

Increasing the Production of Electrical and Thermal Energy in Biogas Plants through the Optimal Addition of Agricultural Waste

**Polishchuk V.M., Shvorov S.A., Pasichnik N.A., Davidenko T.S., Valiev T.O.,
Dvornyk Ye.O.**

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

Abstract. The aim of the work is to increase the yield of biogas, and, accordingly, the generation of electrical and thermal energy in biogas plants by optimally adding agricultural production waste to cattle manure. To achieve the goals set, the following tasks were solved: the yield of biogas from cattle manure was determined with the addition of various volumes of organic waste during periodic loading of the digester; on the basis of the experimental data obtained, the unimodality interval was found for the maximum yield of biogas during the fermentation of cattle pus with the addition of organic waste; Using the dichotomy method, the optimal dosage volume of various types of organic wastes into the substrate for quasi-continuous loading of the digester was calculated. Experimental studies were carried out on a biogas laboratory plant with a useful volume of 30 liters in a mesophilic mode. The most significant result is the determination, using the dichotomy method, of the optimal volumes of organate, starch, flour, whey, wastewater from wineries, crude glycerin, fuse, soap stock and molasses to manure pus to increase the biogas yield. As a result of the research, the optimal dosage formulation of various types of organic waste was substantiated to intensify the fermentation of cattle manure. The significance of the research results lies in the fact that with the optimal addition of these cosubstrates to the digester using special dispensers, the biogas yield increases from 1.4 l/h. kg of dry organic matter and above.

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

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2023.4-60.07>

UDC: 621.18:621.182

Creșterea producției de energie electrică și termică în instalațiile de biogaz datorită adăugării optime a deșeurilor agricole

Polisciuk V.N., Șvorov S.A., Pasicinik N.A., Davidenko T.S., Valiev T.O., Dvornik E.A.

Universitatea Națională de Bioresurse și Managementul Naturii din Ucraina, Kiev, Ucraina

Rezumat. Scopul lucrării este creșterea randamentului de biogaz și, în consecință, generarea de energie electrică și termică în instalațiile de biogaz prin adăugarea optimă a deșeurilor de producție agricolă la gunoiul de grajd. Pentru atingerea obiectivelor stabilite s-au rezolvat următoarele sarcini: s-a determinat randamentul de biogaz din gunoi de grajd de bovine prin adăugarea diferitelor volume de deșeuri organice în timpul încărcării periodice a digesterului; pe baza datelor experimentale obținute s-a constatat intervalul de unimodalitate pentru randamentul maxim de biogaz în timpul fermentației puroiului de bovine cu adaos de deșeuri organice; Folosind metoda dihotomiei, a fost calculat volumul optim de dozare a diferitelor tipuri de deșeuri organice în substrat pentru încărcarea cvasi-continuu a digesterului. Au fost efectuate studii experimentale pe o instalație de laborator de biogaz cu un volum util de 30 de litri în regim mezofil. Rezultatul cel mai semnificativ este determinarea, prin metoda dihotomiei, a volumelor optime de organat, amidon, făină, zer, ape uzate din crame, glicerină brută, fuzibil, stoc de săpun și melasă la puroi pentru a crește randamentul de biogaz. În urma cercetărilor, a fost fundamentată formularea optimă de dozare a diferitelor tipuri de deșeuri organice pentru a intensifica fermentația gunoiului de grajd de bovine. Semnificația rezultatelor cercetării constă în faptul că, odată cu adăugarea optimă a acestor cosubstrate la digesterul folosind dozatoare speciale, randamentul de biogaz crește de la 1,4 l/h. kg de materie organică uscată și peste.

Cuvinte-cheie: deșeuri organice, substrat, materie organică uscată, instalație de biogaz, digester, biogaz, gunoi de grajd bovin, fermentație metan.

Повышение выработки электрической и тепловой энергии на биогазовых установках за счет оптимального добавления сельскохозяйственных производственных отходов

Полищук В.Н., Шворов С.А., Пасичник Н.А., Давиденко Т.С., Валиев Т.О., Дворник Е.А.

Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, Киев, Украина

Аннотация. Актуальной проблемой сегодняшнего дня является промышленное производство биометана с помощью биогазовых установок из органических отходов сельскохозяйственных производств и некондиционной продукции, которые экологически опасны для окружающей среды. Целью работы является повышение выхода биогаза, а, соответственно, выработки электрической и тепловой энергии на биогазовых установках за счет оптимального добавления к навозу крупного рогатого скота

сельскохозяйственных производственных отходов. Для достижения поставленных целей решались следующие задачи: определялся выход биогаза из навоза крупного рогатого скота с добавлением различных объемов органических отходов при периодической загрузке метантенка; на основе полученных экспериментальных данных осуществлялось нахождение интервала унимодальности для максимального выхода биогаза при сбраживании гноя крупного рогатого скота с добавлением органических отходов; с помощью метода дихотомии рассчитывался оптимальный объем дозировки различных видов органических отходов в субстрат для квазинепрерывной загрузки метантенка. Экспериментальные исследования проводились на биогазовой лабораторной установке полезным объемом 30 л в мезофильном режиме с газгольдером мокрого типа. Наиболее существенным результатом является определение с использованием метода дихотомии оптимальных объемов органата, крахмала, муки, сыворотки, сточных вод винодельческих производств, сырого глицерина, фуза, soapстока и мелясы к гною навоза для повышения выхода биогаза. В результате проведенных исследований обоснована оптимальная рецептура дозировки различных видов органических отходов для интенсификации сбраживания навоза крупного рогатого скота. Значимость результатов исследований состоит в том, что при оптимальном добавлении в метантенк с помощью специальных дозаторов, указанных косубстратов выход биогаза увеличивается от 1.4 л/ч. кг сухого органического вещества и выше. При этом имеющиеся органические отходы, которые сваливают на стихийных полигонах, способны полностью обеспечить биогазовые заводы высокоэффективными косубстратами, что позволит сократить сроки окупаемости биогазовых установок до 6.4 лет.

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

LIST OF ABBREVIATIONS

ВРХ – навоз крупного рогатого скота; СВ – сухое вещество; COB – сухое органическое вещество; ХПК – химическое потребление кислорода; VS – летучее твердое вещество.

ВВЕДЕНИЕ

Современное животноводство сталкивается с огромным количеством энергетических и экологических проблем. Навоз крупного рогатого скота (КРС), в результате его накопления, является потенциальным источником возникновения экологического неблагополучия не только на фермах КРС, но и для всей экосистемы. При хранении навоза может выделяться метан, влияние которого на парниковый эффект в десятки раз сильнее, чем CO₂. С другой стороны, навоз КРС совместно с другими отходами сельского хозяйства можно эффективно утилизировать путем анаэробного сбраживания в биогазовых установках, получая при этом биогаз, электрическую и тепловую энергию, ценное органическое удобрение, а также снижать при этом выбросы парниковых газов.

Эффективная технология производства биогаза из отходов животноводства предусматривает использование дополнительных видов сырья, что позволяет увеличивать мощность отдельных биогазовых заводов, а также оптимизировать и стабилизировать технологический процесс выработки биогаза. Одним из самых перспективных видов такого

дополнительного сырья являются производственные отходы органата, крахмала, муки, сыворотки, сточных вод винодельческих производств, сырого глицерина, фуза, soapстока, мелассы и им подобные. Однако, на сегодняшний день недостаточно полно изучены вопросы эффективной совместной переработки вышеперечисленных отходов путем их сбраживания в биогазовых установках (БГУ) с целью повышения выхода биогаза и производных энергоресурсов (тепла, электроэнергии, биометана), снижения выбросов парниковых газов, что является актуальной научно-технической задачей.

I. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Как известно, в современных БГУ навоз КРС часто используется для получения биогаза, из которого производится электрическая и тепловая энергия, а также высококачественные удобрения. Однако, вследствие наличия в навозе КРС большого количества сырой клетчатки, выход биогаза при его сбраживании в биогазовых установках относительно низок. Поэтому актуальной задачей в условиях энергетического кризиса является повышение выхода биогаза из навоза КРС за счет автоматизированного составления меню косубстратов и их оптимального добавления

в БГУ различных видов органических отходов как стимулирующих процесс брожения добавок. Если такая стимулирующая добавка является отходом производства и при этом решается задача ее утилизации, то в этом случае улучшается и экологическая ситуация в регионе.

Экономическая эффективность действующих биогазовых установок сейчас очень низкая. Ни одна из них не имеет удовлетворительного срока окупаемости инвестиций.

В целях повышения выхода биогаза и выработки энергии, в настоящее время широко практикуется совместное сбраживание гноя крупного рогатого скота с силосом кукурузы. Вместе с тем данное сырье можно использовать как продукты питания для человека и как корм для животных. Поэтому для повышения выхода биогаза из навоза крупного рогатого скота целесообразно использовать более дешевое сырье [1-5], стимулирующее выход биогаза – отходы производств, которые необходимо утилизировать с минимальными затратами, улучшая при этом экологию. Однако в настоящее время недостаточно полно решены проблемные задачи автоматизации составления меню различных видов ко субстратов для повышения выхода биогаза на основе интенсификации сбраживания навоза ВРХ, не обоснованы объемы добавления наиболее распространенных органических отходов к субстрату.

II. АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В результате переработки сельскохозяйственного сырья получают эколого опасные сточные воды крахмальных и винодельческих производств, сыворотку, сырой глицерин, масляный осадок, соапсток, барда, некондиционную муку и т.п., которые можно использовать в качестве ко субстрата в биогазовых установках для увеличения выхода биогаза.

В работе [4] утверждается, что выход биогаза при сбраживании барды составляет 0,88 л/г VS, в работе [5] – выход биометана из барды сахарного тростника – 435 л/kg VS, в работе [6] – выход биометана с барды сахарного тростника – 605 л/kg VS, а в [9] – выход биометана из барды – 0,78 л/g VS.

Проводились исследования использования сточных вод крахмальных производств из

картофеля и кассы (маниока обыкновенного) для производства биогаза. Так, в работе [8] указано, что крахмальные производства сильно загрязняют экосистему. В работе [9] отмечается, что, по меньшей мере, 0,6 м³ сточных вод образуется при обработке 1 тонны маниоки или 2,4 м³ сточных вод для каждой тонны полученного крахмала. При их сбраживании при температуре 33±1 С самый большой суточный выход биогаза составлял 0,65 л/л в течение 8,3 суток. В работе [10] описан процесс непрерывного сбраживания сточных вод производства крахмала из кассы с подачей 1,18; 1,28; 1,57 и 2,68 г химического содержания кислорода на литр реактора в сутки, при гидравлическом содержании 15; 13; 8,3 и 6,6 суток. При этом был получен суточный выход биогаза в 0,52; 0,41; 0,65 и 0,63 л/л соответственно. В работе [11] при сбраживании сточных вод крахмального производства из кассы была достигнута максимальная суточная производительность по биогазу в 3,7 л/л. Средний выход биогаза составил 0,36 л/г химического содержания кислорода. Содержание метана в биогазе находилось в диапазоне 69-81%. Производство биогаза из отходов картофеля при температуре 38 С и рН 5-7,5 рассматривалось в работе [12]. Через 10-15 суток выход биогаза составлял 400-650 м³/т сухого вещества. Биогаз содержал 52-72% метана. Сбраживание смеси крахмала и гноя крупного рогатого скота исследовало в работе [13]. Было установлено, что добавление картофельного крахмала к навозу крупного рогатого скота увеличивало выход метана с 4230 л/м³ до 8625 л/м³ при гидравлическом времени содержания 29 суток. Увеличение гидравлического времени удерживания до 56 суток оказывало незначительное влияние на продуцирование метана.

Сырой глицерин является побочным продуктом производства биодизеля. Выход биогаза при совместном сбраживании сырого глицерина и свалочного фильтрата составляет 403,15 мл/г VS [14]. Добавление 2,5% сырого глицерина к субстрату увеличило выход биометана на 36% (1058,9 л/kg VS) [15]. При совместном сбраживании гноя крупного рогатого скота и сырого глицерина (6%) выход биометана составляет 0,59 м³/kg VS [16].

Соапсток образуется в результате нейтрализации биодизеля, а после его промывки смешиваясь с водой превращается в

сточные воды производства биодизеля. Выход биометана при сбраживании сточных вод производства биодизеля с содержанием соапстока составляет 937 л/кг VS [17], а сточных вод производства переработки рыбы с содержанием соапстока составляет 775 л/кг VS [20].

Как указано в работе [19], потенциал по биометану отработанного растительного масла составляет 775 мл/г VS, а в работе [20] – стоков пальмового масла – 0,50 л/г VS. Выход биогаза из осадка масла, полученного из микроводорослей (*Chlorella* sp., *Nannochloropsis* sp. и *Scenedesmus* sp.), составляет 500 мл/г VS [21].

Добавление сыворотки к свиному навозу при температуре брожения 32 С позволяет получить выход биогаза 250 л/кг VS [22]. В работе [23] утверждается, что добавление кисломолочной сыворотки к навозу КРС увеличивает выход биогаза на 10%, а в работе [24] – на 84%.

В работе [25] статистическим методом было сгруппировано 20 различных видов сырья, разделенных на 5 типов: суспензия с низким содержанием клетчатки, суспензия с высоким содержанием волокна, смесь соломы и гноя, суспензия соломы и активный ил. В работе [26] проведен анализ патентной деятельности по производству биогаза и установлено, что наиболее популярным сырьем является активный ил, сточные воды, отходы животноводства и сельского хозяйства.

Анализ проведенных исследований показывает, что требуется дальнейшее изучение вопроса интенсификации выхода биогаза из субстрата на основе КРС, что может быть достигнуто добавлением к нему отходов сельскохозяйственных производств. При этом необходимо определить оптимальные соотношения отходов производств и КРС, при которых обеспечивается максимальный выход биогаза.

Целью работы является повышение выхода биогаза, выработки электрической и тепловой энергии на биогазовых установках за счет оптимального добавления к навозу крупного рогатого скота сельскохозяйственных производственных отходов.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи: определялся

выход биогаза из навоза крупного рогатого скота с добавлением различных объемов органических отходов при периодической загрузке метантенка; на основе полученных экспериментальных данных осуществлялось нахождение интервала унимодальности для максимального выхода биогаза при сбраживании гноя крупного рогатого скота с добавлением органических отходов; с помощью метода дихотомии рассчитывался оптимальный объем дозировки различных видов органических отходов в субстрат для квазинепрерывной загрузки метантенка.

III. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследование процесса метанового брожения образцов органических материалов в работе проводился с помощью метода периодического сбраживания.

Процесс метанового брожения инициировался на основе смешивания порции образца органического материала с инокулятом (суспензия, содержащая стартовую популяцию жизнеспособных метанообразующих бактерий) в биореакторе, герметизации биореактора и поддержании постоянной температуры $40 \pm 1^\circ\text{C}$. Для анализа воспроизводимости результатов исследований смеси готовились и сбраживались в 3-х повторах.

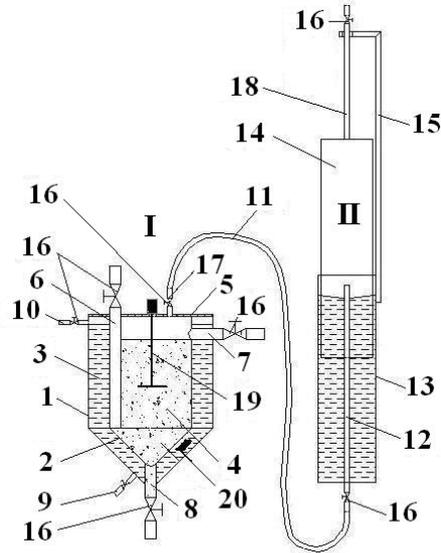
Для проведения исследования использовалась биогазовая лабораторная биогазовая установка с метантенком полезным объемом 30 л с фиксацией выхода биогаза с помощью мокрого газгольдера (рис. 1). Режим загрузки метантенка – периодический, температурный режим – мезофильный. Нагрев и контроль температуры организовано с помощью электрического обогревателя, оборудованного терморегулятором.

Для интенсивного отвода и равномерного распределения тепла от обогревателя использовалась водяная рубашка. Измерение температуры производится с помощью электронного датчика TSM-50. Объем полученного биогаза несколько раз в сутки определялся по шкале, закрепленной на направляющей 15, по высоте поднятия цилиндра-уравномера 14 газгольдера, с последующим пересчетом при известном диаметре цилиндра-уравномера, который составляет 20 см.

В метантенк загружался отмеренный объем субстрата с оптимальным добавлением сельскохозяйственных производственных

отходов, после чего кран 16 закрывался для создания анаэробного режима. Для контроля проводились исследования без добавления и с добавлением сельскохозяйственных производственных отходов в трех повторах.

При добавлении новой порции субстрата перебродивший субстрат обновлялся наполовину (коэффициент опорожнения – 0,5).



I – метантенк; II – газгольдер; 1 – наружный корпус метантенка; 2 – внутренний корпус метантенка; 3 – водяная рубашка; 4 – активная зона метантенка; 5 – крышка; 6 – труба для подачи биомассы; 7 – труба для слива шлама; 8 – труба для удаления шлама; 9 – труба для подачи воды; 10 – труба для установки уровня воды в водяной рубашке; 11 – газопровод; 12 – трубка для подачи биогаза; 13 – корпус газгольдера; 14 – цилиндр-уравномер; 15 – направляющая; 16 – кран; 17 – трубка для отвода биогаза из активной зоны метантенка; 18 – трубка для отбора газа из газгольдера; 19 – мешалка; 20 – нагреватель

Рис. 1. Схема лабораторной биогазовой установки.¹

Основным сырьем для производства биогаза в сельском хозяйстве является навоз. Навоз крупного рогатого скота уже содержит метанообразующие бактерии, что улучшает брожение. Однако выход биогаза при сбраживании гноя крупного рогатого скота незначителен и по результатам проведенных исследований составляет в среднем 0,7 л/ч кг СОР, что не позволяет быстро окупить капиталовложения, даже учитывая "зеленый" тариф на электроэнергию, произведенную из биогаза.

Для улучшения выхода биогаза рекомендуется в субстрат добавлять косубстраты органических отходов (или заменять ими воду или дигестат, которые добавляются в субстрат для достижения его оптимальной влажности). К таким косубстратам относятся: размолотое некондиционное зерно хлебных злаков, сырой глицерин, фуз, соапсток, меласса, барда и другие.

При добавлении указанных косубстратов в незначительном количестве выход биогаза, по нашим исследованиям, увеличивается до 1,4 л/ч кг СОР и выше. При этом существенно увеличивать размер метантенка, доброжевателя, резервуаров для биошлама не требуется, поскольку объем загружаемого в метантенк сырья почти не увеличится и поэтому не вызовет дополнительных капиталовложений.

Организация оптимальной дозировки разных видов органических отходов базируется на нахождении таких экспериментальных данных, при которых на каждом этапе функционирования биогазовой установки обеспечивается интенсификация брожения с максимальным выходом биогаза. После получения данных экспериментальных исследований по дозированию различных видов органических отходов осуществлялась их обработка для выявления определенных закономерностей, характера связей между

¹ Appendix 1

уровнями факторов (x) и функциями отклика (y). Обработка результатов исследований проводилась для всех полученных данных (генеральная совокупность) и выборочно для части полученных данных (выборочная оценка). Для этого по результатам экспериментальных исследований производились расчеты: средних значений; дисперсии; средних квадратичных отклонений; абсолютных погрешностей; относительных погрешностей;

коэффициентов вариации; коэффициентов корреляции; коэффициентов регрессии; определялся доверительный интервал для среднего значения; наименьшей существенной разницы; оценивалась достоверность полученных результатов (проверка нулевой гипотезы).

Для использования экспериментальных данных, приведенных в виде таблицы 1, в математической модели определялась зависимость между x и y.

Таблица 1²

Экспериментальные данные

x	x ₁	x ₂	x ₃	...	x _n
y	y ₁	y ₂	y ₃	...	y _n

Эту зависимость можно представить в виде многочлена вида:

$$y = a_0 + a_1x + \dots + a_mx^m. \quad (1)$$

Одним из методов нахождения коэффициентов уравнений, описывающих экспериментальные точки, является метод наименьших квадратов.

Взаимосвязь между переменными x и y можно описать следующей зависимостью:

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2. \quad (2)$$

Поскольку эта кривая не накладывается точно на экспериментальные точки, то при нахождении i-го значения по формуле (2) по сравнению с табличным значением y_i будет возникать погрешность:

$$y_i - a_0 - a_1x_i - a_2x_i^2 = \varepsilon_i. \quad (3)$$

Задача нахождения коэффициентов уравнения состоит в том, чтобы суммарная погрешность для всех n точек была минимальной:

$$\sum_{i=1}^n \varepsilon_i = \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1x_i - a_2x_i^2) \rightarrow \min. \quad (4)$$

Но этот критерий в расчете коэффициентов уравнения не может быть использован, поскольку есть положительные и отрицательные значения погрешностей. И если сумма ε_i и будет в уравнении (4) равна 0, то это не означает, что погрешностей нет и уравнение выбрано как наилучшее.

Учитывая это, в качестве критерия оценки полученных результатов выбран минимум суммы квадратов погрешностей:

$$\sum_{i=1}^n (\varepsilon_i)^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1x_i)^2 \rightarrow \min. \quad (5)$$

Обработка статистических данных производилась с использованием ППП MathCad. Для этого статистические данные вводились в компьютер в виде двух массивов данных таблицы 1: x_i и y_i, где x_i – значение аргумента, а y_i – значение экспериментальных данных. Данные в массивах имеют индексы от 0 до N. Соответственно количество точек в таблице равно N+1.

После того, как массивы введены, для дальнейшей работы с ними производилась их рассортировка по росту аргумента и в транспонируемом виде, преобразовав столбик данных в строку.

Квадратичная аппроксимация табличных данных, т.е. нахождение уравнения вида:

$$y = d_0 + d_1x + d_2x^2, \quad (6)$$

выполнялась с использованием метода наименьших квадратов на основе решения системы трех линейных уравнений, коэффициенты которых и правые части, находились с помощью Mathcad:

$$A1 = \begin{Bmatrix} N+1 & \sum x & \sum x^2 \\ \sum x & \sum x^2 & \sum x^3 \\ \sum x^2 & \sum x^3 & \sum x^4 \end{Bmatrix} \quad B1 = \begin{Bmatrix} \sum y \\ \sum x_i \cdot y_i \\ \sum (x_i)^2 \cdot y_i \end{Bmatrix} \quad (7)$$

После расчета A1 и B1 находились значения массива коэффициентов d_i квадратической зависимости, транспонировав вектор:

$$d = A1^{-1} \cdot B1 \quad (8)$$

Значения среднеквадратичной погрешности определялись по формуле:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_i [y_i - d_0 - d_1 x_i - d_2 \cdot (x_i)^2]^2}{N}} \quad (9)$$

В результате решения задачи с использованием ППП Mathcad, определяются коэффициенты уравнений, среднеквадратические погрешности уравнений и строится график $f(x)$.

Постановка задачи оптимизации предполагает наличие одного параметра оптимизации x (количество органических отходов) и целевой функции $f(x) \rightarrow \max$ (выход биогаза), определенной в области допустимых значений $x \in D$, где $D=[a, b]$, а a и b – действительные числа, выбранные в диапазоне $[-\infty, +\infty]$. То, что поиск оптимума ограничен поиском минимального значения, не играет существенной роли, поскольку поиск максимума $f(x)$ эквивалентен поиску минимума $-f(x)$.

При наличии нескольких решений – минимумов, точкой глобального минимума функции $f(x)$ в области допустимых значений D будет такая точка x^* , при которой выполняется условие: $f(x^*) \leq f(x)$ для всех $x \in D$.

Точкой локального минимума функции будет точка x^* , в которой при наличии положительного числа r выполняется условие:

$$f(x^*) \leq f(x) \text{ для всех } x \in \{x: |x^* - x| \leq r\}.$$

Решение данной задачи однопараметрической оптимизации может осуществляться многими методами, среди которых наиболее популярны методы: "золотого сечения" или Фибоначчи, дихотомии или половинного деления, квадратичной аппроксимации или Паулла и другие [26]. Для их использования следует сначала найти интервал $[a, b]$, внутри которого находится только одна точка минимума x^* , то есть такой интервал, на котором функция будет унимодальна. Унимодальная на интервале $a \leq x \leq b$ функция $f(x)$ будет только тогда, когда она монотонна с обеих сторон от оптимальной точки x^* . Свойством унимодальной функции является то, что когда на интервале $[a, b]$ есть две точки x_1 и x_2 , и при этом $a < x_1 < x_2 < b$, тогда

при: $f(x_1) \leq f(x_2)$ значение $x^* < x_2$, а при $f(x_1) \geq f(x_2)$ значение $x^* > x_2$.

Это свойство унимодальной функции широко используется в методах оптимизации, уменьшающих интервал $[a, b]$, таких как "золотое сечение", половинное деление и равномерный поиск.

Интервал унимодальности (неопределенности) $[a, b]$ находится последовательными растущими шагами в направлении уменьшения целевой функции до тех пор, пока она не начнет расти.

Алгоритм решения данной задачи будет состоять в последовательном выполнении следующих операций:

1. Задается начальное значение x_0 , начальная величина изменения параметра – шаг h , определяющий направление движения. Задаются два счетчика движения: направо $k=0$ и движения налево $c=0$.

2. Вычисляется значение $f(x)$ и $f(x+h)$.

3. Если $f(x+h) < f(x)$, то увеличивается x , $x = x+h$, а также увеличивается шаг вдвое ($h = 2h$), реализуется движение направо $k=1$ и выполняется переход на п. 2 или (в противном случае) – переход на п. 4.

4. Проверяется, было ли движение направо $k=1$, если было – переход на п. 6 или (в противном случае) – переход на п. 5.

5. Проверяется, было ли движение налево $c=1$, если было – переход на п. 6 или (в противном случае) меняется направление движения $h = -h$, реализуется движение налево $c=1$ и выполняется переход на п. 2.

6. Поиск останавливается и определяется интервал неопределенности, в котором $a = x - |h|$, а $b = x + |h|$.

После нахождения интервала унимодальности, можно перейти к нахождению оптимального значения целевой функции на каждом этапе функционирования БГУ наиболее простым методом однопараметрической оптимизации – методом дихотомии.

Схема решения данной задачи оптимизации методом дихотомии показана на рис. 2. При этом метод дихотомии используется для нахождения оптимума целевой функции на интервале унимодальности.

Согласно схеме алгоритма на интервале $[a, b]$ выбирается две точки относительно середины интервала

$$x_1 = (a + b)/2 - \varepsilon/2 \text{ и } x_2 = (a + b)/2 + \varepsilon/2,$$

где ε – заданная точность, некоторая малая величина $\varepsilon > 0$.

Далее вычисляются значения функции в этих точках и сравниваются между собой с помощью следующих правил:

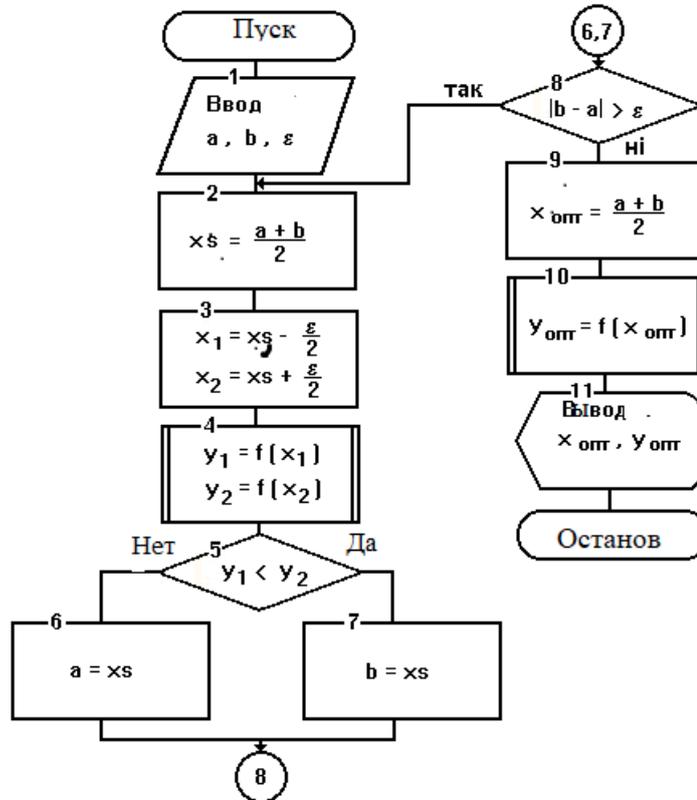


Рис. 2. Схема алгоритма оптимальной дозировки органического вещества методом дихотомии³

если $f(x_1) < f(x_2)$, то оптимум находится на интервале $[a, x_2]$; если $f(x_1) > f(x_2)$, то оптимум ($x_{\text{опт}}$) находится на интервале $[x_1, b]$; если $f(x_1) = f(x_2)$, то оптимум ($x_{\text{опт}}$) находится в интервале $[x_1, x_2]$.

После этого длина отрезка сужается путем переноса точки a или b внутрь отрезка. Отрезок сужается пополам до тех пор, пока его длина не станет меньше заданной точности.

На основе применения данного математического аппарата получено сравнение динамики выхода биогаза при моносбраживании гноя КРС и с оптимальным добавлением различных косубстратов органических отходов (рис. 3).

С рис. 3 видно, что интенсификация и наибольший выход биогаза в пределах интервала унимодальности обеспечивается только при оптимальном добавлении к субстрату, а именно: крахмала 5% СОР от СОР субстрата; 2,3% муки от массы субстрата; 34,2% СОР сырого глицерина в СОР субстрата; 1,3% фуза от массы субстрата; 1,2% соапстока от массы субстрата; 10,6% мелесной барды от

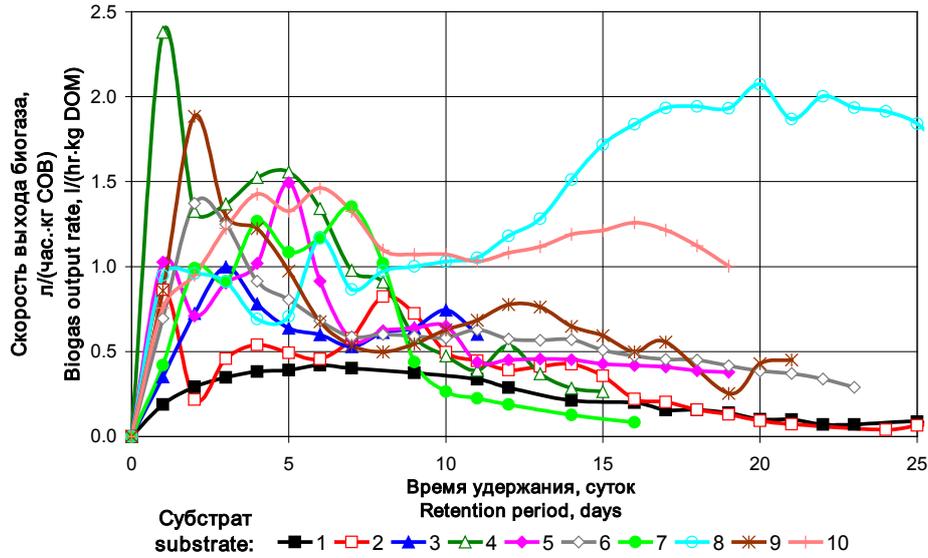
массы субстрата, с заменой 60% воды в субстрате сывороткой; с заменой 13% воды в субстрате со сточными водами виноделия.

Сравнение накопленных выходов биогаза при сбраживании вышеуказанных субстратов приведена на рис. 4.

Результаты сравнения накопленных выходов биогаза (рис. 4) позволяют предоставить практические научно обоснованные методические рекомендации по оптимальному дозированию и интенсивному сбраживанию различных видов органических отходов.

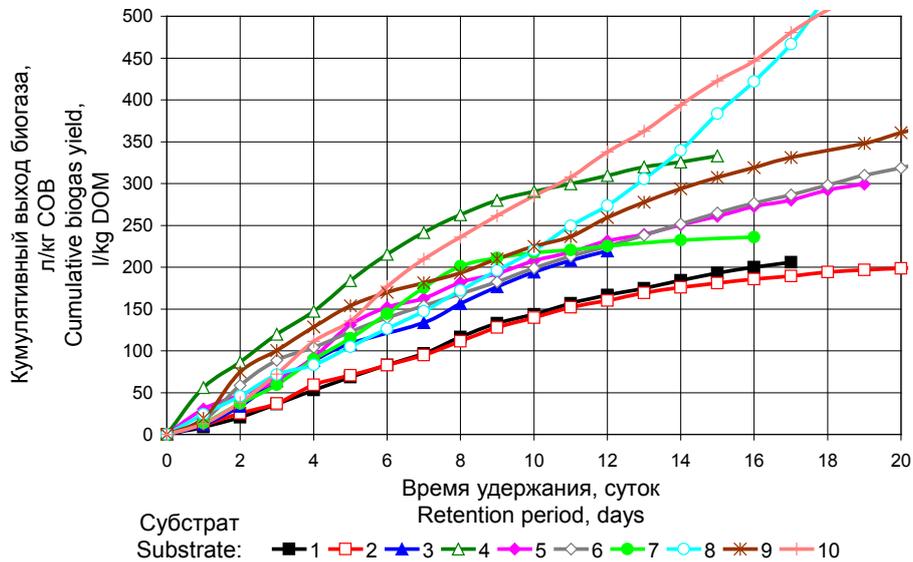
С помощью метода дихотомии определены оптимальные объемы дозировки органата, крахмала, муки, сыворотки, сточных вод винодельческих производств, сырого глицерина, фуза, соапстока и мелесной барды к основному субстрату (навозу крупного рогатого скота) для квазинепрерывной загрузки метантенка..

значительно улучшить экологическую обстановку в регионе и обеспечить срок окупаемости биогазовой установки до 6,4 лет.



1 – контрольный сплошной субстрат КРС; 2 – смесь органата и гноя КРС; 3 – навоз КРС с добавлением 5% СОР от СОР субстрата крахмала; 4* – субстрат с добавлением 2,3% муки от массы субстрата; 5* – субстрат с заменой 60% воды сывороткой; 6 – субстрат с заменой 13% воды сточными водами винодельческих производств; 7 – навоз КРС с дозировкой 34,2% СОР сырого глицерина до СОР субстрата; 8 – гной КРС с дозировкой 1,3% фуза от массы субстрата; 9 – навоз КРС с дозировкой 1,2% соапстока от массы субстрата; 10 – навоз КРС с дозировкой 10,6% мелесной барды от массы субстрата
* – брожение при температуре 40°C

Рис. 3. Динамика интенсивного выхода биогаза при сбраживании разных субстратов. ⁴



1 – контрольный сплошной субстрат КРС; 2 – смесь органата и гноя КРС; 3 – навоз КРС с добавлением 5% СОР от СОР субстрата крахмала; 4* – субстрат с добавлением 2,3% муки от массы субстрата; 5* – субстрат с заменой 60% воды сывороткой; 6 – субстрат с заменой 13% воды сточными водами винодельческих производств; 7 – навоз КРС с дозировкой 34,2% СОР сырого глицерина до СОР субстрата; 8 – гной КРС с дозировкой 1,3% фуза от массы субстрата; 9 – навоз КРС с дозировкой 1,2% соапстока от массы субстрата; 10 – навоз КРС с дозировкой 10,6% мелесной барды от массы субстрата
* – брожение при температуре 40°C

Рис. 4. Сравнение накопленных выходов биогаза при оптимальной дозировке косубстратов и их сбраживании (температура брожения 40°C) ⁵

Таким образом, в условиях энергетического кризиса значимость результатов исследований состоит в том, что с помощью специальных дозаторов при оптимальном добавлении в метантенки промышленных биогазовых заводов указанных органических отходов выход биогаза увеличивается от 1,4 л/ч. кг сухого органического вещества и выше, что позволяет

V. ВЫВОДЫ

1. В условиях работы сельскохозяйственного предприятия животноводческого типа накапливается достаточно большое количество животноводческих отходов (как правило, навоза крупного рогатого скота), которые необходимо использовать в качестве сырья для производства биогаза. Однако выход биогаза из цельного навоза крупного рогатого скота недостаточен для быстрой окупаемости капиталовложений в биогазовую установку. Для интенсификации брожения и повышения выхода биогаза к навозу крупного рогатого скота необходимо добавлять косубстраты, в качестве которых можно использовать отходы перерабатывающих производств.

2. Разработаны методические основы интенсификации брожения, основанные на нахождении интервала унимодальности, в пределах которого с помощью метода

дихотомии рассчитываются оптимальные объёмы добавок к субстрату в виде отходов сельскохозяйственных производств, при которых обеспечивается повышение выхода биогаза.

3. Сформулированы методические рекомендации по увеличению выхода биогаза на промышленных биогазовых заводах, использование которых позволяет улучшить экологическую обстановку в регионе и получить дополнительные энергетические ресурсы. При этом имеющиеся органические отходы, которые сваливают на стихийных полигонах, способны полностью обеспечить биогазовые заводы высокоэффективными косубстратами, что позволит значительно сократить сроки окупаемости биогазовых установок до 6,4 лет.

4. В рамках продолжения данной работы на основе предлагаемого научно-методического аппарата целесообразно в зависимости от условий эксплуатации для конкретной биогазовой установки проводить обоснование технологического оптимума добавления в метантенки БГУ сельскохозяйственных производственных отходов.

Appendix 1

¹**Fig. 1.** Schematic of a pilot plant for batch methane fermentation: 1 - capacity of the bioreactor; 2 - fixed part of the eudiometer; 3 - moving part of the eudiometer; 4 - container with coolant; 5 - PVC tube; 6 - gas cock; 7 - gas analyzer; 8 - working environment of the bioreactor; 9 - internal space of the eudiometer with biogas; 10 - coolant (water); 11 - 5% aqueous NaCl solution; 12 - mercury thermometer; 13 - thermostat ($\Delta T = \pm 1^\circ \text{C}$).

³**Fig. 2.** Cumulative flow of biogas in time during fermentation of mixtures No. 1-No. 3.

⁴**Fig. 3.** Cumulative flow of biogas in time during fermentation of mixtures No. 4-No. 6.

⁵**Fig. 4.** Cumulative velocity of biogas flow in time during fermentation of mixtures No. 1-No. 3.

²**Table 1.** Experimental data.

Библиография (References)

- [1] Bhatnagar, N., Ryan, D., Murphy, R., Enright, A.M. Trace Element Supplementation And Enzyme Addition To Enhance Biogas Production by Anaerobic Digestion of Chicken Litter. *Energies*. 2020. Vol. 13, Iss. 13. AN. 3477. doi: 10.3390/en13133477.
- [2] Polishchuk, V.M., Shvorov, S.A., Tarasenko, S.Ye., Antypov, I.O. (2020). Increasing the

Biogas Release During the Cattle Manure Fermentation by Means of Rational Addition of Substandard Flour as a Cosubstrate. *Science and innovation*. 16 (4). 25-35. doi: <https://doi.org/10.15407/scin16.04.025>.

- [3] Rogovskii, I.L., Polishchuk, V.M., Titova, L.L., Sivak, I.M., Vyhovskiy, A.Yu., Drahnev, S.V., Voinash, S.A. (2020). Study of Biogas During Fermentation of Cattle Manure Using A Stimulating Additive In Form Of Vegetable Oil Sediment. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 15 (22). 2652-2663.
- [4] Rana, Q.U., Khan, M.A.N., Shiekh, Z., Parveen, S., Ahmed, S., Irfan, M. et al. (2021). Production of bioethanol and biogas from *Spirodela polyrhiza* in a biorefinery concept and output energy analysis of the process. *Biomass Conversion and Biorefinery*. Early Access NOV 2021. doi: 10.1007/s13399-021-02066-9.
- [5] Kiani, M.K.D., Parsaee, M., Mahdaviifar, Z. (2021). Biogas production from sugarcane vinasse at mesophilic and thermophilic temperatures by static granular bed reactor (SGBR). *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 48. 101569. doi: 10.1016/j.seta.2021.101569.
- [6] Volpi, M.P.C., Brenelli, L.B., Mockaitis, G.,

- Rabelo, S.C., Franco, T.T., Moraes, B.S. (2021). Use of Lignocellulosic Residue from Second-Generation Ethanol Production to Enhance Methane Production Through Co-digestion. *Bioenergy Research*. Early Access JUN 2021. doi: 10.1007/s12155-021-10293-1.
- [7] Iltchenko, J., Peruzzo, V., Magrini, F.E., Marconatto, L., Torres, A.P., Beal, L.L., Paesi, S. (2021). Microbiota profile in mesophilic biodigestion of sugarcane vinasse in batch reactors. *Water Science and Technology*. 84 (8). 2028-2039. doi: 10.2166/wst.2021.375.
- [8] Kuczman, O., Tavares, M.H.F., Gomes, S.D., Guedes, L.P.C., Grisotti, G. (2014). Cassava Starch Extraction Effluent Treatment in a One Phase Tubular Horizontal Pilot Reactor with Support Medium. *Engenharia Agricola*. 34 (6). 1270-1282. doi: 10.1590/S0100-69162014000600021.
- [9]. Kuczman, O., Tavares, M.H.F., Gomes, S.D., Torres, D.G.B., Fleck, L. (2013). Influence of hydraulic retention time on the anaerobic treatment of cassava starch extraction effluent using a one-phase horizontal reactor. *Journal of Food Agriculture & Environment*. 11 (1). 1118-1120.
- [10] Kuczman, O., Gomes, S.D., Tavares, M.H.F., Torres, D.G.B., Alcantara, M.S. (2011). Specific biogas production from manipueira at one-phase reactor. *Engenharia Agricola*. 31 (1). 143-149. doi: 10.1590/S0100-69162011000100014.
- [11] Colin, X., Farinet, J.L., Rojas, O., Alazard, D. (2007). Anaerobic treatment of cassava starch extraction wastewater using a horizontal flow filter with bamboo as support. *Bioresource Technology*. 98 (8). 1602-1607. doi: 10.1016/j.biortech.2006.06.020.
- [12] Fugol, M., Szlachta, J. (2013). Use of the potato industry waste for anaerobic digestion. *Przemysl Chemiczny*. 92 (5). 824-828.
- [13] Clemens, J., Trimborn, M., Weiland, P., Amon, B. (2004). Mitigation of greenhouse gas emissions by anaerobic digestion of cattle slurry. *Agriculture ecosystems & Environment*. 112 (2-3). SI. 171-177. doi: 10.1016/j.agee.2005.08.016.
- [14] Takeda, P.Y., Gotardo, J.T., Gomes, S.D. (2020). Anaerobic co-digestion of leachate and glycerol for renewable energy generation. *Environmental Technology*. Early Access SEP 2020. doi: 10.1080/09593330.2020.1818832.
- [15] Schwingel, A.W., Orrico, A.C.A., de Lucas, J., Orrico, M.A.P., Borquis, R.R.A., Fava, A.F. (2019). Laying hen manure in anaerobic Co-Digestion with glycerin containing different glycerol and impurity levels. *Journal of Cleaner Production*. 215. 1437-1444. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.01.125.
- [16] Ormaechea, P., Castrillon, L., Suarez-Pena, B., Megido, L., Fernandez-Nava, Y., Negral, L., Maranon, E., Rodriguez-Iglesias, J. (2019). Enhancement of biogas production from cattle manure pretreated and/or co-digested at pilot-plant scale. Characterization by SEM. *Renewable Energy*. 126. 897-904. doi: 10.1016/j.renene.2018.04.022.
- [17] Borowski, S., Cieciora-Wloch, W. (2021). Enzymatic Pretreatment of Byproducts from Soapstock Splitting and Glycerol Processing for Improvement of Biogas Production. *Molecules*. 26 (22). 6782. doi: 10.3390/molecules26226782.
- [18] Sarker, S. (2020). By-products of fish-oil refinery as potential substrates for biogas production in Norway: A preliminary study. *Results in Engineering*. 6. 100137. doi: 10.1016/j.rineng.2020.100137.
- [21] El-Dalatony, M.M., Sharma, P., Hussein, E.E., Elnaggar, A.Y., Salama, E.S. (2022). Pig- and vegetable-cooked waste oils as feedstock for biodiesel, biogas, and biopolymer production. *Biomass Conversion and Biorefinery*. Early Access JAN 2022. doi: 10.1007/s13399-021-02281-4.
- [22] Lim, Y.F., Chan, Y.J., Abakr, Y.A., Sethu, V., Selvarajoo, A., Singh, A., Lee, J.Y., Gareth, M. (2021). Evaluation of potential feedstock for biogas production via anaerobic digestion in Malaysia: kinetic studies and economics analysis. *Environmental Technology*. Early Access FEB 2021. doi: 10.1080/09593330.2021.1882587 4.
- [23] Torres, A., Padrino, S., Brito, A., Diaz, L. (2021). Biogas production from anaerobic digestion of solid microalgae residues generated on different processes of microalgae-to-biofuel production. *Biomass Conversion and Biorefinery*. Early Access SEP 2021. doi: 10.1007/s13399-021-01898-9.
- [24] Antonelli, Jh., Lindino C.A., de Azevedo L.C.R., Souza S.N. (2016). Biogas production by the anaerobic digestion of whey. *Revista de Ciencias Agrarias*. 39 (3). 463-468. doi: 10.19084/RCA15087.
- [25] Hegde, S., Win, S.S., Trabold, T.A. (2017). Stabilizing the Anaerobic Digestion of Food Waste for Biomethane Production. *Proceedings of the Asme 11th International Conference on Energy Sustainability (Charlotte, NC), 2017*. Art. nr.: UNSP V001T02A002.
- [26] Vivekanand, V., Mulat, D.G., Eijsink, V.G.H. (2018). Synergistic effects of anaerobic co-digestion of whey, manure and fish ensilage. *Bioresource Technology*. 249. 35-41. doi: 10.1016/j.biortech.2017.09.169.
- [27] Yang, Y., Zhu, H.G. (2020). Clustering and modelling of rheological parameters for anaerobic digestion materials (ADMs) and its application for feed pump selection. *For results 4th International Conference on Energy Engineering and Environmental Protection*

(EEEE) (November 19-21, 2019, Xiamen, China), IOP Conference Series-Earth and Environmental Science. 467. 012053. doi: 10.1088/1755-1315/467/1/012053.

[28] Grando R.L., da Fonseca F.V., de Souza Antunes

A.M. (2017). Mapping of the Use of Waste as Raw Materials for Biogas Production. Journal of Environmental Protection.8. 120-130. doi: 10.4236/jep.2017.82010.

Сведения об авторах.



Полищук Виктор Николаевич. Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, кафедра охраны труда и биотехнических систем в животноводстве, доктор технических наук, профессор. Основная область исследований: технологии и технические средства производства биотоплива.

E-mail: polischuk.v.m@gmail.com



Пасичник Наталья Анатольевна. Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины. Кандидат сельскохозяйственных наук, доцент. Основная область исследований: технологии конверсии биомассы в биогаз по сокращенной ферментации, переработка побочных продуктов растениеводства в топливо, биологические корма и удобрения.

E-mail: N.Pasichnyk@nubip.edu.ua



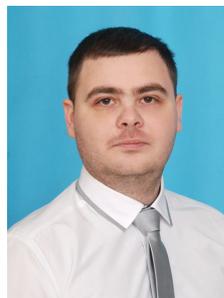
Валиев Тимур Одылович. Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, кафедра охраны труда и биотехнических систем в животноводстве, аспирант. Основная область исследований: технологии и технические средства производства биогаза.

E-mail: timurvaliev@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 систем сбора и переработки органического сырья.

E-mail: sosdok@nubip.edu.ua



Давиденко Тарас Сергеевич. Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, кафедра автоматике и робототехнических систем имени академика И.И. Мартыненко, аспирант. Основная область исследований: автоматизация технологических процессов.

E-mail: davidenkotaras009@gmail.com



Дворник Евгений Алексеевич. Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, кафедра охраны труда и биотехнических систем в животноводстве, аспирант. Основное направление исследований: технологии и технические средства производства биогаза.

E-mail: dvornykevgen@gmail.com