

Резюмета на научни публикации на английски и български, съгласно минималните национални критерии по ЗРАСРБ и допълнителните изисквания на ИМик-БАН

на гл. ас. д-р Елена Йорданова Чорукова

за участие в конкурс за заемане на академична длъжност „доцент“ в област на висшето образование 5. Технически науки, професионално направление 5.11. Биотехнологии (специалност: Биотехнология), обявен в ДВ бр. 21 от 14.03.2025, за нуждите на Лаборатория „Биоремедиация и биогорива“, Департамент „Биотехнология“, Институт по микробиология „Стефан Ангелов“ при БАН

Публикации са разпределени по групи показатели съгласно изискванията на ЗРАСРБ в съответното професионално направление, както следва: общо 33 публикации, 10 включени по показател В и 23 по показател Г.

Публикации по Група от показатели В на ЗРАСРБ

1. **Chorukova E.**, Hubenov V, Gocheva Y., Simeonov I. Two-Phase Anaerobic Digestion of Corn Steep Liquor in Pilot Scale Biogas Plant with Automatic Control System with Simultaneous Hydrogen and Methane Production. Applied Sciences, 2022, 12(12), 6274. (ISSN: 2076-3417, <https://doi.org/10.3390/app12126274>) (Q2)

Abstract:

Experimental studies of two-phase anaerobic digestion of corn steep liquor in semi-continuous automatic and semi-automatic modes of operation of a cascade of two anaerobic bioreactors with monitoring and control systems were performed. Corn steep liquor – a waste product from the process of treating corn grain for starch extraction – was used as a substrate in the process of anaerobic digestion with simultaneous hydrogen and methane production. The daily yields of biohydrogen in bioreactor 1 of the cascade (with a working volume of 8 dm³) are variable. In good operation, they are in the range of 0.7 to 1.0 L of biogas from a 1 dm³ working volume of the bioreactor, and the optimal pH is in the range of 5.0–5.5. The concentration of hydrogen in the biogas from the hydrogen bioreactor 1 is in the range of 14–34.7%. The daily yields of biomethane in bioreactor 2 of the cascade (with a working volume of 80 dm³) vary in the range 0.4 to 0.85 L of biogas from a 1 dm³ working volume of the bioreactor, and the concentration of methane in the biogas from bioreactor 2 is high and remains practically constant (in the range 65–69%). At a dilution rate of 0.4 day⁻¹ and an organic loading rate of 20 g/L for bioreactor 1, respectively, and a dilution rate of 0.05 day⁻¹ for bioreactor 2, the best results were obtained. The computer control system is presented. Some energetical considerations were discussed.

Резюме:

Проведени са експериментални изследвания на двуфазно анаеробно разграждане на царевичен екстракт в полунепрекъснати автоматични и полуавтоматични режими на

работа на каскада от два анаеробни биореактора със системи за мониторинг и управление. Царевичният екстракт – отпадъчен продукт от процеса на обработка на царевично зърно за екстракция на нишесте – се използва като субстрат в процеса на анаеробно разграждане с едновременно производство на водород и метан. Дневните добиви на биоводород в биореактор 1 на каскадата (с работен обем 8 dm³) са променливи. При добра работа те са в диапазона от 0,7 до 1,0 L биогаз от 1 dm³ работен обем на биореактора, а оптималното pH е в диапазона 5,0–5,5. Концентрацията на водород в биогаза от водороден биореактор 1 е в диапазона 14–34,7%. Дневните добиви на биометан в биореактор 2 на каскадата (с работен обем 80 dm³) варират в диапазона 0,4 до 0,85 L биогаз от 1 dm³ работен обем на биореактора, като концентрацията на метан в биогаза от биореактор 2 е висока и остава практически постоянна (в диапазона 65–69%). При степен на разреждане от 0,4 day⁻¹ и степен на органично натоварване от 20 gL за биореактор 1, съответно, и степен на разреждане от 0,05 day⁻¹ за биореактор 2, бяха получени най-добри резултати. Представена е компютърната система за управление. Обсъдени са някои енергийни съображения.

2. Stoyancheva, G., Kabaivanova, L., Hubenov, V., **Chorukova, E.** Metagenomic Analysis of Bacterial, Archaeal and Fungal Diversity in Two-Stage Anaerobic Biodegradation for Production of Hydrogen and Methane from Corn Steep Liquor. *Microorganisms*, 2023, 11(5), 1263. (ISSN: 2076-2607, <https://doi.org/10.3390/microorganisms11051263>) (Q2)

Abstract:

The main purpose of this study was to identify the microbial communities (bacterial, archaeal and fungal) in a two-stage system of anaerobic bioreactors for the production of hydrogen and methane from the waste substrate – corn steep liquor. Wastes from the food industry are valuable resources with potential in biotechnological production because of their high organic matter contents. In addition, the production of hydrogen and methane, volatile fatty acids, reducing sugars and cellulose content was monitored. Two-stage anaerobic biodegradation processes were performed by microbial populations in the first hydrogen generating bioreactor (working volume of 3 dm³) and in the second methane-generating reactor (working volume of 15 dm³). Cumulative hydrogen yield reached 2000 cm³ or 670 cm³/L a day, while the methane production reached a maximum quantity of 3300 cm³ or 220 cm³/L a day. Microbial consortia in anaerobic digestion systems play an essential role for process optimization and biofuel production enhancement. The obtained results showed the possibility of conducting two separate processes – the hydrogenic (hydrolysis and acidogenesis) and methanogenic (acetogenesis and methanogenesis) – as two stages of anaerobic digestion to favor energy production under controlled conditions with corn steep liquor. The diversity of microorganisms as main participants in the processes in the bioreactors of the two-stage system was followed using metagenome sequencing and bioinformatics analysis. The obtained metagenomics data showed that the most abundant phylum in both bacterial communities was Firmicutes – 58.61% and 36.49% in bioreactors 1 and 2, respectively. Phylum Actinobacteria were found in significant quantities (22.91%) in the microbial community in Bioreactor 1, whereas in Bioreactor 2, they were 2.1%. Bacteroidetes are present in both bioreactors. Phylum Euryarchaeota made up 0.4% of the contents in the first bioreactor and 11.4% in the second. As the dominant genera among methanogenic archaea are *Methanotrix* (8.03%) and *Methanosarcina* (3.39%), the main fungal representatives were *Saccharomyces cerevisiae*. New knowledge of anaerobic digestion mediated by novel microbial consortia could be widely used to convert different wastes to green energy.

Резюме:

Основната цел на това изследване беше да се идентифицират микробните съобщества (бактериални, археални и гъбични) в двустъпална система от анаеробни биореактори за производство на водород и метан от отпадъчния субстрат – царевичен екстракт. Отпадъците от хранително-вкусовата промишленост са ценен ресурс с потенциал за биотехнологично производство поради високото си съдържание на органични вещества. Освен това се наблюдава производството на водород и метан, летливи мастни киселини, редуциращи захари и съдържание на целулоза. Двустъпални процеси на анаеробно биоразграждане се извършват от микробни популации в първия биореактор за генериране на водород (работен обем от 3 dm³) и във втория реактор за генериране на метан (работен обем от 15 dm³). Кумулативният добив на водород достигна 2000 cm³ или 670 cm³/L на ден, докато производството на метан достигна максимално количество от 3300 cm³ или 220 cm³/L на ден. Микробните консорциуми в системите за анаеробно храносмилане играят съществена роля за оптимизиране на процесите и подобряване на производството на биогорива. Получените резултати показаха възможност за провеждане на два отделни процеса – хидрогенен (хидролиза и ацидогенеза) и метаногенен (ацетогенеза и метаногенеза) – като два етапа на анаеробно разграждане, за да се благоприятства производството на енергия при контролирани условия с царевичен накиснат разтвор. Разнообразието от микроорганизми като основни участници в процесите в биореакторите на двустъпалната система е проследено чрез метагеномно секвениране и биоинформатичен анализ. Получените метагеномни данни показват, че най-разпространеният тип и в двете бактериални съобщества е Firmicutes – съответно 58,61% и 36,49% в биореактори 1 и 2. Phylum Actinobacteria бяха открити в значителни количества (22,91%) в микробната общност в Биореактор 1, докато в Биореактор 2 те бяха 2,1%. Бактероидите присъстват и в двата биореактора. Phylum Euryarchaeota съставлява 0,4% от съдържанието в първия биореактор и 11,4% във втория. Тъй като доминиращите родове сред метаногенните археи са Methanothrix (8.03%) и Methanosarcina (3.39%), основните гъбични представители са Saccharomyces cerevisiae. Новите познания за анаеробното разграждане, медирано от нови микробни консорциуми, могат да бъдат широко използвани за превръщане на различни отпадъци в зелена енергия.

3. Pan, N., Wang, H., Tian, Y., **Chorukova, E.**, Simeonov, I. Christov, N. Comparison Study of Dynamic Models for One-stage and Two-stage Anaerobic Digestion Processes, IFAC-PapersOnLine, 2022, 55(7), 667-672. (E-ISSN: 2405-8963, Print ISSN: 2405-8971, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.07.520>) (Q3)

Abstract:

Compared to traditional one-stage anaerobic digestion processes (OSAD) with biomethane production, this paper focuses on the study of biogas yield of the two-stage anaerobic digestion processes (TSAD), which are able to produce simultaneously biohydrogen and biomethane from lignocellulosic materials. The one-stage and two-stage systems for anaerobic digestion are obtained based on our previous papers. Additionally, the static characteristics and extremum points of both systems are also investigated. The tracking of maximum points is realized by fuzzy-PID controller. Simulation results suggest that in comparison to OSAD, the increase in biogas production of TSAD can reach to 75.18% by control action, which means TSAD is a better choice considering biogas production.

Резюме:

В сравнение с традиционните едноетапни процеси на анаеробно разграждане (OSAD) с производство на биометан, тази статия се фокусира върху изследването на добива на биогаз при двустъпалните процеси на анаеробно разграждане (TSAD), които са в състояние да произвеждат едновременно биоводород и биометан от лигноцелулозни материали. Едностъпалните и двустъпалните системи за анаеробно разграждане са получени въз основа на нашите предишни статии. Освен това се изследват статичните характеристики и екстремалните точки на двете системи. Проследяването на максималните точки се осъществява от fuzzy-PID контролер. Резултатите от симулацията предполагат, че в сравнение с OSAD, увеличението на производството на биогаз от TSAD може да достигне до 75,18% чрез управляващо въздействие, което означава, че TSAD е по-добър избор, като се има предвид производството на биогаз.

4. Kabaivanova, L., Ivanova, J., **Chorukova, E.**, Hubenov, V., Nacheva, L., Simeonov, I. Algal Biomass Accumulation in Waste Digestate after Anaerobic Digestion of Wheat Straw. Fermentation, 2022, 8, 715. (ISSN: 2311-5637, <https://doi.org/10.3390/fermentation8120715>) (Q2)

Abstract:

Cultivation of microalgae in waste digestate is a promising cost-effective and environmentally friendly strategy for algal biomass accumulation and valuable product production. Two different digestates obtained as by-products of the anaerobic fermentation at 35°C and 55°C of wheat straw as a renewable source for biogas production in laboratory-scale bioreactors were tested as cultivation media for microalgae after pretreatment with active carbon for clarification. The strains of microalgae involved were the red marine microalga *Porphyridium cruentum*, which reached 4.7 mg/mL dry matter when grown in thermophilic digestate and green freshwater microalga *Scenedesmus acutus*, whose growth was the highest – 7.3 mg/mL in the mesophilic digestate. During cultivation, algae reduced the available nutrient components in the liquid digestate at the expense of increasing their biomass. This biomass can find further applications in cosmetics, pharmacy, and feed. The nitrogen and phosphorus uptake from both digestates during algae cultivation was monitored and modeled. The results led to the idea of nonlinear dynamic approximations with an exponential character. The purpose was to develop relatively simple nonlinear dynamic models based on available experimental data, as knowing the mechanisms of the considered processes can permit creating protocols for industrial-scale algal production toward obtaining economically valuable products from microalgae grown in organic waste digestate.

Резюме:

Култивирането на микроводорасли в отпадъчен остатък е обещаваща рентабилна и екологична стратегия за натрупване на биомаса от водорасли и производство на ценни продукти. Два различни дигестата, получени като странични продукти от анаеробната ферментация при 35°C и 55°C на пшенична слама като възобновяем източник за производство на биогаз в лабораторни биореактори, бяха тествани като среда за култивиране на микроводорасли след предварителна обработка с активен въглен за избистряне. Включените щамове микроводорасли са червеното морско микроводорасло *Porphyridium cruentum*, което достига 4,7 mg/mL сухо вещество при отглеждане в термофилен остатък и зеленото сладководно микроводорасло *Scenedesmus acutus*, чийто растеж е най-висок – 7,3 mg/mL в мезофилния остатък. По време на култивирането водораслите намаляват наличните хранителни компоненти в течния остатък за сметка на увеличаване на тяхната биомаса. Тази биомаса може да намери допълнителни

приложения в козметиката, фармацията и фуражите. Усвояването на азот и фосфор от двата остатъка по време на култивирането на водорасли беше наблюдавано и моделирано. Резултатите доведоха до идеята за нелинейни динамични апроксимации с експоненциален характер. Целта беше да се разработят сравнително прости нелинейни динамични модели, базирани на наличните експериментални данни, тъй като познаването на механизмите на разглежданите процеси може да позволи създаването на протоколи за производство на водорасли в промишлен мащаб за получаване на икономически ценни продукти от микроводорасли, отгледани в остатък от органични отпадъци.

5. **Chorukova, E.,** Kabaivanova, L., Hubenov, V., Simeonov, I., Roeva, O. Mathematical Model of a Thermophilic Anaerobic Digestion for Methane Production of Wheat Straw. Processes, 2022, 10, 742. (ISSN: 2227-9717, <https://doi.org/10.3390/pr10040742>) (Q2)

Abstract:

This paper presents a newly created mathematical model of thermophilic anaerobic digestion of wheat straw carried out in a 2 dm³ bioreactor for methane production. Two batch processes, with 30 mL/dm³ and 35 mL/dm³ organic load, are carried out – one set for parameter identification and one set for model verification. The identification of model parameter values is based on dynamical experiments. It is fulfilled using two different techniques: deterministic sequential quadratic programming algorithm and metaheuristic genetic algorithm. Verification of the developed mathematical models is conducted based on the different data sets of the process. Both models predict the set of the experimental data for all considered process variables well. Genetic algorithm visually fits the data with a higher degree of accuracy, as confirmed by the numerical results for the objective function value.

Резюме:

Тази статия представя новосъздаден математически модел на термофилно анаеробно разграждане на пшенична слама, извършено в 2 dm³ биореактор за производство на метан. Проведени са два периодични процеса с 30 mL/dm³ и 35 mL/dm³ органично натоварване – един процеса за идентификация на параметрите и един процеса за верификация на модела. Идентифицирането на стойностите на параметрите на модела се основава на динамични експерименти. Изпълнява се с помощта на две различни техники: детерминистичен алгоритъм за последователно квадратично програмиране и метабвристичен генетичен алгоритъм. Верификацията на разработените математически модели се извършва на базата на различен набор от данни за процеса. И двата модела прогнозира добре набора от експериментални данни за всички разглеждани променливи на процеса. Генетичният алгоритъм визуално описва данните с по-висока степен на точност, което се потвърждава от числените резултати за стойността на целевата функция.

6. Simeonov I., Denchev, D., Kabaivanova, L., Kroumova, E., **Chorukova, E.,** Hubenov, V., Mihailova. S. Different Types of Pretreatment of Lignocellulosic Wastes for Methane Production, Bulgarian Chemical Communications, 2017, 49(2) 430-435. (ISSN: 0861-9808) (Q4)

Abstract:

Biotechnological processes for anaerobic digestion of lignocellulosic substrates were performed in a laboratory bioreactor. Bioreactors used were operating at 35°C to follow the

process of methane production. Cattle manure and wheat straw were involved in a ratio of 65:35 as a substrate, as well as only wheat straw as a sole substrate. We report on performing two pretreatment techniques to the substrates – chemical with ammonium hydroxide (NH₄OH) and polyethylene glycol (PEG) and biological – employing white-rot basidiomycetes (*Trametes hirsuta*) before starting the process of anaerobic digestion. The biological method of pretreatment gave the highest cumulative biogas yield for the substrate wheat straw and cattle manure. Chemical pretreatment lead to higher specific biogas yield when only wheat straw was used as a substrate. Both methods were easy to perform and lead to increased biomethane yield in comparison to that obtained with the participation of untreated substrates.

Резюме:

Биотехнологичните процеси за анаеробно разграждане на лигноцелулозни субстрати бяха извършени в лабораторен биореактор. Използваните биореактори работеха при 35°C, за да следват процеса на производство на метан. Като субстрат са използвани говежди тор и пшенична слама в съотношение 65:35, както и само пшенична слама като единствен субстрат. Тук докладваме за извършване на две техники за предварителна обработка на субстратите – химична с амониев хидроксид (NH₄OH) и полиетилен гликол (PEG) и биологична – използваща базидиомицети с бяло гниене (*Trametes hirsuta*) преди започване на процеса на анаеробно разграждане. Биологичният метод на предварителна обработка дава най-висок кумулативен добив на биогаз за субстрата пшенична слама и говежди тор. Предварителната химическа обработка води до по-висок специфичен добив на биогаз, когато като субстрат се използва само пшенична слама. И двата метода са лесни за изпълнение и водят до повишен добив на биометан в сравнение с този, получен с участието на нетретиран субстрат.

7. **Chorukova E., Mamatarkova V., Simenonov I., Nikolov L.** Influence of two basic technological paramaters on the behavior of a new bioprocess system with anaerobic biofilm for biogas production. *Biotechnol and Biotechnol Eq.*, 2011, 25(4), 138-144. (ISSN: 1310-2818, <https://doi.org/10.5504/BBEQ.2011.0134>) (Q3)

Abstract:

A new type of packed bed biofilm reactor was developed and research was started as a part of the new bioprocess system for anaerobic biofilm (BPS_{ab}). The present paper is dedicated to the investigations of the behavior of the new BPS_{ab} with this reactor as its major part. The new device passed a long period of incessant functioning under tough operational conditions. This was a good proof of the suitability of the new bioreactor as a laboratory tool for anaerobic biofilm investigations. It ensured stable experimental conditions for investigations of the influence on the intensity of mixing and the temperature on the BPS_{ab} productivity of biogas. Study of the mixing intensity on the bioreactor productivity showed an indifferent behavior to this factor in a rather large interval of changes of its values. As to the temperature, the reaction was similar to that of the chemical process systems following the Arrhenius rule in some part of the interval of its changes.

Резюме:

Беше разработен нов тип реактор за биофилм с уплътнен слой и започнаха изследвания като част от новата биопроцесна система за анаеробен биофилм (BPS_{ab}). Настоящата статия е посветена на изследването на поведението на новия BPS_{ab} с този реактор като негова основна част. Новото устройство премина през дълъг период на непрекъсната работа при тежки експлоатационни условия. Това е добро доказателство за пригодността на новия биореактор като лабораторен инструмент за анаеробни

изследвания на биофилм. Осигурява стабилни експериментални условия за изследване на влиянието върху интензивността на смесване и температурата върху производителността на BPS_{ab} на биогаз. Изследването на интензитета на смесване върху производителността на биореактора показва безразлично поведение на този фактор в доста голям интервал от промени на неговите стойности. Що се отнася до температурата, реакцията беше подобна на тази на химическите процесни системи, следващи правилото на Арениус в част от интервала на нейните промени.

8. Simenonov I., **Chorukova, E.**, Mamatarkova, V., Nikolov, L. Biogas production from organic wastes in suspended cell cultures and in biofilms, *Biotechnol. & Biotechnol. Eq.*, 2010, 24, 558-566. (ISSN: 1310-2818, <https://doi.org/10.1080/13102818.2010.10817897>) (Q3)

Abstract:

The results of a comparative study of two biogas production bioprocess systems are presented. The systems submitted to comparison are based on the suspended cells cultures and the biofilm formed on solid inert support. A comprehensive research concept is formulated and discussed. It includes the main considerations regarding the choice of substrate, bioagent as mixed microbial society, type of bioreactors, regimes of functioning, analytical determinations and method of comparison. The main requirements for efficient experimental activity in comparative investigations are formulated. Their satisfaction can grant correctness of the experimental design and data acquisition. On this basis the key parameter of comparison of the two systems is defined as the specific productivity of the bioprocess systems. Under these conditions series of preliminary experiments are carried out for testing the readiness of experimental set ups for long time stable functioning and monitoring devices capabilities to maintain the bioprocess parameters at the determined intervals. These tests grant continuous incessant experimentation with the investigated bioprocess systems.

The results obtained show that biofilm bioprocess systems possess up to two and half time higher specific productivity in comparison with the bioprocess systems with the suspended cells. Some visions about the future developments of comparative research on the influence of additional parameters like the mixer rotation speed, organic loads, and higher values of dilution rates are outlined.

Резюме:

Представени са резултатите от сравнително изследване на две биопроцесни системи за производство на биогаз. Системите, представени за сравнение, се основават на суспендирани клетъчни култури и биофилм, образуван върху твърда инертна подложка. Формулира се и се обсъжда цялостна изследователска концепция. Тя включва основните съображения относно избора на субстрат, биоагент като смесено микробно общество, тип биореактори, режими на функциониране, аналитични определяния и метод за сравнение. Формулирани са основните изисквания за ефективна експериментална дейност в сравнителните изследвания. Тяхното удовлетвяване се гарантира от правилността на дизайна на експеримента и събирането на данни. На тази основа определеният основен параметър за сравнение на двете системи е специфичната производителност на биопроцесните системи. При тези условия се провеждат серии от предварителни експерименти за проверка на готовността на експерименталните установки за продължително устойчиво функциониране и възможностите на устройствата за мониторинг да поддържат параметрите на биопроцеса през

определените интервали. Тези тестове осигуряват непрекъснато експериментиране с изследваните биопроцесни системи.

Получените резултати показват, че биопроцесните системи с биофилм притежават до два пъти и половина по-висока специфична производителност в сравнение с биопроцесните системи със суспендирани клетки. Очертани са някои визии за бъдещо развитие на сравнителни изследвания върху влиянието на допълнителни параметри като скорост на въртене на двигателя, органични натоварвания и по-високи стойности на скоростите на разреждане.

9. **Chorukova E.**, Marinov P., Umlenski I. Survey on Theory and Applications of InterCriteria Analysis Approach. Studies in Computational Intelligence, Springer Nature, 2021, 934, 453-469. (ISSN 1860-949X, E-ISSN 1860-9503, https://doi.org/10.1007/978-3-030-72284-5_20) (Q4)

Abstract:

Short notes on the concept of InterCriteria Analysis (ICrA), a new method for estimating similarity with regards to estimations of criteria and objectives, are described. The main results of the theory development since ICrA's inception are considered. Several software implementations of ICrA are presented. Various applications of the approach to a wide variety of problems are discussed.

Резюме:

Описани са кратки бележки относно концепцията за интеркритериален анализ (ICrA), нов метод за оценка на сходството по отношение на оценките на критериите и целите. Разглеждат се основните резултати от развитието на теорията от създаването на ICrA. Представени са няколко софтуерни реализации на ICrA. Обсъдени са различни приложения на подхода към голямо разнообразие от проблеми.

10. Roeva O, Roeva G, **Chorukova E.** Crow Search Algorithm for Modelling an Anaerobic Digestion Process: Algorithm Parameter Influence. Mathematics, 2024, 12(15), 2317. (E-ISSN 2227-7390, <https://doi.org/10.3390/math12152317>) (Q1)

Abstract:

Corn steep liquor is a waste product from the process of treating corn grain for starch extraction. It is used as a substrate in anaerobic digestion with simultaneous hydrogen and methane production in a cascade of two anaerobic bioreactors. For process research and optimisation, adequate mathematical models are required. So, the authors aim to present a high-quality model of the corn steep liquor process for the sequential production of H_2 and CH_4 . This paper proposes a technique for identifying the best mathematical model of the process using the metaheuristics crow search algorithm (CSA). The CSA was applied for the first time to mathematical modelling of the considered two-stage anaerobic digestion process, using real experimental data. Based on the analysis of the numerical data from the model parameter identification procedures, the influence of the main CSA parameters – the flight length, fl, and the awareness probability, AP – was investigated. Applying classical statistical tests and an innovative approach, InterCriteria Analysis, recommendations about the optimal CSA parameter tuning were proposed. The best CSA algorithm performance was achieved for the AP = 0.05, fl = 3.0, followed by AP = 0.10, fl = 2.5, and AP = 0.15, fl = 3.0. The optimal tuning of the CSA parameters resulted in a 29% improvement in solution accuracy. As a result, a

mathematical model of the considered two-stage anaerobic digestion process with a high degree of accuracy was developed.

Резюме:

Царевичният екстракт е отпадъчен продукт от процеса на обработка на царевично зърно за екстракция на нишесте. Използва се като субстрат при анаеробно разграждане с едновременно производство на водород и метан в каскада от два анаеробни биореактора. За изследване и оптимизиране на процеси са необходими адекватни математически модели. И така, авторите имат за цел да представят висококачествен модел на процеса на преработка на царевичен екстракт за последователно производство на H_2 и CH_4 . Тази статия предлага техника за идентифициране на най-добрия математически модел на процеса, използвайки метаевристичния алгоритъм за търсене на врана (CSA). CSA беше приложен за първи път за математическо моделиране на разглеждания двуетапен процес на анаеробно разграждане, като се използват реални експериментални данни. Въз основа на анализа на цифровите данни от процедурите за идентификация на параметрите на модела е изследвано влиянието на основните параметри на CSA – дължината на полета, fl , и вероятността за осведоменост, AP . Прилагайки класически статистически тестове и иновативен подход, InterCriteria Analysis, беше предложен препоръки за оптимална настройка на параметрите на CSA. Най-доброто представяне на алгоритъма на CSA беше постигнато за $AP = 0,05$, $fl = 3,0$, последвано от $AP = 0,10$, $fl = 2,5$ и $AP = 0,15$, $fl = 3,0$. Оптималната настройка на параметрите на CSA доведе до 29% подобрене в точността на решението. В резултат на това беше разработен математически модел на разглеждания двуетапен процес на анаеробно разграждане с висока степен на точност.

Публикации по Група от показатели Г на ЗРАСРБ

11. **Chorukova, E.,** Kabaivanova, L. Static Characteristics of the Anaerobic Digestion of Organic Wastes with Production of Hydrogen and Methane, Including Substrate Inhibition Influence, *Int J Bioautomation*, 2024, 28(4), 197-204. (E-ISSN: 1314-2321, Print ISSN: 1314-1902, [doi: 10.7546/ijba.2024.28.4.001035](https://doi.org/10.7546/ijba.2024.28.4.001035)) (Q4)

Abstract:

In this paper, static characteristics of a simple mathematical model of a two-stage anaerobic digestion (AD) process for sequential production of hydrogen (H_2) and methane (CH_4) are derived. The influence of substrate inhibition in the first and second bioreactors is considered. Different process variables are described in the considered mathematical model. The concentration of the influent organic matter is assumed to be the main external disturbance reflected in the model. The obtained input-output static characteristics for the energy carriers (H_2 and CH_4) could be used to control and optimize the subjected process.

Резюме:

В тази статия са изведени статични характеристики на прост математически модел на двуетапен процес на анаеробно разграждане (AD) за последователно производство на водород (H_2) и метан (CH_4). Разгледано е влиянието на субстратното инхибиране в първия и втория биореактор. В разглеждания математически модел са описани различни променливи на процеса. Приема се, че концентрацията на вливащата се органична материя е основното външно смущение, отразено в модела. Получените входно-изходни

статични характеристики за енергоносителите (H_2 и CH_4) могат да се използват за управление и оптимизиране на разглеждания процес.

12. Simeonov, I., **Chorukova, E.**, Kabaivanova, L. Two-Stage Anaerobic Digestion for Green Energy Production: A Review, Processes, 2025, 13, 294. (E-ISSN 2227-9717, <https://doi.org/10.3390/pr13020294>) (Q2)

Abstract:

Anaerobic digestion (AD) is a biotechnological process in which the microorganisms degrade complex organic matter to simpler components under anaerobic conditions to produce biogas and fertilizer. This process has many environmental benefits, such as green energy production, organic waste treatment, environmental protection, and greenhouse gas emissions reduction. It has long been known that the two main species (acidogenic bacteria and methanogenic archaea) in the community of microorganisms in AD differ in many aspects, and the optimal conditions for their growth and development are different. Therefore, if AD is performed in a single bioreactor (single-phase process), the optimal conditions are selected taking into account the slow-growing methanogens at the expense of fast-growing acidogens, affecting the efficiency of the whole process. This has led to the development of two-stage AD (TSAD) in recent years, where the processes are divided into a cascade of two separate bioreactors (BRs). It is known that such division of the processes into two consecutive BRs leads to significantly higher energy yields for the two-phase system ($H_2 + CH_4$) compared to the traditional single-stage CH_4 production process. This review presents the state of the art, advantages and disadvantages, and some perspectives (based on more than 210 references from 2002 to 2024 and our own studies), including all aspects of TSAD – different parameters' influences, types of bioreactors, microbiology, mathematical modeling, automatic control, and energetical considerations on TSAD processes.

Резюме:

Анаеробното разграждане (AD) е биотехнологичен процес, при който микроорганизмите разграждат сложна органична материя до по-прости компоненти при анаеробни условия, за да произведат биогаз и тор. Този процес има много ползи за околната среда, като производство на зелена енергия, обработка на органични отпадъци, опазване на околната среда и намаляване на емисиите на парникови газове. Отдавна е известно, че двата основни вида (ацидогенни бактерии и метаногенни археи) в общността на микроорганизмите при AD се различават в много аспекти, както и оптималните условия за техния растеж и развитие са различни. Следователно, ако AD се извършва в един биореактор (еднофазен процес), оптималните условия се избират, като се вземат предвид бавно растящите метаногени за сметка на бързо растящи киселини, влияещи върху ефективността на целия процес. Това доведе до развитието на двустепенна AD (TSAD) през последните години, където процесите са разделени на каскада от два отделни биореактора (BR). Известно е, че такова разделяне на процесите на два последователни BR води до значително по-високи енергийни добиви за двуфазната система ($H_2 + CH_4$) в сравнение с традиционния едноетапен процес на производство на CH_4 . Този обзор представя състоянието на техниката, предимствата и недостатъците и някои перспективи (на базата на повече от 210 препратки от 2002 до 2024 г. и нашите собствени проучвания), включително всички аспекти на TSAD – влияние на различни параметри, видове биореактори, микробиология, математическо моделиране, автоматично управление и енергийни съображения за процесите на TSAD.

13. **Chorukova, E.,** Roeva, O. Mathematical modeling and static characteristics of the anaerobic digestion of organic wastes with production of hydrogen and methane, *Studies in Computational Intelligence*, 2024, 1158, 30-51. (E-ISSN 1860-9503, Print ISSN: 1860-949X, https://doi.org/10.1007/978-3-031-57320-0_3) (Q4)

Abstract:

In this paper, static characteristics of five different mathematical models of a two-stage anaerobic digestion (AD) process for the sequential production of H_2 and CH_4 are derived. Different process variables are described in the considered mathematical models. Each subsequent model describes in more detail the two-step AD process under consideration.

The concentration of the influent organic matter is assumed to be the main external disturbance reflected in the models. Changing it leads to a shift of the corresponding static characteristics without changing their essence, but of course the value of the maximum also changes. The obtained specific values of dilution rate in the first bioreactor (D_1) and dilution rate in the second bioreactor (D_2) are highly dependent on the parameter values in the 5 models considered. On the other hand, the model parameters are dependent on the specific substrate in the AD process. Thus, the values of D_1 and D_2 are highly dependent on the substrate used.

Резюме:

В тази статия са изведени статичните характеристики на пет различни математически модела на двуетапен процес на анаеробно разграждане (AD) за последователно производство на H_2 и CH_4 . В разглежданите математически модели са описани различни променливи на процеса. Всеки следващ модел описва по-подробно разглеждания двуетапен AD процес.

Приема се, че концентрацията на вливащата се органична материя е основното външно смущение, отразено в моделите. Промяната му води до изместване на съответните статични характеристики, без да се променя същността им, но разбира се променя и стойността на максимума. Получените специфични стойности на скоростта на разреждане в първия биореактор (D_1) и скоростта на разреждане във втория биореактор (D_2) са силно зависими от стойностите на параметрите в 5-те разглеждани модела. От друга страна, параметрите на модела зависят от конкретния субстрат в AD процеса. По този начин стойностите на D_1 и D_2 са силно зависими от използвания субстрат.

14. **Chorukova, E.,** Roeva, O., Atanasov, K. Generalized Net Model of Ant Lion Optimizer, *Lecture Notes in Networks and Systems*, 374 LNNS, 2022, 154-162. (E-ISSN: 2367-3389, Print ISSN: 2367-3370, https://doi.org/10.1007/978-3-030-96638-6_17) (Q4)

Abstract:

In the presented paper, the functioning and the results of the work of a metaheuristic algorithm, known as Ant Lion Optimizer (ALO) is described using the apparatus of generalized nets (GNs). The developed GN-model mimic the optimization processes based on the behavior of antlions and their prey in nature. To model such interactions, ants are required to move over the search space, and antlions are allowed to hunt them and become fitter using traps. The proposed GN-model executes the ALO algorithm conducting abovementioned basic steps and thus performing an optimal search. ALO GN-model considered here is another contribution to the open, namely “to present each of the artificial intelligence areas by GNs”.

Резюме:

В представената статия е описано функционирането и резултатите от работата на метаевристичен алгоритъм, известен като Ant Lion Optimizer (ALO) с помощта на апарата на обобщените мрежи (GN). Разработеният GN-модел имитира процесите на оптимизация, базирани на поведението на мравките и тяхната плячка в природата. За да се моделират такива взаимодействия, от мравките се изисква да се движат над пространството за търсене, а на мравките е позволено да ги ловуват и да стават по-добри, използвайки капани. Предложеният GN-модел изпълнява алгоритъма ALO, като извършва гореспоменатите основни стъпки и по този начин извършва оптимално търсене. ALO GN-моделът, разглеждан тук, е друг принос към стремежа „да представи всяка от областите на изкуствения интелект чрез GN“.

15. **Chorukova E., I. Simeonov.** Mathematical modeling of the anaerobic digestion in two-stage system with production of hydrogen and methane including three intermediate products, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(20), 11550-11558. (E-ISSN: 1879-3487, Print ISSN: 0360-3199 <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.01.228>) (Q1, оглавява ранглистата)

Abstract:

Anaerobic digestion is a multi-step biotechnological process, in which H_2 is not detected as it is consumed immediately e.g. by hydrogenotrophic methanogens to produce CH_4 and CO_2 . Recently a two-stage AD concept consisting of hydrogenic process followed by methanogenic process was suggested. However, only few models of this process are known. In this study a mathematical model of a continuous process of AD with production of hydrogen and methane in a cascade of two bioreactors, including some intermediate products in the first bioreactor was developed and investigated.

Резюме:

Анаеробното разграждане е многоетапен биотехнологичен процес, при който H_2 не се открива, тъй като се консумира веднага, напр. чрез хидрогенотрофни метаногени за получаване на CH_4 и CO_2 . Наскоро беше предложена двуетапна AD концепция, състояща се от водороден процес, последван от метаногенен процес. Известни са обаче само няколко модела на този процес. В това изследване е разработен и изследван математически модел на непрекъснат процес на AD с производство на водород и метан в каскада от два биореактора, включително някои междинни продукти в първия биореактор.

16. Roeva, O., **Chorukova, E.** Metaheuristic Algorithms to Optimal Parameters Estimation of a Model of Two-Stage Anaerobic Digestion of Corn Steep Liquor. *Applied Sciences*, 2023, 13(1), 199. (E-ISSN 2076-3417, <https://doi.org/10.3390/app13010199>) (Q2)

Abstract:

Anaerobic Digestion (AD) of wastewater for hydrogen production is a promising technology resulting in the generation of value-added products and the reduction of the organic load of wastewater. The Two-Stage Anaerobic Digestion (TSAD) has several advantages over the conventional single-stage process due to the ability to control the acidification phase in the first bioreactor, preventing the overloading and/or the inhibition of the methanogenic population in the second bioreactor. To carry out any process research and process optimization, adequate mathematical models are required. To the best of our knowledge, no mathematical models of TSAD have been published in the literature so far. Therefore, the

authors' motivation is to present a high-quality model of the TSAD corn steeping process for the sequential production of H_2 and CH_4 considered in this paper. Four metaheuristics, namely Genetic Algorithm (GA), Firefly Algorithm (FA), Cuckoo Search Algorithm (CS), and Coyote Optimization Algorithm (COA), have been adapted and implemented for the first time for parameter identification of a new nonlinear mathematical model of TSAD of corn steep liquor proposed here. The superiority of some of the algorithms has been confirmed by a comparison of the observed numerical results, graphical results, and statistical analysis. The simulation results show that the four metaheuristics have achieved similar results in modelling the process dynamics in the first bioreactor. In the case of modelling the second bioreactor, a better description of the process dynamics trend has been obtained by FA, although GA has acquired the lowest value of the objective function.

Резюме:

Анаеробното разграждане (AD) на отпадъчни води за производство на водород е обещаваща технология, водеща до генериране на продукти с добавена стойност и намаляване на органичното натоварване на отпадъчните води. Двустъпалното анаеробно разграждане (TSAD) има няколко предимства пред конвенционалния едноетапен процес поради способността да се контролира фазата на подкисляване в първия биореактор, предотвратявайки претоварването и/или инхибирането на метаногенната популация във втория биореактор. За извършване на каквото и да е изследване на процеси и оптимизация на процеси са необходими адекватни математически модели. Доколкото ни е известно, досега в литературата не са публикувани математически модели на TSAD. Следователно мотивацията на авторите е да представят висококачествен модел на процеса на двустъпално разграждане на отпадък от царевича за последователното производство на H_2 и CH_4 , разглеждани в тази статия. Четири метаевристички, а именно генетичен алгоритъм (GA), алгоритъм на Firefly (FA), алгоритъм за търсене на кукувица (CS) и алгоритъм за оптимизация на Coyote (COA), бяха адаптирани и внедрени за първи път за идентифициране на параметри на нов нелинеен математически модел на TSAD на царевичен отпадък, предложен тук. Превъзходството на някои от алгоритмите е потвърдено чрез сравнение на наблюдаваните числени резултати, графични резултати и статистически анализ. Резултатите от симулацията показват, че четирите метаевристички са постигнали подобни резултати при моделиране на динамиката на процеса в първия биореактор. В случай на моделиране на втория биореактор, по-добро описание на тенденцията на динамиката на процеса е получено от FA, въпреки че GA е придобила най-ниската стойност на целевата функция.

17. **Chorukova, E., Simeonov, I., Kabaivanova, L.** Volumes Ratio Optimisation in a Cascade Anaerobic Digestion System Producing Hydrogen And Methane. *Ecological Chemistry and Engineering S*, 2021, 28(2), 183-200. (E-ISSN: 2084-4549, ISSN: 1898-6196, DOI: [10.2478/eces-2021-0014](https://doi.org/10.2478/eces-2021-0014)) (Q3)

Abstract:

As focus of humans has turned to renewable energy, the role of anaerobic digestion has started to become economically viable. Reducing the volume of agro-wastes for the generation of gaseous and liquid fractions with energy carriers and valuable products is an enormous challenge. A two-stage anaerobic digestion process consisting of hydrogenic stage followed by methanogenic stage was studied in a laboratory scale. Five simple nonlinear models of this continuous cascade process were studied in order to determine the optimal ratio of working volumes of bioreactors, in view of maximising energy production. This ratio was reported for

all adopted models. The optimal ratio (maximal energy production criterion) depends of the adopted mathematical model. Static characteristics of both bioreactors were obtained using Symbolic toolbox of Matlab. Numerical experiments concerning dynamics of the main variables of both bioreactors for these models using Simulink of Matlab are performed for different step changes of the dilution rate of the first bioreactor, together with the influence of the substrate (acetate) inhibition for one of the models. The value of the constant of inhibition plays an important role on the admissible interval of the dilution rate. The developed idea could serve for optimally designed experiments of anaerobic digestion for production of hydrogen and methane from lignocelluloses wastes (wheat straw) in two phase process.

Резюме:

Тъй като фокусът на хората се насочи към възобновяемата енергия, ролята на анаеробното разграждане започна да става икономически значимо. Намалването на обема на agroотпадъците за генериране на газообразни и течни фракции с енергоносители и ценни продукти е огромно предизвикателство. Двуетапен процес на анаеробно разграждане, състоящ се от водороден етап, последван от метаногенен етап, беше изследван в лабораторен мащаб. Изследвани са пет прости нелинейни модела на този непрекъснат каскаден процес, за да се определи оптималното съотношение на работните обеми на биореакторите, с оглед максимизиране на производството на енергия. Това съотношение беше отчетено за всички приети модели. Оптималното съотношение (критерий за максимално производство на енергия) зависи от възприетия математически модел. Статичните характеристики на двата биореактора бяха получени с помощта на Symbolic toolbox на Matlab. Проведени са числени експерименти относно динамиката на основните променливи на двата биореактора за тези модели, използващи Simulink на Matlab, за различни стъпкови промени на скоростта на разреждане на първия биореактор, заедно с влиянието на субстратното (ацетатно) инхибиране за един от моделите. Стойността на константата на инхибиране играе важна роля за допустимия интервал на скоростта на разреждане. Разработената идея може да послужи за оптимално проектирани експерименти на анаеробно разграждане за производство на водород и метан от лигноцелулозни отпадъци (пшенична слама) в двуфазен процес.

18. Diop, S., **Chorukova, E.**, Simeonov, I. Modeling and Specific Growth Rates Estimation of a Two-Stage Anaerobic Digestion Process for Hydrogen and Methane Production. IFAC-PapersOnLine, 2017, 50(1), 12641-12646. (E-ISSN: 2405-8963, Print ISSN: 2405-8971, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.2232>) (Q4)

Abstract:

Production of hydrogen from anaerobic digestion of waste, also known as dark fermentative hydrogen production, is one the numerous alternatives to obtain this precious source of energy. In most usual experimental setups anaerobic digestion is known to produce small quantities of H₂. In a comprehensive study Pakarinen, Kaparaju and Rintala have compared two-stage H₂ and CH₄ production and one-stage CH₄ production. Simeonov, Denchev and Chorukova recently announced a simple model of such a two-stage anaerobic digestion process for the production of hydrogen and methane. In the present communication we propose such a complete model along with estimation schemes of the specific growth rates of the involved bacteria that avoids the tedious work of empirical modeling and identification of these specific growth rates. At this stage only simulations are provided to illustrate the performance of these proposed estimation schemes.

Резюме:

Производството на водород от анаеробно разграждане на отпадъци, известно още като производство на водород чрез тъмна ферментация, е една от многобройните алтернативи за получаване на този ценен източник на енергия. Известно е, че при повечето обичайни експериментални настройки анаеробното разграждане произвежда малки количества H_2 . В цялостно проучване Pakarinen, Kararaju и Rintala са сравнили двустепенното производство на H_2 и CH_4 и едностъпалното производство на CH_4 . Симеонов, Денчев и Чорукова наскоро обявиха прост модел на такъв двуетапен процес на анаеробно разлагане за производство на водород и метан. В настоящото съобщение ние предлагаме такъв пълен модел заедно със схеми за оценка на специфичните скорости на растеж на участващите бактерии, който избягва работата по емпирично моделиране и идентифициране на тези специфични скорости на растеж. На този етап се предоставят само симулации, за да се илюстрира работата на тези предложени схеми за оценка.

19. **Chorukova, E.,** Simeonov, I. A simple mathematical model of the anaerobic digestion of wasted fruits and vegetables in mesophilic conditions. International Journal Bioautomation, 2015, 19, S69-S80. (E-ISSN: 1314-2321, Print ISSN: 1314-1902) (Q4)

Abstract:

Anaerobic digestion is an effective biotechnological process for treatment of different agricultural, municipal and industrial wastes. Use of mathematical models is a powerful tool for investigations and optimisation of the anaerobic digestion. In this paper a simple mathematical model of the anaerobic digestion of wasted fruits and vegetables was developed and verified experimentally and by computer simulations using Simulink. A three-step mass-balance model was considered including the gas phase. The parameter identification was based on a set of 150 days of dynamical experiments in a laboratory bioreactor. Two step identification procedure to estimate 4 model parameters is presented. The results of 15 days of experiment in a pilot-scale bioreactor were then used to validate the model.

Резюме:

Анаеробното разграждане е ефективен биотехнологичен процес за третиране на различни селскостопански, битови и промишлени отпадъци. Използването на математически модели е мощен инструмент за изследване и оптимизиране на анаеробното разграждане. В тази статия е разработен и проверен експериментално и чрез компютърни симулации с помощта на Simulink прост математически модел на анаеробното разграждане на отпадни плодове и зеленчуци. Разгледан е тристепенен модел на масовия баланс, включващ газовата фаза. Идентифицирането на параметрите се основава на набор от 150-дневни динамични експерименти в лабораторен биореактор. Представена е двуетапна процедура за идентификация за оценка на 4 параметъра на модела. След това резултатите от 15-дневен експеримент в пилотен биореактор бяха използвани за валидиране на модела.

20. Simeonov, I., **Chorukova, E.,** Lakov, V. Modelling and Extremum Seeking Control of Two-stage Biotechnological Process. IFAC-PapersOnLine, 2018, 51(30), 677-682. (E-ISSN: 2405-8963, Print ISSN: 2405-8971, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.11.227>) (Q3)

Abstract:

Mathematical models of a cascade of two continuously stirred anaerobic bioreactors for simultaneous hydrogen and methane production are presented and a stable extremum seeking control algorithm is applied to the system. The dilution rate of the first bioreactor is chosen as control action and the hydrogen and methane flow rates of both bioreactors, working in continuous mode, are the measured outputs to be maximized. The concentration of the inlet organics is accepted for disturbance. The control loop is represented by the extremum seeking controller, which finds the optimum control action and reacts to the disturbance. Simulation studies show the feasibility of this scheme.

Резюме:

Представени са математически модели на каскада от два анаеробни биореактора с непрекъснато разбъркване за едновременно производство на водород и метан и към системата е приложен устойчив алгоритъм за търсене на екстремум. Степента на разреждане на първия биореактор е избрана като управляващо въздействие и дебитите на водород и метан на двата биореактора, работещи в непрекъснат режим, са измерените изходи, които трябва да бъдат максимизирани. Концентрацията на входящите органични вещества се приема за смущение. Управляващата верига е представена от регулатора за търсене на екстремум, който намира оптималното управляващо въздействие и реагира на смущението. Симулационните проучвания показват осъществимостта на тази схема.

21. Simeonov I., Hubenov V., **Chorukova E.** Renewable energy from two-stage anaerobic digestion of organic wastes. 17th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), 2021, 238-243. (E-ISBN:978-1-6654-3582-6, DOI: [10.1109/ELMA52514.2021.9503067](https://doi.org/10.1109/ELMA52514.2021.9503067))

Abstract:

Experimental studies of two-phase anaerobic digestion of corn steep liquor (a waste product from processing corn grain for starch extraction) were performed. For the first time, an automatic mode of operation was implemented in continuous processes with simultaneous production of hydrogen and methane using the developed computer system for monitoring and control of pilot bioreactors. The best results for daily biogas yield were obtained at an organic load of 20 g/L for hydrogen producing bioreactor, as the daily yield of biohydrogen is 0.74 dm³/L at a hydrogen concentration in biogas of 32.6% (0.24 dm³/L pure biohydrogen) and the daily biomethane yield in the methane producing bioreactor is 0.587 dm³/L at a methane concentration in biogas of 69% (0.4 dm³/L pure biomethane). The obtained energy is more than 40% compared to the traditional single-stage methane production process. A disadvantage is the need for additional purification from hydrogen sulfide of both gases before obtaining electricity and/or heat.

Резюме:

Бяха проведени експериментални изследвания на двуфазно анаеробно разграждане на царевичен екстракт (отпадъчен продукт от обработката на царевично зърно за екстракция на нишесте). За първи път е внедрен автоматичен режим на работа в непрекъснати процеси с едновременно производство на водород и метан с помощта на разработената компютърна система за мониторинг и управление на пилотни биореактори. Най-добрите резултати за дневен добив на биогаз са получени при органично натоварване от 20 g/L на биореактор за производство на водород, тъй като дневният добив на биоводород е 0,74 dm³/L при концентрация на водород в биогаза от 32,6% (0,24 dm³/L чист биоводород), а дневният добив на биометан в биореактора за производство на метан е 0,587 dm³/L при концентрация на метан в биогаз от 69% (0,4

dm³/L чист биометан). Получената енергия е над 40% в сравнение с традиционния едноетапен процес на производство на метан. Недостатък е необходимостта от допълнително пречистване от сероводород и на двата газа преди получаване на електроенергия и/или топлина.

22. Simeonov, I., **Chorukova, E.**, Neural networks modelling of two biotechnological processes, 2004 2nd International IEEE Conference "Intelligent Systems" - Proceedings, 2004, 1, 331-336. (ISBN:0-7803-8278-1, DOI: [10.1109/IS.2004.1344756](https://doi.org/10.1109/IS.2004.1344756))

Abstract:

Neural models of a batch (with DO-uncontrolled and controlled culture) and a fed-batch (with the control action being the flow rate of feed-glucose) fermentation processes for the production of the enzyme superoxide dismutase (SOD) and of a continuous process of anaerobic digestion of organic wastes (stimulated by the addition of glucose) have been developed on the basis of experimental and generated data (from deterministic models). The specialized software package NNSYSID20 for MATLAB 5.3 has been used for training and testing the neural models. ANNs with different structures were tested. The criteria for the choice of the structures were: (a) models validity for experimental data unknown to the network and (b) statistical characteristics. Especially the influence of the number of experimental data in the process of developing of ANN models has been investigated.

The models obtained may be useful for simulation and automatic control of these fermentation processes.

Резюме:

Невронни модели на периодичен процес (с управление и без управление на разтворен кислород) и на полупериодичен процес (с управляващо действие, което е скоростта на потока на подавания глюкозен разтвор) на ферментационни процеси за производство на ензима супероксид дисмутаза (СОД) и на непрекъснат процес на анаеробно разграждане на органични отпадъци (стимулирано от добавянето на глюкоза) са разработени на базата на експериментални и генерирани данни (от детерминистични модели). Специализираният софтуерен пакет NNSYSID20 за MATLAB 5.3 е използван за обучение и тестване на невронните модели. Тествани са изкуствени невронни мрежи (ИНМ) с различни структури. Критериите за избор на структурите са: (а) валидност на моделите с експериментални данни, непознати на мрежата, и (б) статистически характеристики. Специално е изследвано влиянието на броя на експерименталните данни в процеса на разработване на модели на ИНМ.

Получените модели могат да бъдат полезни за симулация и автоматично управление на тези ферментационни процеси.

23. Kabaivanova, L., Najdenski, H., Hubenov, V., **Chorukova, E.**, Simeonov, I., Ivanova, J. Biotechnological exploitation of lignocellulosic wastes for biomethane production and algae cultivation in the digestate. International Journal of Pharma Medicine and Biological Sciences, 2020, 9(4), 152-157. (ISSN: 2278-5221)

Abstract:

The use of renewable energy sources and applying appropriate conditions for realization of anaerobic digestion of agricultural waste is carried out for obtaining higher yields of biomethane as an energy carrier. The influence of substrate type, quantity and pretreatment,

together with temperature regime on biomethane production was estimated. Both substrates generated higher biogas yields at the higher temperature regime and after pretreatment. The organic loading of 35 g/L was found to be most appropriate. The obtained liquid phase of anaerobic digestate was utilized as medium to maintain and enhance green microalgal growth. The ability of microalgae to photosynthetically fix carbon dioxide producing various biologically active substances, their short growth cycle and easy accumulation of biomass was involved. Due to their ability to colonize different environments these microorganisms represent promising sources for new products and applications. Good growth and development was observed for the microalga *Scenedesmus acutus* in digestate after adsorption with active carbon, using the macro and micronutrients present. This approach may lead to reducing costs and environmental impacts. Accumulated algal biomass (5 g/L) was afterwards introduced back in the reactor, realizing twice increased quantity of biogas on the second day of the anaerobic digestion process, generating biomethane.

Резюме:

Използването на възобновяеми енергийни източници и прилагането на подходящи условия за реализиране на анаеробно разграждане на селскостопански отпадъци се извършва с цел получаване на по-високи добиви на биометан като енергоносител. Оценено е влиянието на вида на субстрата, количеството и предварителната обработка, заедно с температурния режим, върху производството на биометан. И двата субстрата генерират по-високи добиви на биогаз при по-висок температурен режим и след предварителна обработка. Установено е, че органичното натоварване от 35 g/L е най-подходящо. Получената течна фаза на анаеробния дигестат е използвана като среда за поддържане и стимулиране на растежа на зелени микроводорасли. Взета е предвид способността на микроводораслите да фотосинтезират въглероден диоксид, произвеждайки различни биологично активни вещества, техният кратък цикъл на растеж и лесното натрупване на биомаса. Поради способността си да колонизират различни среди, тези микроорганизми представляват обещаващи източници за нови продукти и приложения. Наблюдаван е добър растеж и развитие на микроводораслото *Scenedesmus acutus* в дигестат след адсорбция с активен въглен, използвайки наличните макро- и микроелементи. Този подход може да доведе до намаляване на разходите и въздействието върху околната среда. Натрупаната водораслова биомаса (5 g/L) впоследствие е върната обратно в реактора, реализирайки двойно увеличено количество биогаз на втория ден от процеса на анаеробно разграждане, генерирайки биометан.

24. Simeonov, I., Kabaivanova, L., **Chorukova, E.** Two-stage anaerobic digestion of organic wastes: A review. Proceedings Book 18th IWA World Conference on Anaerobic Digestion, 2024, 963-970. (e-ISBN: 978-975-561-673-5)

Abstract:

It has long been known that the two main species (acidogenic and methanogenic) in the community of microorganisms in anaerobic digestion (AD) differ in many aspects and the optimal conditions for their growth and development are different. Therefore, in AD in a single bioreactor, the optimal conditions are selected taking into account the slow-growing methanogens at the expense of fast-growing acidogens, which affects the efficiency of the whole process. This has led in recent years to the development of two-stage AD (TSAD), in which processes are divided into a cascade of two separate bioreactors (BRs). It is known that this division of the processes into two consecutive BRs leads to significantly higher energy yields for the two-phase system ($H_2 + CH_4$), compared to the traditional single-stage CH_4

production process. The present paper aims to review the literature in the field of TSAD of organic wastes. This survey presents the state of the art (on the base of 193 references, from 2002 to 2024 and our own studies), including all aspects of TSAD.

Резюме:

Отдавна е известно, че двата основни вида (ацидогенни и метаногенни) в общността на микроорганизмите при анаеробно разграждане (АР) се различават по много аспекти и оптималните условия за техния растеж и развитие са различни. Следователно, при АР в единичен биореактор, оптималните условия се избират, като се вземат предвид бавнорастящите метаногени за сметка на бързорастящите ацидогени, което се отразява на ефективността на целия процес. Това доведе през последните години до развитието на двустепенно АР (ДСАР), при което процесите са разделени в каскада от два отделни биореактора (БР). Известно е, че това разделяне на процесите в два последователни БР води до значително по-високи енергийни добиви за двуфазната система ($H_2 + CH_4$) в сравнение с традиционния едностъпален процес за производство на CH_4 . Настоящата статия има за цел да направи преглед на литературата в областта на ДСАР на органични отпадъци. Този обзор представя състоянието на нещата (на базата на 193 източника, от 2002 до 2024 г. и наши собствени изследвания), включващ всички аспекти на ДСАР.

25. Pan, N., Wang, H., Tian, Y., **Chorukova, E.**, Simeonov, I., Christov, N. Theoretical comparative studies of the biogas yields from one-stage and two-stage anaerobic digestion processes. Ecological Engineering and Environment Protection, 2022, 2, 45-55. (e-ISSN: 2367-8429)

Abstract:

This paper deals with the theoretical comparison of biogas and energy yields of one-stage anaerobic digestion processes (OSAD) with biomethane production and two-stage anaerobic digestion processes (TSAD) producing biohydrogen and biomethane. The comparative study of the biogas yield from OSAD and TSAD systems is performed on the base on mathematical models obtained in our previous papers. The possible maximal yields of biohydrogen and biomethane are calculated by the static characteristics and extremum points of both systems. Simulation results suggest that in comparison to OSAD, the increase in biogas (biohydrogen and biomethane) production of TSAD can reach to 75.18%. The energy produced from two-stage anaerobic digestion processes is 1.32 to 1.486 times greater than those from one-stage anaerobic digestion processes (depending of the inlet organics concentrations), which means TSAD is a better choice considering biogas and energy production.

Резюме:

Настоящата статия разглежда теоретичното сравнение на добивите на биогаз и енергия от едностъпални процеси на анаеробно разграждане (ЕСАР) с производство на биометан и двустъпални процеси на анаеробно разграждане (ДСАР), произвеждащи биоводород и биометан. Сравнителното изследване на добива на биогаз от системите ЕСАР и ДСАР се извършва на базата на математически модели, получени в наши предходни статии. Възможните максимални добиви на биоводород и биометан се изчисляват чрез статичните характеристики и екстремалните точки на двете системи. Резултатите от симулацията показват, че в сравнение с ЕСАР, увеличението на производството на биогаз (биоводород и биометан) при ДСАР може да достигне до 75,18%. Енергията, произведена от двустъпалните процеси на анаеробно разграждане, е от 1,32 до 1,486 пъти по-голяма от тази, произведена от едностъпалните процеси на анаеробно разграждане (в зависимост от концентрациите на входящата органична

материя), което означава, че ДСАР е по-добър избор, като се вземат предвид производството на биогаз и енергия.

26. Simeonov I., Kabaivanova L., **Chorukova E.** Two-stage anaerobic digestion of organic wastes: a review. Ecological Engineering and Environment Protection, 2021, 3, 38-56. (ISSN: 1311-8668)

Abstract:

Anaerobic digestion is a biotechnological process, in which microorganisms degrade the complex organic matter to simpler components under anaerobic conditions to produce biogas and fertilizer. This process has many environmental benefits, such as green energy production, organic waste treatment, environmental protection and greenhouse gas emissions reduction.

It has long been known that the two main communities of microorganisms (acidogenic and methanogenic) taking part in the anaerobic digestion differ in many aspects e.g. their optimal conditions for cell growth and development. Therefore, the anaerobic digestion in a single bioreactor (BR) (single-phase process) required selected optimal conditions, taking into account the slow-growing methanogens at the expense of fast-growing acidogens, which affects the efficiency of the whole process. This has led in recent years to development of two-stage anaerobic digestion, in which the processes are divided into a cascade of two separate BRs. It is known that this separation of the processes into two consecutive BRs leads to significantly higher energy yields for the two-phase system ($H_2 + CH_4$), compared to the traditional single-stage CH_4 production process.

The present paper aims to review the literature in the field of two-stage anaerobic digestion of organic wastes.

Резюме:

Отдавна е известно, че двете основни общности от микроорганизми (ацидогенни и метаногенни), участващи в анаеробното разграждане, се различават по много аспекти, например оптималните условия за растеж и развитие на клетките им. Следователно, анаеробното разграждане в единичен биореактор (БР) (еднофазен процес) изисква подбрани оптимални условия, като се вземат предвид бавнорастящите метаногени за сметка на бързорастящите ацидогени, което се отразява на ефективността на целия процес.

Това доведе през последните години до развитието на двустепенно анаеробно разграждане, при което процесите са разделени в каскада от два отделни БР. Известно е, че това разделяне на процесите в два последователни БР води до значително по-високи енергийни добиви за двуфазната система ($H_2 + CH_4$) в сравнение с традиционния едностъпален процес за производство на CH_4 .

Настоящата статия има за цел да направи преглед на литературата в областта на двустъпалното анаеробно разграждане на органични отпадъци.

27. **Чорукова, Е.,** Хубенов, В., Кабаиванова, К., Гочева, Я., Симеонов, И. Двуфазна анаеробна биодegradация на царевичен екстракт. Екологично инженерство и опазване на околната среда, 2020, 4, 75-84. (ISSN:1311-8668)

Abstract:

Experimental studies of two-phase anaerobic digestion of corn steep liquor in continuous automatic and semi-automatic modes of the cascade system with simultaneous operation of both monitoring and control systems were performed. Corn steep liquor - a waste product from the process of treatment corn grain for starch extraction - was used as a substrate in the process of anaerobic biodegradation with hydrogen and methane production. The daily yields of biohydrogen in bioreactor 1 of the cascade (with working volume of 10 dm³) are variable and in good operation are in the range of 0.7 to 1.0 l of biogas from 1 dm³ working volume of the bioreactor, and the optimal pH range is in the range of 5.0 - 5.5. The concentration of hydrogen in the biogas from the hydrogen bioreactor 1 when a good process is accomplished is in the range of 14 - 34.7%. The daily yields of biomethane in bioreactor 2 of the cascade (with working volume of 80 dm³) vary in the range from 0.4 to 0.85 l of biogas from 1 dm³ working volume of the bioreactor, and the concentration of methane in the biogas from bioreactor 2 is high and remains practically constant (in the range 65-69%). At a dilution rate of 0.4 day⁻¹ and a organic loading rate of 20 g/l for bioreactor 1, respectively a dilution rate of 0.05 day⁻¹ for bioreactor 2, the best results were obtained.

Резюме:

Извършени са експериментални изследвания на двуфазно анаеробно разграждане на царевичен екстракт в непрекъснати автоматичен и полуавтоматичен режим на каскадна система с едновременно работна на системи за мониторинг и управление. Царевичният екстракт – отпадъчен продукт от процеса на обработка на царевично зърно за извличане на нишесте – е използван като субстрат в процеса на анаеробно биоразграждане с производство на водород и метан. Дневните добиви на биоводород в биореактор 1 на каскадата (с работен обем 10 dm³) са променливи и при добра работа са в диапазона от 0,7 до 1,0 l биогаз от 1 dm³ работен обем на биореактора, а оптималният диапазон на рН е в диапазона 5,0 - 5,5. Концентрацията на водород в биогаза от водородния биореактор 1 при добър процес е в диапазона 14 - 34,7%. Дневните добиви на биометан в биореактор 2 на каскадата (с работен обем 80 dm³) варират в диапазона от 0,4 до 0,85 l биогаз от 1 dm³ работен обем на биореактора, а концентрацията на метан в биогаза от биореактор 2 е висока и остава практически постоянна (в диапазона 65-69%). При степен на разреждане 0,4 day⁻¹ и органично натоварване 20 g/l за биореактор 1, съответно степен на разреждане 0,05 day⁻¹ за биореактор 2, са получени най-добрите резултати.

28. Симеонов, И., **Чорукова, Е.**, Акиванов, В. Система за управление на каскада от биореактори за получаване на водород и метан от органични отпадъци. Proc. of the Int. Conf. Automatics and Informatics'2019, 2019, 79-82. (ISSN: 1313-1850)

Abstract:

The article presents a control system for a cascade of bioreactors for the production of hydrogen and methane from organic waste. The system is implemented for the aim of verification and scaling of different technologies for two-phase anaerobic biodegradation of various organic wastes. The control system of the first bioreactor (hydrogen) of the cascade was realized on the basis of a personal computer and the LabVIEW software package, and that of the second bioreactor (methane) with a PLC controller of Beckhoff. Sensor information is stored on a PC and is also used to calculate unmeasurable technological quantities (software sensors), as well as to find optimal parameter values of control algorithms. Relay and type algorithms were tested to regulate the temperature in the bioreactor (with Beckhoff PLC controller) and to regulate the biogas flow (both with LabVIEW and PLC controller). The

results are satisfactory in terms of temperature control and unsatisfactory in terms of biogas flow control.

Резюме:

Статията представя система за управление на каскада от биореактори за производство на водород и метан от органични отпадъци. Системата е реализирана с цел верификация и мащабиране на различни технологии за двуфазно анаеробно биоразграждане на различни органични отпадъци. Системата за управление на първия биореактор (водороден) от каскадата е реализирана на базата на персонален компютър и софтуерния пакет LabVIEW, а тази на втория биореактор (метанов) – с PLC контролер на Beckhoff. Сензорната информация се съхранява на персонален компютър и се използва също за изчисляване на неизмерими технологични величини (софтуерни сензори), както и за намиране на оптимални стойности на параметрите на алгоритмите за управление. Тествани са релейни и PID алгоритми за регулиране на температурата в биореактора (с PLC контролер на Beckhoff) и за регулиране на потока на биогаз (както с LabVIEW, така и с PLC контролер). Резултатите са задоволителни по отношение на регулирането на температурата и незадоволителни по отношение на регулирането на потока на биогаз.

29. Kabaivanova, L., Goushterova, A., Brazkova, M., Grozdanov, P., **Chorukova, E.**, Krastanov, A. Parameters optimization for increased intracellular inulinase activity of a yeast strain. Ecological Engineering and Environment Protection, 1, 2019, 62-70. (ISSN:2367-8429)

Abstract:

This study reveals the selection of a yeast strain, possessing inulinase activity and finding the optimal conditions of cultivation. Intra- and extracellular activity assay was performed after cultivation on media, containing inulin as a sole source of carbon. Optimization of the cultivation conditions was carried out for establishing the favorable conditions for biosynthesis of inulinase. Modifying the physicochemical and nutritional parameters of a cultivation process lead to major improvement of the enzyme activity. Highest intra- and extracellular inulinase activity was registered when 1.5% inulin was used, 5% inoculum, temperature 28°C, pH=6.5 and agitation of 200rpm. The selected strain *Kluveromyces* sp. C showed higher values for the intracellular inulinase activity, making it suitable for immobilization and further use.

Резюме:

Това изследване разкрива селекцията на дрожден щам, притежаващ инулиназна активност и определянето на оптималните условия за култивиране. Изследване на вътреклетъчната и извънклетъчната активност е проведено след култивиране върху хранителни среди, съдържащи инулин като единствен източник на въглерод. Оптимизация на условията на култивиране е извършена за установяване на благоприятните условия за биосинтеза на инулиназа. Модифицирането на физикохимичните и хранителните параметри на процеса на култивиране води до значително подобряване на ензимната активност. Най-висока вътреклетъчна и извънклетъчна инулиназна активност е регистрирана при използване на 1,5% инулин, 5% инокулум, температура 28°C, pH=6,5 и аерация 200 об/мин. Избраният щам *Kluveromyces* sp. C показва по-високи стойности за вътреклетъчната инулиназна активност, което го прави подходящ за имобилизация и по-нататъшна употреба.

30. Simeonov, I., **Chorukova, E.**, Akivanov, V., Lakov, V., Mihailova, S. Experimental pilot scale biogas plant with computer system for monitoring and control. Proc. of the Int. Conf. Automatics and Informatics'2017, 2017, 239-242. (ISSN:1313-1850)

Abstract:

The paper describes the pilot biogas plant with monitoring and control system of the Stephan Angeloff Institute of Microbiology – Bulgarian Academy of Sciences. The biogas plant was designed to work out and scale up various AD technologies based on different types of feedstock. All the data are stored on a PC for quick reference, data mining, and for parameter identification and validation of different AD mathematical models. Some data are further processed to produce some unmeasurable AD process variables or optimized control parameters on the basis of various estimation and control algorithms which are under development and testing. The system is equipped with a PC with specialized software (LabVIEW) which allows recording of conventional hardware sensors measurements, and new sensors such as those for pH of the effluent and specific biochemical analysis. The PC equipment also allows implementation of software sensors for the estimation of specific growth rates of two main bacteria populations. Many experimental studies have demonstrated good performances of this system and its potential interest in industrial applications.

Резюме:

Статията описва пилотна биогазова инсталация със система за мониторинг и управление на Института по микробиология „Стефан Ангелов“ – Българска академия на науките. Биогазовата инсталация е проектирана за разработване и мащабиране на различни технологии за анаеробно разграждане, базирани на различни видове суровини. Всички данни се съхраняват на персонален компютър за бърза справка, извличане на данни, както и за идентификация на параметри и валидиране на различни математически модели на анаеробно разграждане. Някои данни се обработват допълнително за получаване на някои неизмерими променливи на процеса на анаеробно разграждане или оптимизирани параметри за управление на базата на различни алгоритми за оценка и управление, които са в процес на разработка и тестване. Системата е оборудвана с персонален компютър със специализиран софтуер (LabVIEW), който позволява записване на измервания от конвенционални хардуерни сензори, както и от нови сензори, като тези за рН на ефлуента и специфични биохимични анализи. Компютърното оборудване позволява също така внедряване на софтуерни сензори за оценка на специфичните скорости на растеж на две основни бактериални популации. Множество експериментални изследвания демонстрират добри показатели на тази система и нейния потенциал за индустриални приложения.

31. Lakov, V., **Chorukova, E.**, Simeonov, I. Mathematical modelling and extremum seeking control of cascade of two bioreactors for production of hydrogen and methane. Information Technologies and Control, 15, 2, DE GRUYTER OPEN, 2017, 6-13. (ISSN:2367-5357, DOI:10.1515/itc-2017-0022)

Abstract:

A mathematical model of a cascade of two continuously stirred anaerobic bioreactors is presented in this paper and the extremum seeking control is applied on it. The dilution rate of the first bioreactor is chosen as control action and the joint biogas flow rate both bioreactors is the measured output to be maximized. The concentration of inlet organics is accepted as the disturbance. The correction of the working volume of the second bioreactor is studied as the inner loop of the cascade control system. The outer control loop is represented by the extremum

seeking controller, which finds the optimum control action and reacts to the disturbance. Computer simulation studies show the feasibility of this scheme.

Резюме:

В тази статия е представен математически модел на каскада от два непрекъснато разбърквани анаеробни биореактора и е приложено управление за търсене на екстремум. Степента на разреждане на първия биореактор е избрана като управляващо въздействие, а общият дебит на биогаз от двата биореактора е измерената изходна величина, която трябва да бъде максимизирана. Концентрацията на входящата органична материя е приета като смущение. Корекцията на работния обем на втория биореактор е изследвана като вътрешен контур на каскадната система за управление. Външният контур на управление е представен от контролер за търсене на екстремум, който намира оптималното управляващо въздействие и реагира на смущението. Компютърни симулационни изследвания показват осъществимостта на тази схема.

32. Hubenov V., Kabaivanova L., Denchev D., **Chorukova E.**, Simeonov I., Mihaylova, S., Lakov, V. Anaerobic biodegradation of lignocellulosic wastes for biohydrogen and biomethane production-study and mathematical modeling. Microbiology for a better health and Industry - Jubilee book 70 years the Stephan Angeloff Institute of microbiology, 2017, 143-155. (ISBN:978-954-92882-2-3)

Abstract:

The aim of the paper was to present some aspects of the anaerobic digestion process with biohydrogen or biomethane production using lignocellulosic wastes and anaerobic microbial consortia. The opportunities for realization of a two-phase biotechnological process as well as some advantages in comparison with the one stage methane production were discussed. The results from this study revealed that the use of cells separated as inoculums in concentration of 100 mg dry cells/g substrate stabilized the process and it took place without given methane release. The hydrogen concentration in the biogas reached 20-40 %. The maximum yield of hydrogen and the degree of biodegradation was obtained by alkali-treated straw. Our results confirmed that the two-phase process allowed the energy yield to be increased by 34,3% compared to the single-phase process. Mathematical modeling of the two-phase anaerobic biodegradation with production of biohydrogen and biomethane was also discussed. The assessment of the quality of the process using extremum seeking control as a type of optimum control strategy was used in situations where mathematical model of the process was unknown or containing uncertain parameters.

Резюме:

Целта на статията беше да представи някои аспекти на процеса на анаеробно разграждане с производство на биоводород или биометан, използвайки лигноцелулозни отпадъци и анаеробни микробни консорциуми. Бяха обсъдени възможностите за реализация на двуфазен биотехнологичен процес, както и някои предимства в сравнение с еднофазното производство на метан. Резултатите от това изследване показаха, че използването на клетки, отделени като инокулуми в концентрация 100 mg сухи клетки/g субстрат, стабилизира процеса и той протече без отделяне на метан. Концентрацията на водород в биогаза достигна 20-40%. Максималният добив на водород и степента на биоразграждане бяха получени при третирана с алкали слама. Нашите резултати потвърдиха, че двуфазният процес позволява увеличаване на енергийния добив с 34,3% в сравнение с еднофазния процес. Беше обсъдено и математическото моделиране на двуфазното анаеробно биоразграждане с производство на биоводород и биометан.

Оценката на качеството на процеса, използваща управление за търсене на екстремум като вид стратегия за оптимално управление, беше приложена в ситуации, когато математическият модел на процеса е неизвестен или съдържа несигурни параметри.

33. **Chorukova, E., Simeonov, I.** Mathematical modeling of the two-stage anaerobic digestion system with production of hydrogen and methane. Proc. of the Int. Conf. Automatics and Informatics'2017, 2017, 235-238. (ISSN:1313-1850)

Abstract:

Anaerobic digestion is a multi-step biotechnological process, in which hydrogen is not detected as it is consumed immediately e.g. by hydrogenotrophic methanogens to produce methane and carbon dioxide. Recently a two-stage AD concept consisting of hydrogenic process followed by methanogenic process was suggested. However, only few models of this process are known. In this study a mathematical model of a continuous process of AD with production of hydrogen and methane in a cascade of two bioreactors, including some intermediate products in the first bioreactor was developed and investigated.

Резюме:

Анаеробното разграждане е многостъпален биотехнологичен процес, при който водород не се открива, тъй като се консумира незабавно, например от хидрогенотрофни метаногени, за да произведе метан и въглероден диоксид. Наскоро беше предложена концепция за двустъпално анаеробно разграждане, състояща се от водороден процес, следван от метаногенен процес. Известни са само няколко модела на този процес. В това изследване е разработен и изследван математически модел на непрекъснат процес на анаеробно разграждане с производство на водород и метан в каскада от два биореактора, включващ някои междинни продукти в първия биореактор.