью 84%. В метантенк загружалось 3 кг навоза, разбавленного 4,5 кг жидкости (воды или ее смеси с СВВП).

Температура брожения составляла 40°C.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование выхода биогаза при сбраживании навоза КРС с добавлением СВВП. На рис. 2 представлены результаты исследований, из которых видно, что при сбраживании навоза КРС и заменой части воды в субстрате 2% СВВП, в субстрате динамика сбраживания аналогична сбраживанию чистого навоза КРС [24]. В этом случае выход биогаза постепенно растет во времени, а потом так же постепенно спадает.

Увеличение содержания СВВП в субстрате до 6,5% и более несколько меняет динамику сбраживания субстрата.

Выход биогаза со временем резко возрастает, а после достижения максимума

так же резко падает.

При незначительном содержании СВВП в субстрате наблюдается диауксия, которая четко выражена, тогда как при увеличении

содержания стоков в субстрате становится едва заметной.

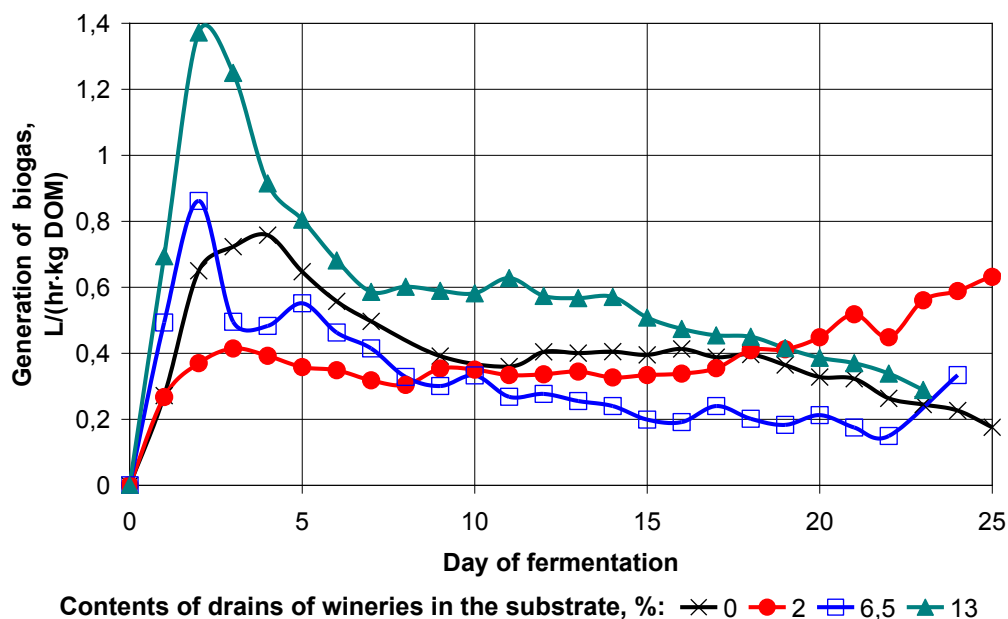


Рис. 2. Динамика выхода биогаза при сбраживании навоза крупного рогатого скота с добавлением сточных вод винодельческих производств при температуре брожения 40°C.³

Из рис. 2 установлено, что максимальный выход биогаза при 2% замене воды на СВВП в субстрате составляет 0,415 л/(ч·кг СОВ), 6,5% – 0,862 л/(ч·кг СОВ), 13% – 1,372 л/(ч·кг СОВ).

Биогаз, полученный при сбраживании навоза КРС с добавлением вместо воды сточных вод винодельческих производств 2%, 6,5% и 13%, в первые сутки брожения или совсем не горел, или плохо горел, выделяя около 8 МДж/м³ биогаза по экспресс-методу [25]. На вторые сутки метанового брожения горение биогаза стабилизировалось с теплотой сгорания 14-18 МДж/м³ по экспресс-методу.

С помощью газоанализатора GEM-500 определялся элементный состав биогаза при различных уровнях цилиндра-уровнемера. В случае нахождения цилиндра-уровнемера на отметке 12,5 см содержание метана в биогазе составляло 62%, а теплота сгорания биогаза составляла 22,1 МДж/м³. В остальных случаях биогаз для замера его элементного состава отбирался из газгольдера при опускании цилиндра-уровнемера к уровням 19,5 см, 15 см, 12 см, 10 см, 7 см, 5 см, 3 см. При этом содержание метана в биогазе составляло 52 %, 55%, 65%, 66%, 68%, 66% и

66% соответственно.

Таким образом, СВВП целесообразно использовать для частичной замены воды при приготовлении субстратов для производства биогаза. В результате проведенных исследований установлено, что максимальный выход биогаза регистрировался при концентрации 13% СВВП. Меньшее содержание СВВП в субстрате существенно не улучшает выход биогаза по сравнению с использованием для приготовления субстрата обычной воды.

Моделирование выхода биогаза при постепенной загрузке метантенка на основе результатов экспериментальных исследований выхода биогаза при периодической загрузке метантенка. Метантенк биогазовой установки, на котором проводились экспериментальные исследования сбраживания субстратов на основе навоза КРС с добавлением СВВП, предназначен для периодической загрузки субстрата. Режим квазинепрерывной загрузки субстрата, когда он загружается малыми порциями через определенный промежуток времени, как правило, около 1 часа, на этом метантенке осуществить достаточно сложно.

Вместе с тем, на практике на действующих

³ Appendix 1

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 при периодической системе загрузки и держится на таком уровне в течение всего времени работы биогазовой установки. Поэтому, используя результаты опытов при периодической системе загрузки метантенка, можно смоделировать выход биогаза при квазинепрерывной системе загрузки. На основе данных, приведенных в работе [26], и собственных исследований [24] можно утверждать, что выход биогаза при квазинепрерывной системе загрузки будет близок к максимальному выходу биогаза при периодической системе загрузки метантенка

Рассмотрим математическую модель функционирования метантенка биогазовой установки, состоящей из системы дифференциальных уравнений, в которой рост популяции метанобразующих бактерий описывается уравнением Моно с учетом процесса отмирания, что задается уравнением Колпикова, а скорость образования биогаза – прямо пропорциональна концентрации бактерий. Модель концентрации питательных веществ субстрата учитывает изменение концентрации питательных веществ субстрата во времени, загруженных с субстратом в метантенк, а также выгруженных из него, переработанных бактериями и использованных для формирования их клеточной биомассы, на производство энергии для поддержания их жизнедеятельности и выработки биогаза:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dC}{dt} = \left(\frac{\mu_m \cdot S}{k_a + S} - \frac{\mu_d \cdot k_b}{k_b + S} - p \right) \cdot C \\ \frac{dS}{dt} = p \cdot (S_0 - S) - \left(k_\alpha \cdot \mu_m \cdot C + \frac{k_\beta \cdot S \cdot \mu_m}{k_a + S} \cdot C + k \cdot \rho_b \cdot \rho_c \cdot \frac{dV_0}{dt} \right), \\ \frac{dV_0}{dt} = \frac{K_\gamma \cdot S}{\rho_c} \end{array} \right. \quad (1)$$

где C – концентрация бактерий, кг/м³; S – концентрация питательных веществ в субстрате, кг/м³; dV/dt – динамика выхода биогаза, м³/(кг·сут.); p – коэффициент разбавления культуры потоком свежего субстрата, сут.⁻¹; k – коэффициент преобразования питательных веществ субстрата в биогаз, кг/кг; ρ_b, ρ_c – плотность биогаза и субстрата, кг/м³; k_α, k_β – безразмерные коэффициенты усвоения субстрата; k_a – константа, равная такой концентрации питательных веществ субстрата, при которой скорость роста достигает половины предельной, кг/м³; k_b – эмпирический коэффициент, кг/м³; μ_d – максимальная удельная скорость отмирания метанобразующих бактерий, сут.⁻¹; μ_m – максимальная удельная скорость роста метановых бактерий, сутки⁻¹; K_γ – коэффициент скорости преобразования питательных веществ субстрата в биогаз, м³/(кг·сут.); t – время (сут.).

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 навоза КРС и 5 кг воды; следовательно,

$$S_0 = 3,5 / (30 \cdot 1000) = 115 \text{ кг/м}^3;$$

– начальный выход биогаза $V_0 = 0 \text{ м}^3/\text{м}^3$.

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 $p=0 \text{ сут.}^{-1}$, а для квазинепрерывного режима – $p>0 \text{ сут.}^{-1}$.

При квазинепрерывной загрузке относительная скорость поступления субстрата p может быть определена как величина, обратная времени гидравлического содержания: $p=1/t_{rc}$. На работающих биогазовых установках t_{rc} близок к 20 суткам, поэтому $p = 0,05 \text{ сут.}^{-1}$ [27].

Параметры $\mu_m, \mu_d, k_a, k_b, k_\alpha, k_\beta, K_\gamma$ зависят от температурного режима метантенка и типа косубстрата. Плотность биогаза составляет $1,212 \text{ кг/м}^3$. Плотность субстрата составляет $\rho_s=1010 \text{ кг/м}^3$.

В пакете Simulink, интегрированного в программу MATLAB, было проведено имитационное моделирование процесса сбраживания навоза крупного рогатого скота с добавлением сточных вод винодельческих производств. В результате получена

динамика выхода биогаза как показано на рис. 3.

Кроме того, осуществлялось сравнение результатов имитационного моделирования динамики выхода биогаза с результатами экспериментальных исследований. Путем подбора параметров $\mu_m, \mu_d, k_a, k_b, k_\alpha, k_\beta, K_\gamma$ добивались того, чтобы имитированная модель, представленная в осциллографе Scope пакета Simulink, была наиболее близкой к зависимости выхода биогаза во времени, полученной экспериментальным путем (см. рис. 2).

Выход биогаза измерялся в $\text{м}^3/\text{кг}$, поскольку при проведении экспериментальных исследований выход биогаза определялся из 1 кг субстрата.

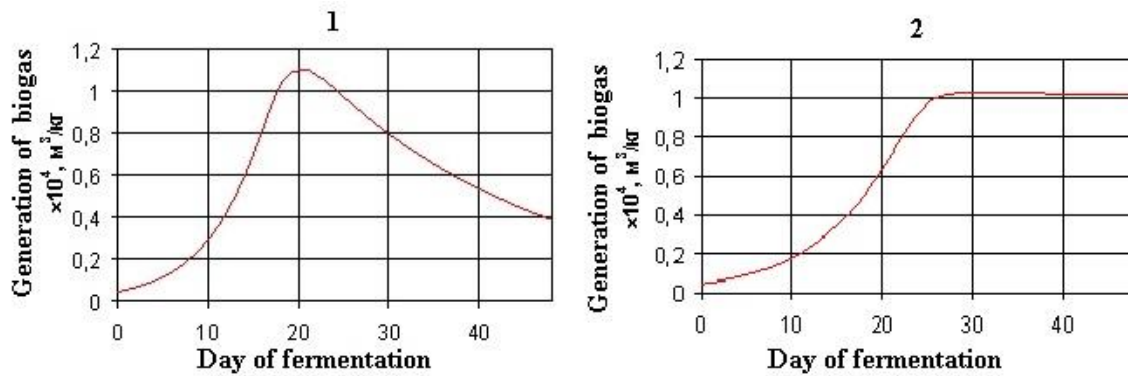


Рис. 3. Динамика выхода биогаза, полученная в результате моделирования процесса сбраживания навоза крупного рогатого скота с добавлением сточных вод винодельческих производств: 1 – при периодической загрузке субстрата; 2 – при квазинепрерывной загрузке субстрата.⁴

Степень приближения результатов имитационного моделирования генерации биогаза к выходу биогаза, полученного экспериментальным путем, оценивалась коэффициентом детерминации.

Коэффициенты имитационной модели выхода биогаза при сбраживании навоза КРС с добавлением СВВП с различным их содержанием в субстрате при температуре брожения 40°C приведены в табл. 2.

Таблица 2⁵

Коэффициенты имитационной модели выхода биогаза при сбраживании навоза крупного рогатого скота с добавлением сточных вод винодельческих производств с различным их содержанием в субстрате при температуре брожения 40°C

Содержание СВВП, %	$\mu_m, \text{сутки}^{-1}$	$\mu_d, \text{сутки}^{-1}$	$K_\gamma, \text{м}^3/(\text{кг}\cdot\text{сутки})$	R^2
2,0	2,4	0,085	0,00000093	0,9041
6,5	2,1	0,09	0,00000195	0,9083
13	2,0	0,095	0,00000313	0,9382

При имитационном моделировании принималось, что $k_\alpha=10^{-9}, k_\beta=5, k_a=14 \text{ кг/м}^3$,

^{4,5} Appendix 1

$k_b=0,01$ кг/м³.

Коэффициенты μ_m , μ_d и K_γ определялись путем подбора и сравнения данных имитационного моделирования с экспериментальными данными до получения самого низкого возможного коэффициента

$$\mu_m = 0,2414 \cdot \ln(Wd) + 0,5514 \text{ при } R^2=0,9863, \quad (2)$$

$$\mu_d = -1,58 \cdot 10^{-3} \cdot Wd^2 + 3,15 \cdot 10^{-2} \cdot Wh - 4,82 \cdot 10^{-2} \text{ при } R^2=0,9999, \quad (3)$$

$$K_\gamma = -4,1 \cdot 10^{-9} \cdot Wd^2 + 2,62 \cdot 10^{-7} \cdot Wh + 4,23 \cdot 10^{-7} \text{ при } R^2=1,0, \quad (4)$$

где Wd – содержание СВВП в субстрате, %.

Поскольку коэффициенты детерминации имитационной модели выхода биогаза при сбраживании навоза КРС с добавлением СВВП, 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 с СВВП для квазинепрерывной системы загрузки метантенка аппроксимируется степенной функцией:

$$V_{б\text{ мод}} = 0,266 \cdot Wd^{0,64} \text{ при } R^2=0,9992, \quad (5)$$

где $V_{б\text{ мод}}$ – смоделированный выход биогаза для квазинепрерывной системы загрузки метантенка, л/кг СОР; Wd – содержание в субстрате стоков винодельческих производств, %.

Новизна работы заключается в том, что по данным экспериментальных исследований выхода биогаза при периодическом режиме загрузки с помощью разработанной математической модели, реализованной в пакете Simulink, 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 мощностью 2,3 МВт 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, 0,157 \$/кВт·час, составляет 10,1 года. Годовое

детерминации R^2 .

Коэффициент μ_m , в табл. 2 может быть описан логарифмической функцией, а коэффициенты μ_d и K_γ – полиномом Ньютона второго порядка:

производство электроэнергии при сжигании биогаза на когенерационной установку составляет 27,9 млн. МДж (7,8 млн. кВт·ч.). При этом также производится 7,7 тыс. Гкал тепловой энергии, которую кроме поддержания теплового баланса метантенков можно использовать для бытовых нужд.

При утилизации отходов винодельческих производств путем их метанового сбраживания совместно с навозом КРС с фермы на 1000 голов суточный выход биогаза увеличится до 20,5 тыс. м³. Годовое производство электроэнергии увеличится до 54,7 млн. МДж (15,2 млн. кВт·ч.), тепловой энергии – до 14,79 тыс. Гкал. При этом срок окупаемости биогазовой установки мощностью 4,4 МВт при использовании «зеленого» тарифа сократится до 6,5 года (рис. 4).

V. ВЫВОДЫ

1. В результате проведенных исследований установлено, что при сбраживании навоза СВВП максимальный выход биогаза при 2% замене воды на СВВП в субстрате составляет 0,415 л/(ч·кг СОВ), 6,5% – 0,862 л/(ч·кг СОВ), 13% – 1,372 л/(ч·кг СОВ).

2. Прогнозируемый выход биогаза, полученный с помощью разработанной математической модели, реализованной в пакете Simulink при квазинепрерывной загрузке метантенка, и результаты экспериментальных исследований выхода биогаза при периодическом режиме загрузки с добавлением к навозу КРС 13% отходов виноделия в пиковых точках полностью совпадают.

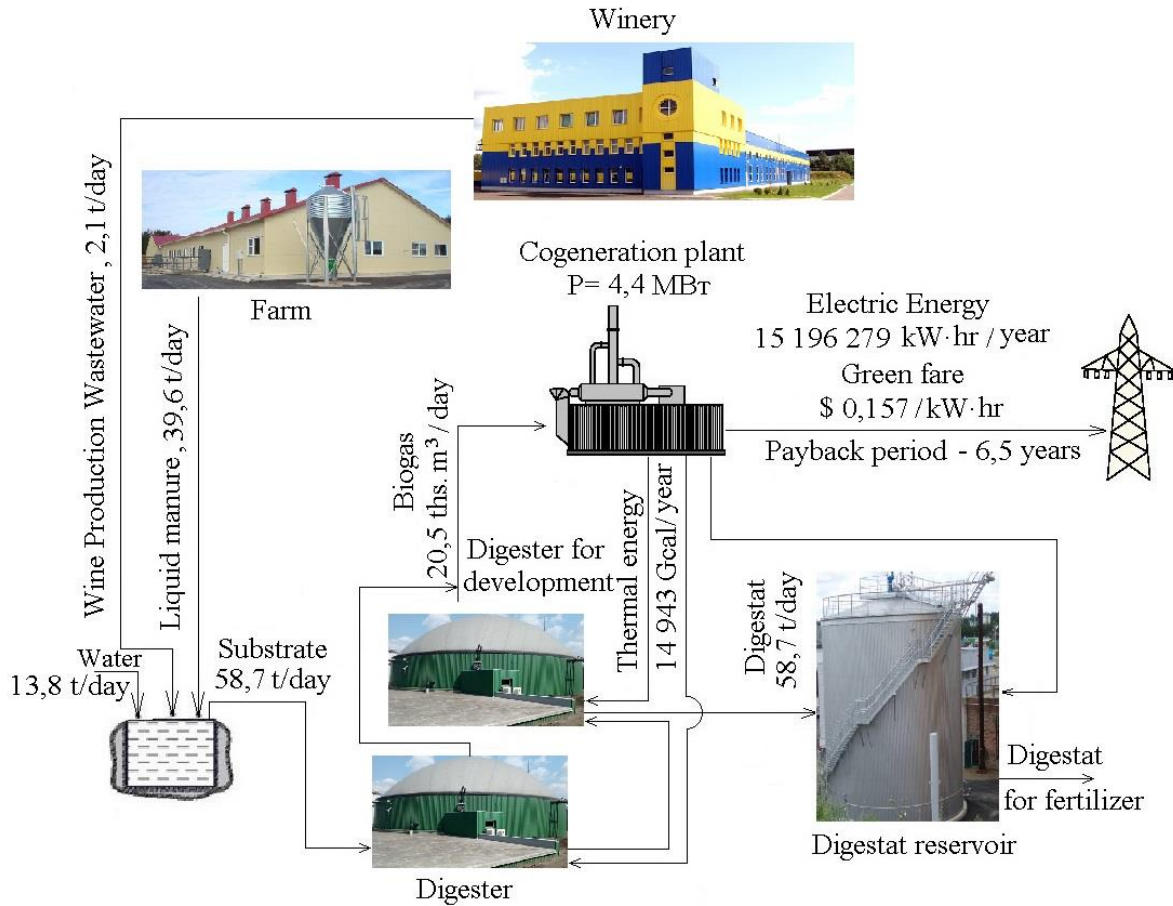


Рис. 4. Схема производства биогаза с навоза крупного рогатого скота и сточных вод винодельческих производств с выработкой тепловой и электрической энергии.⁶

3. При реализации нового методического подхода к прогнозированию выхода биогаза результаты расчетов показывают, что использование отходов виноделия в качестве ко субстрата позволит увеличить на биогазовой установке в хозяйстве с поголовьем 1000 голов КРС суточный выход биогаза до 20,5 тыс. м³, годовое производство электроэнергии – до 54,7 млн. МДж (15,2 млн. кВт·ч.), тепловой энергии – до 14,79 тыс. Гкал. При этом срок окупаемости биогазовой установки мощностью 4,4 МВт при использовании "зеленого" тарифа снизится до 6,5 лет.

Appendix 1

¹Fig. 1. Laboratory biogas plant.

³Fig. 2. Dynamics of biogas output during fermentation of cattle manure with the addition of wastewater from wineries at a fermentation temperature of 40°C.

⁴Fig. 3. Dynamics of biogas output obtained as a result of modeling the functioning of the digester of a biogas plant during fermentation of cattle manure with the addition of wastewater from wineries: 1 –

with periodic loading of the substrate; 2 – with quasi-continuous substrate loading.

⁶Fig. 4. Diagram of biogas production from cattle manure and wastewater from wineries with the generation of heat and electricity.

²Table 1. The composition of the substrate in the study of the influence of wastewater from wineries on the biogas yield in methane digestion of cattle manure.

⁵Table 2. The coefficients of the simulation model of biogas output during fermentation of cattle manure with the addition of wastewater from wineries with different contents in 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] Lo K.V., Liao P.H. Methane production from fermentation of winery waste. *Biomass*. 1986, Vol. 9, no. 1. pp. 19–27. doi: doi.org/10.1016/0144-4565(86)90009-0.

- [3] Ehlinger F., Gueler I., Bal, F.X., Prevot C. Treatment of lees vinasses of red wine by methanogenic fermentation in presence of tannins and sulphides. *Water Science & Technology*. 1992, Vol. 25, no. 7. pp. 275–284. doi: doi.org/10.2166/wst.1992.0159.
- [4] Krusir G., Dubrovin V., Polishchuk V., Dubovik A., Sokolova I. Research of metanogenesis waste waters of primary winemaking. *Eastern-European Journal of Enterprice Technologies*. 2014, Vol. 9, no. 10 (70). pp. 43–47. doi: 10.15587/1729-4061.2014.26227.
- [5] Domareckij V., Kuts A., Bilko M., Melnik I. Reception of biogas from waste and waste water wine companies. *Scientific works of the Odessa National Academy of Food Technologies*. 2010, Vol. 2, no. 38. pp. 300–305.
- [6] Jasko J., Skripsts E., Dubrovskis V. Biogas production of winemaking in anaerobic fermentation process. *11th International Scientific Conference on Engineering for Rural Development (May 24-25, 2012, Jelgava, Latvia), Engineering for Rural Development*. 2012, Vol. 11. pp. 576–579.
- [7] Moletta R. Winery and distillery wastewater treatment by anaerobic digestion. *Water Science & Technology*. 2005, Vol. 51, no. 1. pp. 137–144. doi: 10.2166/wst.2005.0017.
- [8] Perez M., Romero L.I., Sales D. Organic matter degradation kinetics in an anaerobic thermophilic fluidised bed bioreactor. *Anaerobe*. 2001, Vol. 7, no. 1. pp. 25–35. doi: 10.1006/anae.2000.1362.
- [9] Perez M., Romero L.I., Sales D. Anaerobic thermophilic fluidized bed treatment of industrial wastewater: Effect of F : M relationship. *Chemosphere*. 1999, Vol. 38, no. 14. pp. 3443–3461. doi: 10.1016/S0045-6535(98)00556-6.
- [10] Akassou M., Kaanane A., Crolla A., Kinsley C. Statistical modelling of the impact of some polypheols on the efficiency of anaerobic digestion and the co-digestion of the wine distillery wastewater with dairy cattle manure and cheese whey. *Water Science And Technology*. 2010, Vol. 62, no. 3. pp. 475–483. doi: 10.2166/wst.2010.235.
- [11] Carrillo-Reyes J., Albarrán-Contreras B.A., Buitron G. Influence of Added Nutrients and Substrate Concentration in Biohydrogen Production from Winery Wastewaters Coupled to Methane Production. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 2019, Vol. 187. pp. 140–151. doi: doi.org/10.1007/s12010-018-2812-5.
- [12] Rebecchi S., Bertin L., Vallini V., Bucchi G., Bartocci F., Fava F. Biomethane production from grape pomaces: a technical feasibility study. *Environmental Engineering and Management Journal*. 2013, Vol. 12, no. S11. pp. 105–108.
- [13] Paschal C., Gastory L., Katima J.H.Y., Njau K. N. Application of up-flow anaerobic sludge blanket reactor integrated with constructed wetland for treatment of banana winery effluent. *Water Practice And Technology*. 2017, Vol. 12, no. 3. pp. 667–674. doi: 10.2166/wpt.2017.062.
- [14] Makadia T.H., E., Adetutu T.M., Sheppard P.J., Ball A.S. Effect of anaerobic co-digestion of grape marc and winery wastewater on energy production. *Australian Journal of Crop Science*. 2016, Vol. 10, no. 1. pp. 57–61.
- [15] Cavinato C., Da Ros C., Pavan P., Cecchi F., Bolzonella D. Treatment of waste activated sludge together with agro-waste by anaerobic digestion: focus on effluent quality. *Water Science And Technology*. 2014, Vol. 69, no. 3. pp. 525–531. doi: 10.2166/wst.2013.736.
- [16] Da Ros C., Cavinato C., Cecchi F., Bolzonella D. Anaerobic co-digestion of winery waste and waste activated sludge: assessment of process feasibility. *Water Science And Technology*. 2014, Vol. 69, no. 2. pp. 269–277. doi: 10.2166/wst.2013.692.
- [17] Da Ros C., Cavinato C., Pavan P., Bolzonella D. Mesophilic and thermophilic anaerobic co-digestion of winery wastewater sludge and winelees: An integrated approach for sustainable wine production. *Journal of Environmental Management*. 2017, Vol. 203, Part 2, SI. pp. 745–752. doi: 10.1016/j.jenvman.2016.03.029.
- [18] Da Ros C., Cavinato C., Pavan P., Bolzonella D. Winery waste recycling through anaerobic co-digestion with waste activated sludge. *Waste Management*. 2014, Vol. 34, no. 11. pp. 2028–2035. doi: 10.1016/j.wasman.2014.07.017.
- [19] Tai M. Q., Chen J. R., Chang C. C. Feasibility of anaerobic co-digestion of waste activated sludge under thermophilic conditions. *For results 3rd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering (Jun 11-16, 2009, Beijing, China), Engineering for Rural Development*. 2009, Vol. 1–11. pp. 6320
- [20] Tai M. Q., Chen J. R., Chang C. C. Effect of ultrasonic pretreatment subsequent anaerobic co-digestion on naphthalene and pyrene removal. *For results International Conference on Advances in Chemical Technologies for Water and Wastewater Treatment (May 15-18, 2008, Xian, China), Advanced in chemical Technologies for water and wastewater treatment*. 2008. pp. 637–646.
- [21] Da Ros C., Cavinato C., Bolzonella D. Pavan R. Renewable energy from thermophilic anaerobic digestion of winery residue: preliminary evidence from batch and continuous lab-scale trials. *Biomass Bioenergy*. 2016, Vol. 91. pp. 150–159.
- [22] Achkar J. H., Lendormi T., Hobaika Z., Salameh II., Louka N., Maroun R. G., Ianoiselle

- J. L. Anaerobic digestion of grape pomace: biochemical characterization of the fractions and methane production in batch and continuous digesters. *Waste Management*. 2016, Vol. 50. pp. 275-282. doi: doi.org/10.1016/j.wasman.2016.02.028.
- [23] Failla S., Restuccia A. Methane potentials from grape marc by a laboratory scale plant. *Applied Mathematical Sciences*. 2014, Vol. 8, no. 132. pp. 6665-6678. doi: dx.doi.org/10.12988/ams.2014.474551.
- [24] Polishchuk V., Titova L., Shvorov S., Gunchenko Y. Estimation of Biogas Yield and Electricity Output during Cattle Manure Fermentation and Adding Vegetable Oil Sediment as a Co-substrate. *Problemele Energeticii Rregionale*. 2019. Vol. 2 (43). pp. 117-132.
- [25] Polishchuk V. M., Vasilenkov V. E., Lobodko M. M., Voloshin V. S. Express method for determining the calorific value of biogas *Scientific Bulletin of the National University of Life and Environmental Sciences*. 2012, Vol. 174. no. 2. pp. 258-263.
- [26] Eder B., Schulz H. *Biogas-Praxis: Grundlagen, Planung, Anlagenbau, Wirtschaftlichkeit, Beispiele*, 2007. Freiburg, Germany: Ökobuch, 237 p.
- [27] Korolev S. A., Maykov D. V. Identification of a mathematical model and study of various modes of methanogenesis in a mesophilic medium. *Computer Research and Modeling*. 2012, Vol. 4. no. 1. pp. 131-141.

Сведения об авторах.



Полищук Виктор Миколайович.

Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, кафедра охраны труда и инженерии среды, доктор технических наук, доцент. Основная область исследований: технологии и технические средства производства биотоплива.

E-mail:

polischuk.v.m@gmail.com



Шворов Сергей Андреевич.

Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, кафедра автоматике и робототехнических систем имени академика И.И. Мартыненко, доктор технических наук, профессор. Основная область исследований: создание робототехнических систем для сбора и переработки органического сырья.

E-mail: sosdok@i.ua



Круссир Галина Всеволодовна.

Одесская национальная академия пищевых технологий, Украина, кафедра экологии и природоохранных технологий, доктор технических наук, профессор. Основная область исследований:

биотехнология биологически активных добавок и защита окружающей среды.

E-mail: kruisir.65@gmail.com



Давиденко Тарас Сергеевич.

Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, кафедра автоматике и робототехнических систем имени академика И.И. Мартыненко, аспирант. Основная область исследований:

автоматизированный контроль технологических процессов приготовления и интенсивного сбраживания биомассы в биогазовых установках.

E-mail:

davidenkotaras009@gmail.com