

The Use of Straw Pellets with the Addition of Crude Glycerin for the Intensification of Biogas Production during the Anaerobic Fermentation of Cow Manure

Polishchuk V., Shvorov S., Voitiuk V., Khmelovskiy V., Titova L., Yeremenko O.,
Zubok T., Valiev T.

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

Abstract. Cow manure is a good substrate for producing biogas, since it already contains methanogens. Almost its only drawback is the low productivity of biogas output. The disadvantage of cattle manure is its low biogas yield, to increase which it is proposed to add granulated straw with the addition of crude glycerin. The aim of the work is to increase the biogas yield by adding straw granules containing crude glycerin to the main substrate based on cattle manure. To achieve this goal, the following tasks need to be solved: to determine the biogas and methane yield during methane mono-fermentation of cattle manure and combined methane fermentation of cattle manure with straw granules containing crude glycerin; using a mathematical model, to predict the cumulative biogas and methane yield during methane mono-fermentation of cattle manure and combined methane fermentation of cattle manure with straw granules containing crude glycerin. The novelty of the chosen topic is that for the combined methane fermentation of cattle manure and straw pellets with crude glycerin, the cumulative yield of biogas and methane was determined, which for 30 days is 293.7 l/kg of dry organic matter (DOM) and 143.5 l/kg of DOM, respectively. The significance of the results is that the results of the research can be used in industrial biogas plants in a quasi-continuous loading mode. In this case, the predicted methane yield will be 0.449 l/h · kg of DOM, which is higher than with mono-fermentation of cow manure, which is 0.365 l/h · kg of DOM.

Keywords: biogas, methane, methane digestion, biogas plant, fermenter, straw pellets, crude glycerol, cow manure, methanogens.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2025.2-66.09>

UDC: 621.18: 621.182

Aplicarea peletilor de paie cu adăugarea de glicerol brut pentru a intensifica producția de biogaz în timpul digestiei anaerobe a gunoiului de grajd de vacă

Polisciuk V., Șvorov C., Voitiuk V., Hmelevskii V., Titova L., Eremenko A., Zubok T., Valiev T.

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

Rezumat. Gunoiul de grajd de vacă este un substrat bun pentru producerea de biogaz, deoarece conține deja metanogene. Aproape singurul său dezavantaj este productivitatea scăzută a producției de biogaz. Dezavantajul gunoiului de grajd de bovine este randamentul scăzut de biogaz, pentru care se propune adăugarea de paie granulate cu adaos de glicerina brută. Scopul lucrării este de a crește randamentul de biogaz prin adăugarea de granule de paie care conțin glicerină brută la substratul principal pe bază de gunoi de grajd de bovine. Pentru a atinge acest obiectiv, trebuie rezolvate următoarele sarcini: determinarea randamentului de biogaz și metan în timpul monofermentării metanului a gunoiului de grajd de bovine și a fermentației metanice combinate a gunoiului de grajd de bovine cu granule de paie care conțin glicerină brută; folosind un model matematic, pentru a prezice randamentul cumulat de biogaz și metan în timpul monofermentării cu metan a gunoiului de grajd de bovine și a fermentației combinate cu metan a gunoiului de grajd de bovine cu granule de paie care conțin glicerină brută. Noutatea temei alese este că pentru fermentația combinată metanică a gunoiului de grajd de bovine și a peletelor de paie cu glicerină brută s-a determinat randamentul cumulat de biogaz și metan, care pentru 30 de zile este de 293,7 l/kg substanță organică uscată (DOM) și, respectiv, 143,5 l/kg DOM. Semnificația rezultatelor este că rezultatele cercetării pot fi utilizate în instalațiile industriale de biogaz într-un mod de încărcare cvasi-continuu. În acest caz, randamentul estimat de metan va fi de 0,449 l/h·kg DOM, ceea ce este mai mare decât în cazul monofermentării gunoiului de grajd de vacă, care este de 0,365 l/h·kg DOM.

Cuvinte-cheie: biogaz, metan, digestia metanului, instalație de biogaz, fermentator, pelete de paie, glicerol brut, gunoi de grajd de vaca, metanogene.

Применение гранул соломы с добавлением сырого глицерина для интенсификации производства биогаза при анаэробном сбраживании коровьего навоза

Полищук В., Шворов С., Войтюк В., Хмелевский В., Титова Л., Еременко А., Зубок Т., Валиев Т.

Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, Киев, Украина

Аннотация. Коровий навоз является хорошим субстратом для получения биогаза, поскольку он уже содержит в своем составе метаногены, имеет слаболужную активную кислотность, а соотношение C/N входит в рациональный диапазон 10-30. Едва ли не единственным его недостатком является низкая производительность по выходу биогаза. Еще одним распространенным субстратом в аграрном производстве является солома, которая имеет соотношение C/N в пределах 60-100, из-за чего углерод полностью не перерабатывается метаногенами, поэтому выход биогаза при метановом моносбраживании такого сырья уменьшается. Для увеличения выхода биогаза солому можно добавлять к навозу крупного рогатого скота в гранулированном виде с добавками сырого глицерина. Целью работы является увеличение выхода биогаза за счет добавления к основному субстрату на основе коровьего навоза соломенных гранул, содержащих сырой глицерин. Для достижения поставленной цели нужно решить следующие задачи: определить выход биогаза и метана при метановом моносбраживании коровьего навоза и совместном метановом сбраживании коровьего навоза с соломенными гранулами, содержащими сырой глицерин; с помощью математической модели спрогнозировать кумулятивный выход биогаза и метана при метановом моносбраживании коровьего навоза и совместном метановом сбраживании коровьего навоза с соломенными гранулами, содержащими сырой глицерин. Новизна выбранной темы состоит в том, что для совместного метанового сбраживания коровьего навоза и гранул соломы с сырым глицерином определен кумулятивный выход биогаза и метана, который на 30 сутки составляет 293.7 л/кг сухого органического вещества (COB) и 143.5 л/кг COB соответственно. Значимость результатов состоит в том, что их можно использовать в промышленных биогазовых установках, которые работают при квазинепрерывном режиме загрузки. При этом прогнозируемый выход метана составит 0.449 л/час-кг COB, что выше, чем при моносбраживании коровьего навоза, который составляет 0.365 л/час-кг COB.

Ключевые слова: биогаз, метан, метановое сбраживание, биогазовая установка, ферментер, гранулы соломы, сырой глицерин, коровий навоз, метаногены.

LIST OF ABBREVIATIONS

- CM – (англ. cattle manure) коровий навоз;
- SP – (англ. straw pellets) гранулы соломы;
- GG – (англ. grude glycerin) неочищенный (сырой) глицерин;
- CMCG – (англ. cattle manure and crude glycerin) коровий навоз и сырой глицерин;
- CMS – (англ. cattle manure and straw) коровий навоз и солома;
- CMSP – (англ. cattle manure and straw pellets) коровий навоз и гранулы соломы;
- CMSPCG – (англ. cattle manure with granulated straw with the addition of crude glycerin) коровий навоз с гранулированной соломой и с добавлением сырого глицерина;
- FOS – (герм. Flüchtigen Organischen Säuren) доля летучих жирных кислот;
- TAC – (англ. Total Anorganic Carbon) усредненная (буферная) щелочность субстрата;
- COB – (англ. dry organic matter, DOM) – сухое органическое вещество;
- XCK – химическое содержание кислорода;
- VS – (англ. volatile solids) твердые летучие вещества;
- OLR – (англ. organic loading of the reactor) органическая нагрузка ферментера;
- HRT – (англ. hydraulic retention time) гидравлическое время удержания ферментера.

I. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Коровий навоз (CM) является отличным субстратом для получения биогаза, поскольку он уже содержит в своем составе метаногены, имеет слаболужную активную кислотность, а соотношение C/N входит в рациональный диапазон 10-30. Едва ли не единственным недостатком CM является его низкая производительность по выходу биогаза. Еще одним распространенным субстратом в аграрном производстве является солома, которая имеет соотношение C/N в пределах 60-100. Поскольку солома содержит много

углерода и мало азота, вследствие недостаточного обмена веществ метаногенов (недостаток питания) имеющийся углерод не может полностью перерабатываться, поэтому выход биогаза при метановом моносбраживании такого сырья уменьшается. Поэтому для эффективного метанового сбраживания солому нужно смешивать с субстратом, имеющим низкое соотношение C/N. Одним из таких субстратов является CM. Кроме этого, солома состоит из целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина, составляющих единый лигноцеллюлозный

комплекс. Целлюлоза и гемицеллюлоза перерабатывается метаногенами, а лигнин метаногены не в состоянии разложить. При этом лигнин связывает целлюлозу и гемицеллюлозу, не разрешая метаногенам их перерабатывать. Для разложения лигноцеллюлозного комплекса, чтобы предоставить доступ метаногенам к целлюлозе и гемицеллюлозе, существуют многие методы. С разной эффективностью лигноцеллюлозное сырье подвергается действию: щелочей (каустическая сода NaOH, гидроксид калия KOH, гашеная известь $\text{Ca}(\text{OH})_2$), кислот (соляная кислота HCl), ферментов (целлюлаза, Cellic CTec2, ферментные материалы *Trichoderma reesei* RUT C3 (*Delftia* sp. PP4 S3, *Bacillus Subtilis*), грибов (вешенка обычная, трюфель разноцветный, трутовик лакированный, трутовик зимний и т.п.), других веществ (перекись водорода H_2O_2 , пероксид кальция CaO_2 , мочевины $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$, аммиак NH_3 , кальцинированная сода Na_2CO_3 , питьевая сода NaHCO_3 , хлорид железа FeCl_2 , органические растворители и т.п.). Также для вскрытия лигноцеллюлозного комплекса соломы применяются кавитация, замораживание с последующим оттаиванием, термические способы, например пропаривание. Также к термическому способу обработки соломы относится гранулирование [1], ведь в результате высокого давления, при котором измельченные частицы соломы вдавливаются роликом в фильеры, температура доходит до 100°C . При этом часто к измельченной соломе в процессе производства гранул добавляются другие вещества с целью лучшего раскрытия лигноцеллюлозного комплекса или увеличения выхода биогаза. Это могут быть уксусная кислота [2], гидроксид калия KOH [3, 4], гашеная известь $\text{Ca}(\text{OH})_2$ [5] и т.п. Одной из добавок к соломенным гранулам (SP) при их изготовлении, которая может увеличить выход биогаза, является сырой глицерин (GG), являющийся побочным продуктом производства биодизеля, его проблематично переработать на глицерин вследствие высокой рассредоточенности биодизельных производств, а также есть проблемы с его утилизацией.

Целью работы является увеличение выхода биогаза за счет добавления к основному субстрату на основе коровьего навоза соломенных гранул, содержащих

сырой глицерин (CMSPCG).

Для достижения поставленной цели нужно решить следующие задачи: определить выход биогаза и метана при метановом монображивании коровьего навоза и совместном метановом браживании коровьего навоза с соломенными гранулами, содержащими сырой глицерин; с помощью математической модели спрогнозировать кумулятивный выход биогаза и метана при метановом монображивании коровьего навоза и совместном метановом браживании коровьего навоза с соломенными гранулами, содержащими сырой глицерин.

II. АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В литературных источниках в виде, пригодном для сравнения с результатами наших исследований, описаны результаты исследований метанового монображивания CM, SP и GG, совместного метанового браживания CMGG и CMSP.

Анализ результатов метанового монображивания CM и SP приведен в табл. 1.

Что касается метанового монображивания GG, то в работе [14] утверждается, что лимитирующим шагом в скорости производства метана во время монображивания GG является поглощение 1.3-пропандиола. В работе [23] описаны результаты анаэробного браживания чистого глицерина в мезофильных условиях (35°C). Установлено, что работа реактора не выдерживала органической нагрузки (OLR), которая превышала уровень 0.25 г химического потребления кислорода (ХСК) на литр в сутки. При этом максимальный выход биогаза составлял 0.42 ± 0.05 л/г ХСК, метана – 0.30 ± 0.04 л/г ХСК. Результаты аналогичных исследований описаны в работе [24]. Анаэробное браживание GG было признано удовлетворительным при уровнях OLR между 1.3 и 2.6 г ХСК/л в сутки. Максимальный выход метана 0.32 л был достигнут при OLR 1.6 г ХСК/л в сутки, а среднее содержание метана составило 54%. При высшей норме органической нагрузки соотношение пропионовой кислоты к уксусной кислоте было выше критического предела метаболического дисбаланса. В работе [15] описаны результаты анаэробного браживания чистого глицерина в мезофильных условиях (35°C) в течение 14 суток при OLR 3.0 г VS/л. Выход биогаза составил 670 л/кг VS, метана – 350 л/кг VS (52.2%). Выход биогаза при

моносбраживании GG при 38°C при OLR 15 г VS/л в сутки, как сказано в работе [16], составляет 610 л/кг VS.

Таблица 1.

Результаты исследований метанового моносбраживания CM и SP.¹

HRT, суток (HRT, days)	OLR, г VS/л (OLR, g VS/l)	Температура, °C (Temperature, °C)	Выход биогаза, л/кг VS (Biogas output, l/kg VS)	Содержание метана, %, {выход метана, л/кг VS} (Methane content, %, {methane output, l/kg VS})	Библиография (References)
CM					
21	3.6 г VS/л-сутки	38	287	-	[6]
10	-	53	15	47	[7]
30	-	22-36	124.3	67.9	[8]
40	14 18 22 26 30	37	125.81 144.62 172.14 189.81 192.53	{31.37} {38.30} {50.43} {60.71} {63.42}	[9]
30	-	29.5-33	189	-	[10]
-	-	35-37	268,6	-	[11]
30	-	25.4-28.8	120	60.2	[12]
176	-	20-24	350	68.1	[13]
30	-	37	-	{600}	[14]
14	3.0	35	190	73.6 {140}	[15]
30	-	38	160	-	[16]
13	-	30	53.0	-	[17]
13	-	35	57.8	-	
13	-	40	156.8	-	
SP (предварительно необработанной)					
30	-	37	-	{395.6 ± 25.1}	[18]
45	-	37	-	{286}	[19]
34	-	38	655	{301}	[20]
35	-	37 ± 0.5	-	{247}	[21]
15	5	38 ± 2	-	{352}	[22]

Проводились исследования по метановому сбраживанию CMCG и метановому сбраживанию CMS и CMSP. Результаты исследований метанового сбраживания CMCG представлены в табл. 2, а метанового сбраживания CMS и CMSP – в табл. 3.

Общей особенностью метанового сбраживания CMCG по литературным источникам является уменьшение выхода биогаза при увеличении содержания глицерина в субстрате.

Что касается метанового сбраживания CMS, то с обзора литературных источников наблюдаются некоторые противоречия. Так,

согласно [25], при увеличении содержания соломы в субстрате выход биогаза уменьшается, тогда как согласно [29] – растет, а согласно [28] при достижении уровня соломы 25% растет, а затем начинает снижаться.

К сожалению, авторам не удалось найти опубликованные исследования результатов совместного метанового сбраживания CMSPCG. Поэтому существует необходимость проведения исследований совместного метанового сбраживания CMSPCG для оценки данного субстрата с точки зрения производительности выхода биогаза и метана.

¹ Appendix 1

Таблица 2.

Результаты исследований метанового сбраживания СМCG.²

HRT, суток (HRT, days)	OLR, г VS/л (OLR, g VS/l)	Температура, °C (Temperature, °C)	Содержание глицерина, % (Glycerin content, %)	Выход биогаза, л/кг VS (Biogas output, l/kg VS)	Содержание метана, %, {выход метана, л/кг VS} (Methane content, %, {methane output, l/kg VS})	Библиография (References)
-	-	35-37	5 10 15	825.3 825.7 387.9	- - -	[11]
30	-	25.4-28.8	5 10 15	235 280 0	14.9 3.5 0	[12]
176	-	20-24	5 10 15 20	360 350 300 230	74.0 73.0 71.0 67.0	[13]
30	-	37	1 3	- -	{620} {510}	[14]
14	3.0	35	60 (за VS) 45 (за VS)	510 л/кг VS 370 л/кг VS	60.8 {310} 59.5 {220}	[15]
8 8 8 8 13 13 13 13 13 12 12 12 12	-	30 35 40	0.6 1.2 2.3 3.4 0.6 1.2 2.3 3.4 6.6 0.6 1.2 2.3 3.4	45.3 81.7 103.0 77.2 49.7 97.0 158.6 176.2 118.5 136.7 152.4 180.0 225.2	- - - - - - - - - - - - -	[17]

Таблица 3.

Результаты исследований метанового сбраживания CMS и CMSP.³

Содержание компонентов, %		Способ обра бот- ки солом ы	HRT, суток (HRT, days)	OLR, г VS/л (OLR, g VS/l)	Темпера- тура, °C (Tempera- ture, °C)	Выход биогаза, л/кг VS (Biogas output, l/kg VS)	Содержание метана, %, {выход метана, л/кг VS} (Methane content, %, {methane output, l/kg VS})	Библио- гра- фия (Refere nces)
Коро- вий навоз	Соло- ма							
1	2	3	4	5	6	7	8	9
100 80 60 40 20 0	0 20 40 60 80 100	Пшенич- ная, без обра бот- ки	13 32 30 30 30 30	-	35±0.50	170.38 108.86 61.96 9.52 6.85 11.17	- - - - - -	[25]
0	100	Помол	-	-	-	350-450	54-58	[26,33]
100 95 95	0 5 5	Пшеничная Без оброб. Брикетир.	20	-	35	- - -	{128} {187} {200}	[28]

Продолжение табл. 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9
100	0	Кукурузная без обработки	25	2	35	242	61.2	[27]
75	25			2		311	57.9	
50	50			2		259.5	56.7	
100	0			3		204	62.6	
75	25			3		296	52.8	
50	50			3		235	55.8	
100	0	Рисовая, дробление	40	-	37 ± 1	389.33	{189.09}	[29]
66	33					388.50	{194.59}	
50	50					390.25	{185.13}	
33	66					402.45	{194.91}	
0	100					363.33	{175.01}	

III. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В работе сравнивалась эффективность метанового сбраживания СМ и CMSPCG.

Исследование осуществлялось на лабораторной биогазовой установке (рис. 1), состоящей из ферментера и газгольдера.

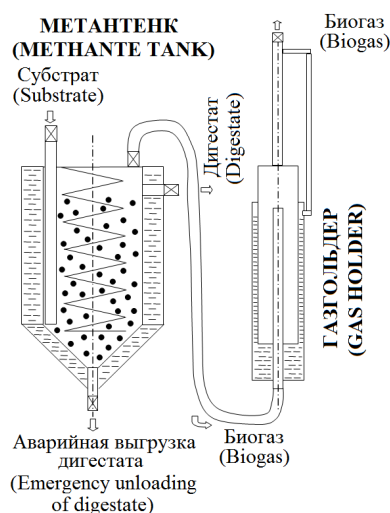


Рис. 1. Схема лабораторной биогазовой установки.⁴

Ферментер изготовлен из легированной стали и представляет собой цилиндрическую емкость с коническим дном. Вокруг ферментера находится «водяная рубашка», которая служит для поддержания теплового баланса ферментера. Вода в «водяной рубашке» подогревается с помощью ТЭНа. Гомогенизация субстрата в метантенке осуществляется шнековым перемешивающим устройством. Загрузка субстрата происходит через трубу, закрепленную на крышке ферментера, и идет почти до самого его дна. Благодаря этому свежий субстрат опускается ко дну, вытесняя тем самым перебродивший дигестат, который выгружается через трубу на

боковой стенке ферментера. Полезный объем ферментера составляет 30 л. Произведенный биогаз через гибкую трубку подается в газгольдер «мокрого» типа, состоящий из цилиндрической емкости, наполненной водой, в которой плавает перевернутая цилиндрическая емкость меньшего диаметра, называемая цилиндром-уравнемером. Высота подъема фиксируется с помощью шкалы. Зная высоту подъема цилиндра-уравнемера и его внутренний диаметр, определяется объем биогаза, попавшего в цилиндр-уравнемер за определенный промежуток времени.

Снятие показателей выхода биогаза и содержания метана в нем производилось по мере его накопления в газгольдере, как правило, один раз в сутки через 24 часа. Содержание метана в биогазе определялось мультигазовым анализатором МГА-1-12 (Украина).

При моносбраживании СМ в ферментер загружалось 8.5 кг субстрата, состоявшего из 3.5 кг СМ и 5 кг воды. При использовании гранул соломы содержание воды пришлось увеличить до 8 кг, поскольку субстрат был густым, что отрицательно сказывалось на эффективности метанового брожения. Состав субстрата приведен в табл. 4.

Температура метанового брожения составляла 40 С.

Гранулы производились путем гранулирования в грануляторе STILER производительностью 100 кг/ч. с мощностью электродвигателя 3 кВт (Польша) предварительно измельченной на лабораторном измельчителе 8011S Waring (США). При изготовлении гранул соломы с сырым глицерином к измельченной соломе добавлялось по весу 20% сырого глицерина, полученного после изготовления биодизеля.

Таблица 4

Состав субстратов при проведении экспериментальных исследований.⁵

Метановое сбраживание (Methane fermentation)	Состав субстрата (Composition of the substrate)				
	Вода, кг (Water, kg)	Коровий навоз, кг (Cattle manure, kg)	Гранулы, кг (Granules, kg)		
			Соломы (Straws)	Соломы с глицерином (Straws with glycerin)	Сырой глицерин (Grude glycerin)
CM	5	3.5	-	-	-
CMSPCG	8	2.8	-	0.56	0.14

Коровий навоз содержит 16.2% сухого вещества (СВ), из которого 77% – сухое органическое вещество (СОВ) [30], [34], [35]. В пшеничной соломе содержится 82% СОВ [31], [36]. Сырой глицерин является отходом производства биодизеля. Он содержит около 80% глицерина, примерно 15% воды и 5% неорганических веществ [32]. То есть СОВ сырого глицерина составляет 80%. Исходя из вышеназванного, содержание СОВ в субстрате и органическая нагрузка метантенка (OLR) при его полезном объеме 30 л представлены в табл. 5.

Таблица 5

Содержание СОВ в субстрате.⁶

Органические компоненты субстрата (Organic components of the substrate)	Метановое сбраживание (Methane fermentation)	
	CM	CMSPCG
СОВ коровьего навоза, кг (DOM cattle manure, kg)	0.437	0.3493
СОВ соломы, кг (DOM of straw, kg)	-	0.4592
СОВ сырого глицерина, кг (DOM of grude glycerin, kg)	-	0.1120
Всего СОВ, кг (Total DOM, kg)	0.437	0.8085
Содержание СОВ в субстрате, % (The content of DOM in the substrate, %)	5.1	7.0
OLR, г СОВ/л (OLR, g DOM/l)	14.6	30.7

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В результате исследования получены

динамика скорости выхода биогаза и метана, накопленный выход биогаза и метана и изменение содержания метана в биогазе во времени.

Динамика скорости выхода биогаза приведена на рис. 2 и имеет характерный вид для периодической загрузки ферментера.

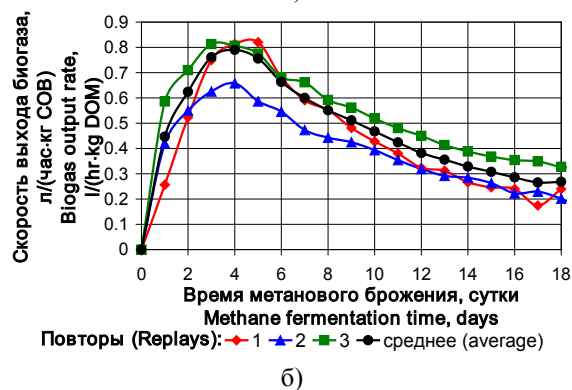
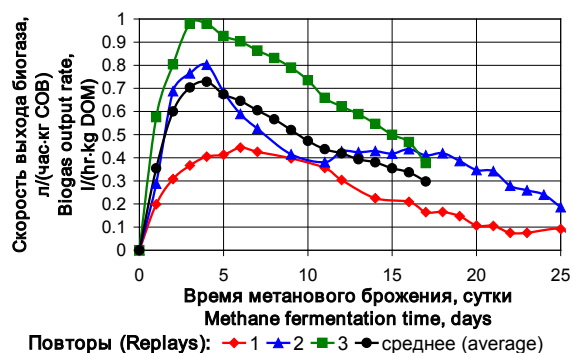


Рис. 2. Динамика скорости выхода биогаза при: а) метановом моносбраживании CM; б) совместном метановом сбраживании CMSPCG.⁷

В первые 3-5 суток наблюдается экспоненциальная фаза развития метаногенов, которые в результате активного потребления субстрата интенсивно размножаются, увеличивая микробную биомассу, о чем свидетельствует существенный рост выхода продуктов метаболизма метаногенов – биогаза. По мере истощения питательных веществ субстрата наступает стационарная фаза, при которой наблюдается равновесие между появлением новых метаногенов и их отмиранием. В нашем случае она очень коротка и характеризуется максимальным выходом биогаза. После этого наступает фаза отмирания, когда из-за недостаточного количества питательных веществ в субстрате скорость отмирания микроорганизмов превышает скорость их размножения. Фаза

отмирания сопровождается постепенным уменьшением выхода биогаза и может продолжаться достаточно долго. Однако продолжать опыты уже было на рационально, поэтому они останавливались при значительном снижении выхода биогаза.

Динамика скорости выхода биогаза характеризуется максимальным выходом биогаза, среднее значение которого при метановом монображивании СМ, как видно из рис. 3, составляло на четвертые сутки 0.729 л/(час·кг СОВ). Максимальный выход биогаза при совместном метановом сбраживании СМSPCG на четвёртые сутки составлял 0.791 л/(час·кг СОВ). Добавление гранул соломы с глицерином к коровьему навозу позволяет увеличить максимальный выход биогаза на 8%.

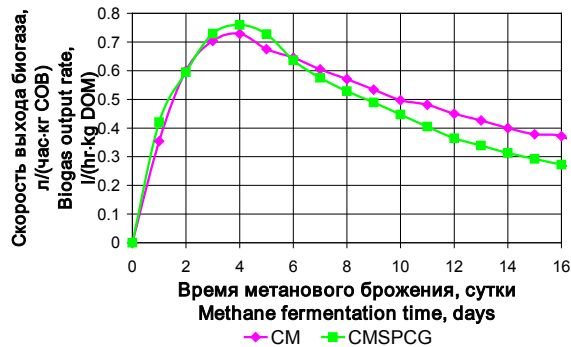


Рис. 3. Сравнение средних значений динамики скорости выхода биогаза при метановом монображивании СМ и совместном метановом сбраживании СМSPCG⁸.

Кумулятивный выход биогаза приведен на рис. 4. Средние значения кумулятивного выхода биогаза были аппроксимированы функцией экспоненциального роста к максимуму:

$$y = a \cdot (1 - e^{-b \cdot t}), \quad (1)$$

где y – кумулятивный выход биогаза (метана), м³/кг СОВ; a, b – коэффициенты; t – время метанового брожения, суток; e – число Эйлера, примерно составляет 2,71828.

Коэффициенты формулы (1) для рассматриваемых случаев приведены в табл. 6. Там же приведен коэффициент детерминации R^2 и значение расчетного $F_{\text{расч}}$ и критического $F_{\text{кр}}$ (при вероятности 0.95) критериев Фишера для определения значимости R^2 .

Поскольку для всех случаев $F_{\text{расч}} > F_{\text{кр}}$, коэффициенты детерминации значимы [37].

Поскольку значения коэффициентов детерминации превосходят 0.8, считается, что модель хорошего свойства.

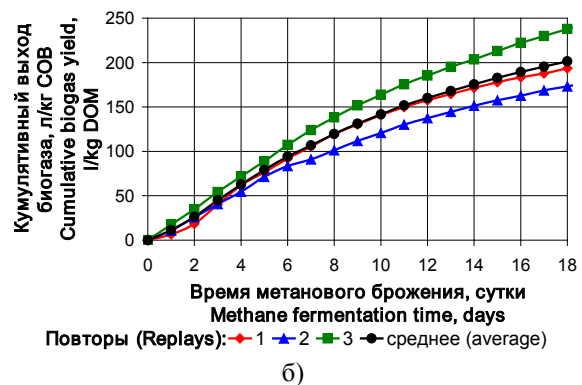
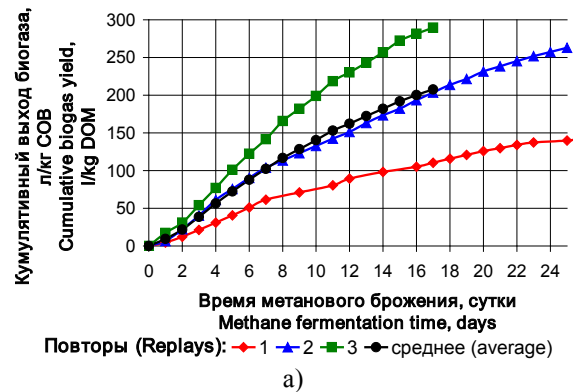


Рис. 4. Кумулятивный выход биогаза при: а) метановом монображивании СМ; б) совместном метановом сбраживании СМSPCG⁹.

Таблица 6

Коэффициенты и формулы (1), описывающие кумулятивный выход биогаза¹⁰.

Субстрат (Substrate)	a	b	R^2	$F_{\text{расч}} (F_{\text{calc}})$	$F_{\text{кр}} (F_{\text{cr}})$
CM	420	0.0408	0.9953	3410	5.96
CMSPCG	320	0.055	0.9947	3203	3.96

Как видно из рис. 5, наибольший кумулятивный выход биогаза наблюдается при метановом монображивании СМ, который на 17 сутки составляет 203.5 л/кг СОВ (см. рис. 4, а), а на 30 сутки прогнозируется 293.7 л/кг СОВ (см. рис. 5). Несколько меньший кумулятивный выход биогаза при совместном метановом сбраживании СМSPCG, который на 17 сутки составляет 194.4 л/кг СОВ (см. рис. 4, в), а на 30 сутки прогнозируется 258.5 л/кг СОВ (см. рис. 5).

Содержание метана в биогазе приведено на рис. 6, из которого видно, что содержание метана в производимом биогазе растет постепенно и достигает своего максимума на

3-4 сутки метанового сбраживания, после чего держится примерно на одном уровне.

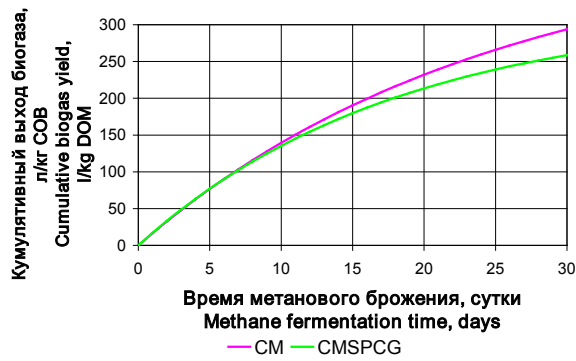


Рис. 5. Сравнение средних значений кумулятивного выхода биогаза, полученного по формуле (1) с коэффициентами, приведенными в табл. 1, при метановом моносбраживании CM и совместном метановом сбраживании CMSPCG¹¹.

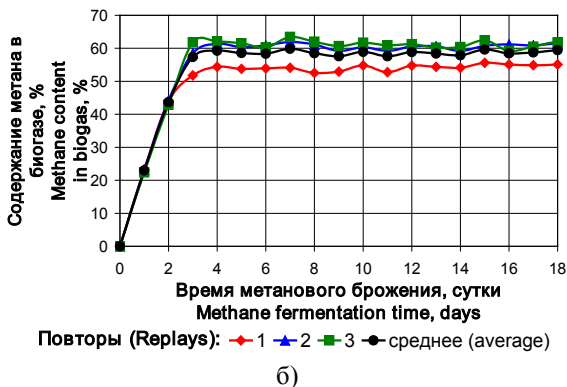
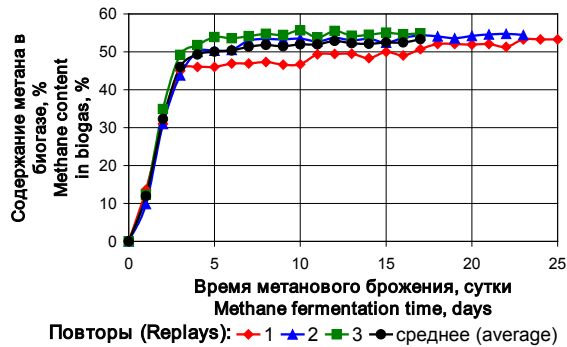


Рис. 6. Содержание метана в биогазе при: а) метановом моносбраживании CM; б) совместном метановом сбраживании CMSPCG¹².

Как видно из рис. 7, наибольшее содержание метана в биогазе, достигающее почти до 60%, наблюдается при совместном метановом сбраживании CMSPCG. При метановом моносбраживании CM содержание метана в биогазе ниже и находится на уровне 50-55%.

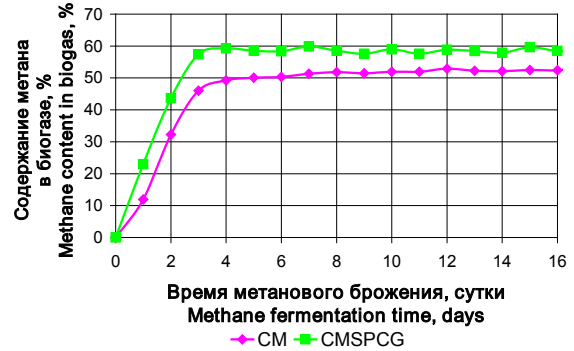


Рис.7. Сравнение средних значений содержания метана в биогазе при метановом моносбраживании CM и совместном метановом сбраживании CMSPCG¹³.

Динамика скорости выхода метана (средние значения) приведена на рис. 8, из которого видно, что ее форма повторяет динамику скорости выхода биогаза.

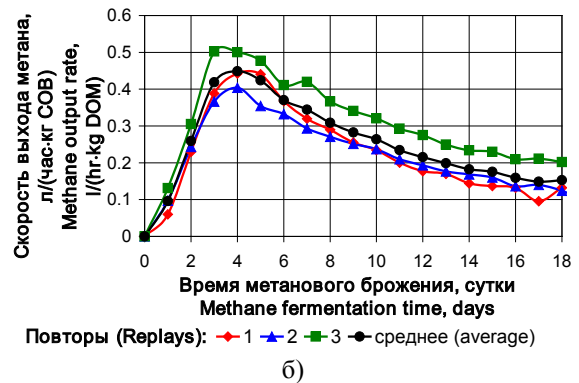
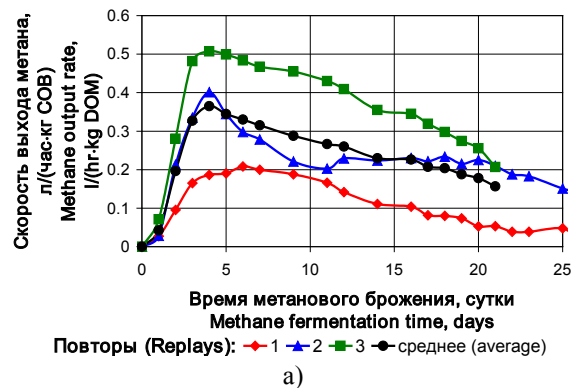


Рис. 8. Динамика скорости выхода метана при: а) метановом моносбраживании CM; б) совместном метановом сбраживании CMSPCG¹⁴.

Как показано на рис. 9, наибольший максимальный выход метана наблюдается при совместном метановом сбраживании CMSPCG и составляет 0.449 л/(час·кг COB).

Кумулятивный выход метана приведен на рис. 10. Средние значения кумулятивного

выхода метана были аппроксимированы функцией (1), коэффициенты которого для рассматриваемых случаев представлены в табл. 7. Там же приведен коэффициент детерминации R^2 и значение расчетного $F_{расч}$ и критического $F_{кр}$ (при вероятности 0.95) критериев Фишера для определения значимости R^2 .

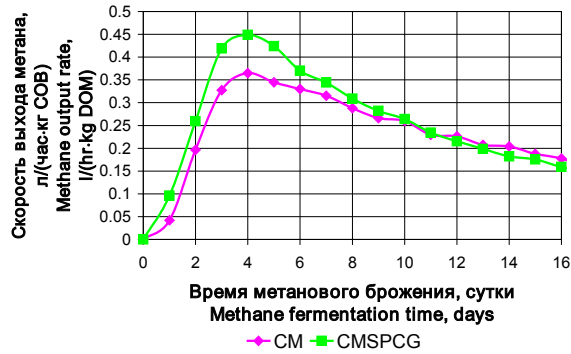


Рис. 9. Сравнение средних значений динамики скорости выхода метана при метановом монображивании CM и совместном метановом сбраживании CMSPCG¹⁵.

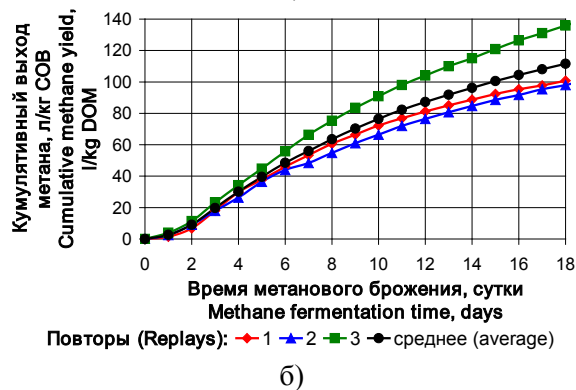
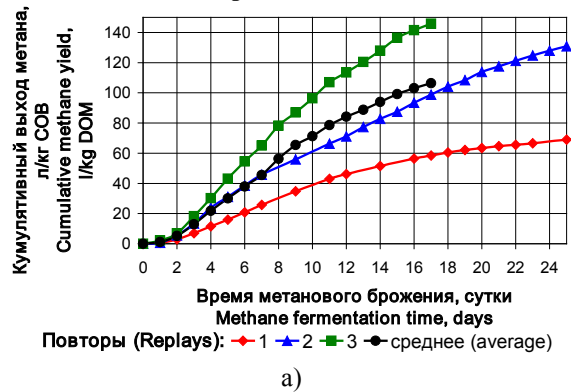


Рис. 10. Кумулятивный выход метана при: а) метановом монображивании CM; б) совместном метановом сбраживании CMSPCG¹⁶.

Поскольку для всех случаев $F_{расч} > F_{кр}$, коэффициенты детерминации значимы. Как видно из рис. 11, наибольший

кумулятивный выход метана наблюдается при совместном метановом сбраживании CMSPCG, который на 17 сутки составляет 107.9 л/кг COB (см. рис. 10, в), а на 30 сутки прогнозируется 143.5 л/кг COB (рис. 11). Выход метана при метановом монображивании CM на 17 сутки составляет 106.3 л/кг COB (см. рис. 10, а), а на 30 сутки прогнозируется 141.4 л/кг COB (см. рис. 11).

Таблица 7

Коэффициенты и формулы (1), описывающие кумулятивный выход метана¹⁷.

Субстрат (Substrate)	a	b	R^2	$F_{расч}$ (F_{calc})	$F_{кр}$ (F_{cr})
CM	175	0.055	0.9469	286	5.96
CMSPCG	177.6	0.055	0.9892	1550	3.96

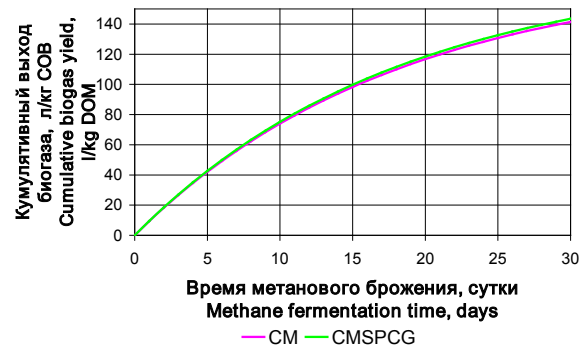


Рис. 11. Сравнение средних значений кумулятивного выхода метана, полученного по формуле (1) с коэффициентами, приведенными в табл. 2, при метановом монображивании CM и совместном метановом сбраживании CMSPCG¹⁸.

Дискуссия. Сравнивая кумулятивный выход биогаза при метановом монображивании CM, полученный в результате наших исследований (табл. 8), с выходом биогаза при близких значениях температурного режима при метановом сбраживании аналогичного субстрата по литературным источникам, можно констатировать, что с определенными исследованиями наши данные достаточно близки.

Так, согласно [15] на 14 сутки метанового брожения кумулятивный выход биогаза составляет 190 л/кг VS, тогда как наши результаты дают 181 л/кг COB (отклонение 5%), согласно [17] на 13 сутки метанового брожения кумулятивный выход биогаза 156.8 л/кг VS, в то время как наши результаты дают

171.2 л/кг COB (отклонение 7%). По сравнению с результатами [6], когда на 21 сутки метанового брожения кумулятивный выход биогаза составлял 287 л/кг VS, в то время как наши результаты дают 240 л/кг COB, отклонение увеличилось и составляет 16%. Отклонение достигло 30% при сравнении результатов [9] при аналогичном OLR (125.81 л/кг VS на 14 день). Еще большие различия в результатах из [16], когда на 30 сутки метанового брожения было получено 160 л/кг VS, что на 46% ниже наших результатов (294 л/кг COB). Результаты наших исследований с [7], [8], [10], [12], [13] сравнивать некорректно вследствие значительных отклонений

температурных режимов метанового брожения, а в [11] не указан HRT. Относительно кумулятивного выхода метана, результаты наших исследований имеют более высокие значения по сравнению с [9] (31.37 л/кг VS на 40 сутки при OLR 14 г VS/л против 94 л/кг COB, отклонение 67%), однако более низкие значения по сравнению с [9] [15] (140 л/кг VS на 14 сутки против 94 л/кг COB, отклонение 33%) и [14] (600 л/кг VS на 30 сутки против 141 л/кг COB, отклонение 77%). Кроме этого, содержание метана по нашим исследованиям находится в пределах 50-55%, тогда как он несколько выше в [12] и составляет 60.2%, а по [13] - 68.1%.

Таблица 8

Расчетный кумулятивный выход биогаза за формулой (1)¹⁹.

Субстрат (Substrate)	Кумулятивный выход (в л/кг COB) за сутки (Cumulative yield (l/kg DOM) per day)							
	5	10	15	20	25	30	35	40
Биогаз (Biogas)								
CM	76.76	139.36	190.40	232.03	265.98	293.66	316.23	334.64
CMSPCG	76.93	135.37	179.75	213.47	239.08	258.53	273.31	284.53
Метан (Methane)								
CM	42.07	74.03	98.30	116.74	130.75	141.39	149.47	155.61
CMSPCG	42.70	75.13	99.76	118.48	132.69	143.49	151.69	157.92

К сожалению, сравнить результаты собственных исследований совместного метанового сбраживания CMSPCG с результатами, опубликованными в литературных источниках, не имеет возможности из-за отсутствия таких публикаций. Поэтому сравниваем результаты наших исследований с результатами CMCG и CMSP.

Содержание сырого глицерина в наших исследованиях составляет 4% по массе по отношению к другим органосодержащим компонентам субстрата и 14% по массе COB. При этом кумулятивный выход биогаза из CMSPCG по нашим исследованиям, как правило, меньше по сравнению с кумулятивным выходом биогаза при совместном метановом сбраживании CMCG. Так, согласно [15], кумулятивный выход биогаза на 14 сутки при температуре метанового брожения 35°C при содержании глицерина 45% за VS составляет 370 л/кг VS (против 172 л/кг COB, отклонение 53%),

согласно [17], кумулятивный выход биогаза на 12 сутки при температуре метанового брожения 40°C при содержании глицерина 3.4% составляет 225.2 л/кг VS (против 155 л/кг COB, отклонение 33%). Аналогичная ситуация и с выходом (содержанием) метана. Согласно [15], кумулятивный выход метана на 14 сутки при температуре метанового брожения 35°C при содержании глицерина 45% за VS составляет 220 л/кг VS (против 95 л/кг COB, отклонение 57%), согласно [14], кумулятивный выход метана на 30 сутки при температуре метанового брожения 37°C при содержании глицерина 3% составляет 510 л/кг VS (против 143 л/кг COB, отклонение 72%). В работе [13] декларируется высшее содержание метана по сравнению с нашими исследованиями (74% против 57-59%). Содержание метана, полученное в работе [12], меньше, и составляет 14,9%.

Если сравнивать наши исследования по метановому сбраживанию CMSPCG с результатами метанового сбраживания CMS

по литературным источникам, то за [29] кумулятивный выход биогаза при температуре $37 \pm 1^\circ\text{C}$ на 40 суток при содержании соломы 33-66% находится в пределах 388.5-402.45 кг VS, а выход метана – 185.13-194.91 л/кг VS. В то время как при метановом сбраживании CMSPCG на 40 суток при содержании гранул соломы 16% нами получен более низкий выход биогаза 285 л/кг COB и метана 158 л/кг COB. На 25 суток метанового брожения CMS при OLR 2 г VS/л кумулятивный выход биогаза составлял 311 л/кг VS при содержании метана 57.9%, а при OLR 3 г VS/л кумулятивный выход биогаза составлял 296 91 л/кг VS при содержании метана 52.8%, что также превышает наши результаты при метановом сбраживании CMSPCG (биогаз – 239 л/кг COB, метан – 58-59%). Вместе с тем, согласно [25], кумулятивный выход биогаза на 32 суток при температуре $35 \pm 0.5^\circ\text{C}$ при метановом сбраживании CMS составляет 108.86 л/кг VS, тогда как наши исследования показывают более высокий результат – 265 л/кг COB. В [27] при метановом сбраживании CMSP на 20 суток при температуре 35°C был получен кумулятивный выход метана 200 л/кг VS, что превышает полученный нами выход метана при метановом сбраживании CMSPCG (118 л/кг COB).

Экспериментальные исследования по выходу биогаза и метана при метановом сбраживании субстрата проводятся главным образом при периодической загрузке ферментера. Однако при промышленном производстве биогаза применяется квазинепрерывный режим загрузки ферментера. Кумулятивный выход биогаза при периодическом и квазиберпрерывном режиме загрузки ферментера отличаются. Чтобы спрогнозировать, каков будет выход биогаза при квазиберпрерывном режиме загрузки ферментера на основе результатов экспериментальных исследований при периодическом режиме загрузки ферментера, нужно понять принцип формирования выхода биогаза при квазиберпрерывном режиме загрузки ферментера. Для этого можно использовать рис. 12, из которого видно, что при каждой загрузке в ферментер новой порции субстрата формируется типичная для периодической загрузки кривая выхода биогаза, имеющая пик, то есть свое максимальное значение. При последующей загрузке в ферментер порции субстрата

формируется аналогичная кривая со своим максимальным выходом биогаза.

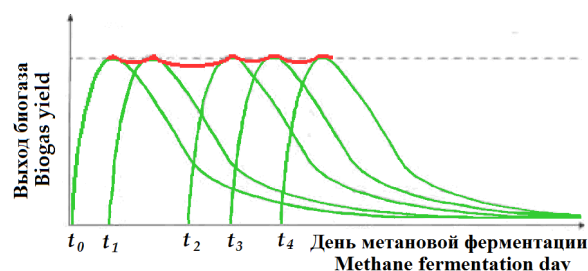


Рис. 11. Схема формирования выхода биогаза при квазинепрерывной загрузке субстрата: t_0 – t_4 – момент загрузки отмеренной порции субстрата в ферментер; — динамика выхода биогаза при метановом брожении отмеренной части субстрата; — формирование выхода биогаза при квазинепрерывной загрузке субстрата²⁰.

В результате эти максимальные значения выхода биогаза при каждой загрузке в ферментер новой порции субстрата формируют постоянный выход биогаза, который будет тем более приближаться к прямой линии на уровне максимального выхода биогаза для периодической загрузки метантенка, чем меньшие промежутки между загрузкой новых порций субстрата. Сейчас такие промежутки между загрузкой на большинстве биогазовых установок составляют около часа, а на некоторых снижаются до 10 мин. Для того чтобы постоянный уровень выхода биогаза не снижался, нужно правильно подбирать состав субстрата, регулируя уровень подачи питательной среды, контролируемый при определении соотношения FOS/TAC.

При прогнозировании выхода биогаза (метана) при квазинепрерывной загрузке ферментера на основе экспериментальных исследований при периодической загрузке ферментера на первый план выходит исследование динамики выхода биогаза (метана) с его максимальным значением. Не все авторы приводят такие данные или приводят их в такой размерности, что не позволяет сравнить их с результатами наших исследований. Из всех исследуемых литературных источников только в работе [28] при CMSP приведены максимальные выходы биогаза: для OLR=2 г VS/л-сутки при соотношении CM:SP=100:0 максимальный выход биогаза составляет 9.5 л/кг VS, при соотношении CM:SP=75:25 – 12.5 л/кг VS,

при соотношении CM:SP=50:50 – 11.0 л/кг VS; для OLR=3 г VS/л-сутки при соотношении CM:SP=100:0 максимальный выход биогаза составляет 8.0 л/кг VS, при соотношении CM:SP=75:25 – 6.0 л/кг VS, при соотношении CM:SP=50:50 – 10.0 л/кг VS. При метановом сбраживании CMSPCG максимальный выход биогаза составляет 0.73 л/час-кг COB, или 18.27 л/кг COB, что на 32% больше максимального выхода 12.5 л/кг VS при метановом сбраживании CMSP согласно [28]. При этом значение кумулятивного выхода биогаза по [28] превышало аналогичные значения наших исследований.

Благодарность

Работа является частью проекта «Система производства и использования биогаза для обеспечения энергоэффективности агропромышленных предприятий», который выполняется по заказу Министерства образования и науки Украины (договор РН/52-2024, регистр. № 0124U004373) и финансируется за счет инструмента внешней помощи Европейского Союза во исполнение обязательств Украины в рамках Рамочной программы Европейского Союза по научным исследованиям и инновации "Горизонт 2020".

Acknowledgements

The work is part of the project “System of production and use of biogas to ensure energy efficiency of agro-industrial enterprises”, which is carried out by order of the Ministry of Education and Science of Ukraine (agreement РН/52-2024, registration number 0124U004373) and is financed by the European Union’s external aid instrument to fulfil Ukraine’s commitments in the European Union’s Framework Program for Scientific Research and Innovation “Horizon 2020”.

VI. ВЫВОДЫ

При совместном метановом сбраживании коровьего навоза и гранул соломы с сырым глицерином для периодической загрузки ферментера кумулятивный выход биогаза на 30 суток составляет 258.5 л/кг COB, что несколько меньше кумулятивного выхода биогаза при метановом моносбраживании коровьего навоза. Поскольку содержание метана в биогазе при метановом сбраживании коровьего навоза и гранул соломы с сырым глицерином превышает выход биогаза при метановом моносбраживании коровьего

навоза (почти 60% против 50-55%), то кумулятивный выход метана при совместном метановом сбраживании коровьего навоза и гранул соломы с сырым глицерином на 30 суток составляет 143.5 л/кг COB, что несколько превышает кумулятивный выход метана при метановом моносбраживании коровьего навоза – 141.4 л/кг COB. Максимальный выход метана при совместном метановом сбраживании коровьего навоза и гранул соломы с сырым глицерином составляет 0.449 л/час-кг COB, что больше максимального выхода метана при метановом моносбраживании коровьего навоза – 0.365 л/час-кг COB. Следовательно, смесь коровьего навоза и гранул соломы с сырым глицерином обеспечит больший выход метана в промышленных биогазовых установках, работающих при квазинепрерывном режиме загрузки субстрата, по сравнению с коровьим навозом.

Appendix 1

¹**Table 1.** Results of studies of methane monofermentation of CM and SP.

²**Table 2.** The results of CMCG methane fermentation studies.

³**Table 3.** The results of CMS and CMSP methane fermentation studies.

⁴**Fig. 1.** Scheme of a laboratory biogas plant.

⁵**Table 4.** Composition of substrates during experimental studies.

⁶**Table 5.** DOM content in the substrate.

⁷**Fig. 2.** Dynamics of biogas output rate during: a) methane mono-fermentation of CM; b) compatible methane fermentation CMSPCG.

⁸**Fig. 3.** Comparison of the average values of the dynamics of the rate of biogas output during methane mono-fermentation of CM and combined methane fermentation of CMSPCG.

⁹**Fig. 4.** Cumulative output of biogas during: a) methane mono-fermentation of CM; b) compatible methane fermentation CMSPCG.

¹⁰**Table 6.** Coefficients a and b of formula (1), which describes the cumulative biogas output.

¹¹**Fig. 5.** Comparison of the average values of the cumulative biogas output obtained by formula (1) with the coefficients given in the table. 1, with methane monofermentation of CM and combined methane fermentation of CMSPCG.

¹²**Fig. 6.** Methane content in biogas during: a) methane mono-fermentation of CM; b) compatible methane fermentation CMSPCG.

¹³**Fig. 7.** Comparison of the average values of methane content in biogas during mono-methane fermentation of CM and combined methane fermentation of CMSPCG.

¹⁴**Fig. 8.** The dynamics of the rate of methane release

during: a) methane mono-fermentation of CM; b) compatible methane fermentation CMSPCG.

¹⁵**Fig. 9.** Comparison of the average values of the dynamics of the rate of methane release during mono-methane fermentation of CM and combined methane fermentation of CMSPCG.

¹⁶**Fig. 10.** Cumulative yield of methane during: a) methane mono-fermentation of CM; b) compatible methane fermentation CMSPCG.

¹⁷**Table 7.** Coefficients a and b of formula (1), which describes the cumulative output of methane.

¹⁸**Fig. 11.** Comparison of the average values of the cumulative yield of methane obtained by formula (1) with the coefficients given in the table. 2, with methane monofermentation of CM and combined methane fermentation of CMSPCG.

¹⁹**Table 8.** The calculated cumulative yield of biogas is according to formula (1).

²⁰**Fig. 12.** Scheme of biogas output formation during quasi-continuous loading of the substrate: t_0-t_4 – the moment of loading the measured portion of the substrate into the methane tank;  - biogas output during methane fermentation of a measured portion of the substrate;  - formed output of biogas with quasi-continuous loading of the substrate.

Библиография (References)

- [1] Ieremenko O.I., Zubok T.O. Scientific and technical aspects of granulation of energetic willow tree. *Scientific notes of Tavriya National University. V.I. Vernadsky. Series: Technical Sciences*, 2019, vol. 30, no. 69 (3), pp. 16-22.
- [2] Joelsson E., Dienes D., Krisztina Kovacs K., Galbe M., Wallberg O. Combined production of biogas and ethanol at high solids loading from wheat straw impregnated with acetic acid: experimental study and techno-economic evaluation. *Sustainable Chemical Processes*, 2016, vol. 4, no. 14, pp. 1-19. <https://doi.org/10.1186/s40508-016-0058-5>
- [3] Rahman M.A., Moller H.B., Saha C.K., Alam M.M., Wahid R., Feng L. Anaerobic co-digestion of poultry droppings and briquetted wheat straw at mesophilic and thermophilic conditions: Influence of alkali pretreatment. *Renewable Energy*, 2018, vol. 128, part A, pp. 241-249. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.05.076>
- [4] Feng L., Moset V., Li W.W., Chen C., Moller H.B. In-situ injection of potassium hydroxide into briquetted wheat straw and meadow grass - Effect on biomethane production. *Bioresource Technology*, 2017, vol. 239, pp. 258-265. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.05.032>
- [5] Valiev T., Polishchuk V. Research on Yield of Biogas During Methane Fermentation of Cow Manure With Addition of Granukated Straw With Slaked Lime. *Engineering for Rural Development*, 2023, vol. 69, no. 1, pp. 931-936. <https://doi.org/10.22616/ERDev.2023.22.TF184>
- [6] Wichern M., Lubken M., Schlattmann M., Gronauer A., Horn H. Investigations and mathematical simulation on decentralized anaerobic treatment of agricultural substrate from livestock farming. *Water Science And Technology*, 2008, vol. 58, no. 1, pp. 67-72. <https://doi.org/10.2166/wst.2008.332>
- [7] Ibn Abubakar B.S.U., Ismail N. Anaerobic Digestion of Cow Dung for Biogas Production. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2012, vol. 7, no. 2, pp. 169-172.
- [8] Ukpai P.A., Nnabuchi M.N. Comparative study of biogas production from cow dung, cow pea and cassava peeling using 45 litres biogas digester. *Advances in Applied Science Research*, 2012, vol. 3, pp. 1864-1869.
- [9] Hamzah A.F.A., Hamzah M.H., Man H.C., 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. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16791>
- [10] Budiyo, Kusworo T. D. Biogas Production From Cassava Starch Effluent Using Microalgae as Biostabilisator. *International Journal of Science and Engineering*, 2011, vol. 2, no. 1, pp. 4-8. <https://doi.org/10.12777/ijse.2.1.4-8>
- [11] Robra S., Serpa da Cruz R., de Oliveira A.M., Almeida Neto J.A., Santos J.V. Generation of biogas using crude glycerin from biodiesel production as a supplement to cattle slurry. *Biomass and bioenergy*, 2010, vol. 34, pp. 1330-1335. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.04.021>
- [12] Goembira F., Yuliarningsih R., Silvia S., Rahmadani F. The effects of crude glycerol addition on biogas production. *For results International Interdisciplinary Conference on Green Development in Tropical Regions* (June 07-08, 2021, Padang, Indonesia), *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2024, vol. 1306, a/n 012041. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1306/1/012041>
- [13] Simm S., Orrico A.C.A., Junior M.A.P.O., da Silva Sunada N., Schwingel A.W., de Mendonça Costa M.S.S. Crude glycerin in anaerobic co-digestion of dairy cattle manure increases methane production. *Scientia Agricola*, 2017, vol. 74, no. 3, pp. 175-179. <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2016-0057>
- [14] Lymeratou A., Skiadas I.V., Gavala H. V. Anaerobic co-digestion of swine manure and crude glycerol derived from animal fat-Effect of hydraulic retention time. *AIMS Environmental Science*, 2018, vol. 5, no. 3, pp. 105-116. <https://doi.org/10.3934/environsci.2018.2.105>
- [15] Chen X., Romano R.T., Zhang R., Kim H-S. Anaerobic Co-Digestion of Dairy Manure and Glycerin. *For results 2008 ASABE Annual*

- International Meeting Sponsored by ASABE, Rhode Island Convention Center, Providence (June 29 - July 2, 2008, Providence, Rhode Island, USA), American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2008, a/n 084496. <https://doi.org/10.13031/2013.25099>*
- [16] Andriamanohiarisoamanana F.J., Saikawa A., Tarukawa R., Qi G., Pan Z., Yamashiro T., Iwasaki M., Ihara I., Nishida T., Umetsu K. Anaerobic co-digestion of dairy manure, meat and bone meal, and crude glycerol under mesophilic conditions: Synergistic effect and kinetic studies. *Energy for Sustainable Development*, 2017, vol. 40, pp. 11-18. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2017.05.008>
- [17] Romaniuk W., Rogovskii I., Polishchuk V., Titova L., Borek K., Wardal W., Shvorov S., Dvornyk Ye., Sivak I., Drahnev S., Derevjanko D., Roman K. Study Of Methane Fermentation Of Cattle Manure In Mesophilic Regime With Addition Of Crude Glycerine. *Energies*, 2022, vol. 15, no. 9, a/n 3439. <https://doi.org/10.3390/en15093439>
- [18] Romagnoli F., Dorella M., Gruduls A., Collotta M., Tomasoni G. Anaerobic co-digestion of Baltic seaweeds with wheat straw and straw pellets: synergetic effects on biomethane yield and kinetic biodegradability constant. *For results 10th International Conference on Applied Energy (ICAE) (August 22-25, 2018, Hong Kong, Hong Kong), Innovative solutions for energy transitions*, 2019, vol. 158, pp. 854–860.
- [19] Gievers F., Walz M., Loewe K., Loewen A. Pelletized Straw for Biogas Production – Substrate Characterization and Methane Formation Potential. *Processes*, 2024, Vol. 12, a/n 1549. <https://doi.org/10.3390/pr12081549>
- [20] Dubrovskis V., Plume I., Straume I. The production of methane from the straw pellets with addition of enzymes. *Agronomy Research*, 2019, vol. 17, no. 4, pp. 1591–1598. <https://doi.org/10.15159/ar.19.180>
- [21] Mönch-Tegeder M., Lemmer A., Oechsner H., Jungbluth T. Investigation of the methane potential of horse manure. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 2013, vol. 15, no. 2, pp. 161-172.
- [22] Kolbl S., Stres B. Determination of lab-scale biomethane potential of wheat straw pellets and their influence on anaerobic digestion. *Acta Hydrotechnica*, 2013, vol. 26, no. 44, pp. 49-59.
- [23] Vlassis T., Stamatelatos K., Antonopoulou G., Lyberatos G. Anaerobic treatment of glycerol for methane and hydrogen production. *Global NEST Journal*, 2012, vol. 14, no. 2, pp. 149-156. <https://doi.org/10.30955/gnj.000864>
- [24] Nuchdang S., Phalakornkule C. Anaerobic digestion of glycerol and co-digestion of glycerol and pig manure. *Journal of Environmental Management*, 2012, vol. 101, pp. 164-172. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.01.031>
- [25] Harsha G., Maurya N. S. Liquid State Anaerobic Co-Digestion of Cattle Manure and Wheat Straw at Various Mix Ratio for Optimal Biogas Production. *Oriental Journal of Chemistry*, 2022, vol. 38, no. 3, pp. 777-784. <https://doi.org/10.13005/ojc/380332>
- [26] 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. <https://doi.org/10.2174/1874331502014010219>
- [27] Xavier C. A. N., Veronica Moset V., Radziah Wahid R., Möller H.B. The efficiency of shredded and briquetted wheat straw in anaerobic co-digestion with dairy cattle manure. *Biosystems Engineering*, 2015, vol. 139, pp. 16-24. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.07.008>
- [28] Taghinazhad J., Abdi R., Adl M. Kinetic and Enhancement of Biogas Production for The Purpose of Renewable Fuel Generation by Co-digestion of Cow Manure and Corn Straw in A Pilot Scale CSTR System. *International Journal of Renewable Energy Development*, 2017, vol. 6, no. 1, pp. 37-44. <https://doi.org/10.14710/ijred.6.1.37-44>
- [29] Feng Z., Yao W., Yongming S., Xiaoying K., Zhenhong Y., Xinshu Z. Effect of Feeding Ratio on Anaerobic Co-Digestion of Rice Straw and Cow Manure. *Nature Environment and Pollution Technology*, 2017, vol. 16, no. 3, pp. 837-842.
- [30] Kuris Yu.V. Bioenergy installations. Equipment and technologies for the processing of organic energy resources [Bioenerhetychni ustanovy. Obladnannia ta tekhnolohii pererobky orhanovmisnykh enerhoresursiv]. Zaporizhzhia: Zaporizhzhia State Engineering Academy, 2012. 275 p. [in Ukrainian].
- [31] Gospodarenko G.M. Ahrokhimiia [Agrochemistry]. Kyiv: LLC "SIK GROUP UKRAINE", 2018. 560 p. [in Ukrainian].
- [32] Schuster H., Moosmeyer M. Use of glycerin and polypropylene glycol, 2017. URL: https://soft-agro.com/wp-content/uploads/2017/03/Glycerin_Propylenglykol_ru.pdf.
- [33] Ivanova T., Tsygankov S., Titov, L., Dzyhun L., Klechak I., Bisko N. Vinasse Utilization into Valuable Products. Bioconversion of Wastes to Value-added Products. 2023, 245-269. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003329671>
- [34] Maj I., Kalisz S., Ciukaj S. Properties of Animal-Origin Ash – A Valuable Material for Circular Economy. *Renewable Energies*. 2022, vol. 15, A/N 1274. <https://doi.org/10.3390/en15041274>
- [35] Maj I., Kalisz S., Szymajda A., Łaska G., Gołombek K. The influence of cow dung and mixed straw ashes on steel corrosion. *Renewable*

Energy. 2021, vol. 177. pp. 1198-1211.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.06.019>

- [36] Nayan N., van Erven G., Kabel M.A., Sonnenberg A.S.M., Hendriks W.H., Cone J.W. Improving ruminal digestibility of various wheat straw types by white-rot fungi. *Journal of the*

Science of Food and Agriculture, 2019, vol. 99, no. 2. pp. 957-965.
<https://doi.org/10.1002/jsfa.9320>

- [37] Foerster E., Roenz B. Methods of correlation and regression analysis. Berlin: Verlag Die Wirtschaft, 1979, 302 p.

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: polishchuk@nubip.edu.ua



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



Войтюк Валерий. Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, доктор технических наук, профессор. Основная область исследований: технологии и технические средства производства биотоплива.

E-mail: voytyuk@nubip.edu.ua



Хмелевский Василий. Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, доктор технических наук, профессор. Основная область исследований: технологии и технические средства для сбора и переработки органического сырья.

E-mail: khmelovskiy@nubip.edu.ua



Титова Людмила. Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, кандидат технических наук, доцент. Основное направление научных исследований: технологии и технические средства производства биотоплива.

E-mail: L.titova@nubip.edu.ua



Еременко Александр. Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, кандидат технических наук, доцент. Основная область исследований: инженерное сопровождение технологических процессов производства гранулированного биотоплива.

E-mail: eremolex@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



Валиев Тимур. Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, аспирант. Основная область исследований: технологии и технические средства производства биогаза.

E-mail: timurvaliev@gmail.com