Сравнителни изследвания на добивите на енергия при едностъпални и двустъпални процеси на анаеробна биодеградация

И. Симеонов[2], Н. Пан[1], Х. Ван[1], Я. Тян[1], Е. Чорукова[2], Н. Христов[3]

Energy Yields Comparative Study for One-Stage and Two-Stage Anaerobic Digestion Processes

I. Simeonov[2], N. Pan[1], H. Wang [1], Y. Tian[1], E. Chorukova[2], N. Christov[3]

[1] LaFCAS Laboratory, Automation School, Nanjing University of Science and Technology, 200 Xiao Ling Wei St., Nanjing 210094, China, hp.wang@njust.edu.cn

[2] The Stephan Angeloff Institute of Microbiology, Bulgarian Academy of Sciences, Acad. G. Bonchev St., bl. 26, 1113 Sofia, Bulgaria, issim@microbio.bas.bg, elena@microbio.bas.bg

[3] Centre de Recherche en Informatique, Signal et Automatique de Lille – UMR 9189, Université de Lille, 59655 Villeneuve d'Ascq, France, nicolai.christov@univ-lille.fr

Key Words: *Anaerobic digestion; one-stage anaerobic digestion processes; two-stage anaerobic digestion processes; mathematical modeling; static characteristics; biogas yields; energy yield.*

Abstract. *Compared to traditional one-stage anaerobic digestion processes (OSAD) with biomethane production, this paper focuses on the study of energy yield of the two-stage anaerobic digestion processes (TSAD), which are able to produce simultaneously biohydrogen and biomethane. In TSAD, relatively fast growing acidogens and H_2-producing bacteria are developed in the first-stage hydrogenic bioreactor and are involved in the production of volatile fatty acides (VFA) and H_2. On the other hand, the slow growing acetogens and methanogens are developed in the second-stage methanogenic bioreactor, in which the produced VFA are further converted to CH_4 and CO_2. This separation allows to optimize physico-chemical parameters for both groups of microorganisms which are not the same. Using mathematical models (mass balance type) developed by our team, theoretical comparative analysis of the energy yield from one-stage and two-stage anaerobic digestion systems is performed. Transforming the differential equations of these balance models, some algebraic equations called static characteristics for both bioreactors were obtained. They represent dependencies of the main process variables from the control variable (dilution rate). On the basis of theese results, the theoretical maximal values of the corresponding enery carriers (hydrogen and methane) yields can be found for different values of the inlet organics (perturbation). The possible maximal biohydrogen and biomethane yields and the overall energy production are calculated by the static characteristics and extremum points of both systems. From the performed analytical and simulation studies, it can be seen that the energy obtained with TSAD is from 32% to 48% greater compared to OSAD under similar conditions (depending on the concentration of the incoming organics).*

1. Въведение

Анаеробната биодеградация на органични отпадъци (АБД) е добре известна биотехнология за пречистване и получаване на възобновяема енергия [Ahring et al., 2003]. Двустъпалната анаеробна биодеградация (ДАБД), при която се получават едновременно водород (H_2) и метан (CH_4) [Ruggeri et al., 2015; Simeonov et al., 2021], напоследък беше предложена като обещаваща биотехнология за получаване на по-високи енергийни добиви в сравнение с едностъпалната анаеробна биодеградация (ЕАБД) [Gioannis et al., 2017].

Целта на това изследване е да се сравнят теоретичните максимални добиви на енергия от едностъпална и двустъпална анаеробна биодеградация на основата на математически модели на двата вида процеси.

2. Описание на процесите

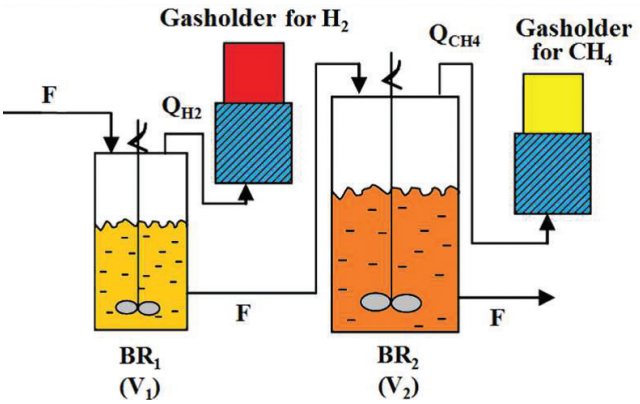
Блоковата схема на ДАБД е показана на *фиг. 1*, където бързите процеси на хидролиза и ацидогенеза протичат в първия биореактор (БР) – $БР_1$, в който се произвежда само водород като енергиен източник, а по-бавните процеси на ацетогенеза и метаногенеза протичат във втория $БР_2$, в който се произвежда само метан. Да допуснем, че обемите на двата биореактора V_1 и V_2 са постоянни. Нека F_1 и F_2 са входящите потоци съответно на $БР_1$ и $БР_2$ и $F_1 = F_2 = F$. Известно е, че степените на D_1 и D_2 се дефинират като

(1) $D_1 = F/V_1$, $D_2 = F/V_2$.

Тогава

(2) $D_2 = (V_1/V_2)D_1 = \gamma D_1$ или $\gamma = V_1/V_2$.

Известно е, че обемът V_2 на БР$_2$ за получаване на метан е по-голям от V_1 на БР$_1$. Следователно константата $\gamma < 1$.



Фиг. 1. Блокова схема на ДАБД

3. Математическо моделиране на процесите на едностъпална анаеробна биодеградация (ЕАБД) и двустъпална анаеробна биодеградация (ДАБД)

Известни са много динамични математически модели на АБД [Simeonov, 1994]. За конкретна цел е много важно да се избере подходящ модел.

3.1. Динамичен модел на едностъпална анаеробна биодеградация (ЕАБД)

На основата на експериментални изследвания и натрупания опит е избран относително опростен динамичен модел, който е изграден на основата на т. нар. тристъпална схема на протичане на процесите (хидролиза, ацидогенеза и метаногенеза) [Simeonov et al. 2011; Wang et al. 2013]. Той описва основните процеси при непрекъснат режим на работа в БР с непрекъснато разбъркване и представлява система от пет обикновени нелинейни диференциални уравнения (ОДУ) и едно алгебрично уравнение на изхода:

(3) $$\frac{dS_0}{dt} = -DS_0 - \beta X_1 S_0 + DY_P S_0^{in}$$

(4) $$\frac{dX_1}{dt} = \mu_1 X_1 - DX_1$$

(5) $$\frac{dS_1}{dt} = -DS_1 + \beta X_1 S_0 - \frac{\mu_1 X_1}{Y_1}$$

(6) $$\frac{dX_2}{dt} = \mu_2 X_2 - DX_2$$

(7) $$\frac{dS_2}{dt} = -DS_2 + Y_b \mu_1 X_1 - \frac{\mu_2 X_2}{Y_2}$$

(8) $$Q = Y_g \mu_2 X_2,$$

където

(9) $$\mu_1 = \frac{\mu_{1\max} S_1}{k_{S1} + S_1}, \mu_2 = \frac{\mu_{2\max} S_2}{k_{S2} + S_2}$$

Управляващ вход на модела е степента на разреждане D, изход е дебитът на метан Q, а основното външно смущение е концентрацията на входяща органика S_0^{in}. За специфичните скорости на растеж са избрани нелинейни функции от тип Моно (9).

Всички параметри на този модел са дадени в [Wang et al. 2013].

3.2. Динамичен модел на двустъпална анаеробна биодеградация (ДАБД)

Един от относително опростените нелинейни динамични модели на ДАБД, при който са възможни аналитични изследвания [Chorukova and Simeonov, 2020], е представен по-долу.

Моделът на непрекъснат биотехнологичен процес за получаване на водород в БР$_1$ представлява система от шест ОДУ и едно алгебрично уравнение на изхода (дебит на биоводород):

(10) $$\frac{dS_0}{dt} = -D_1 S_0 - \beta X_1 S_0 + D_1 Y_p S_0^{in}$$

(11) $$\frac{dS_1}{dt} = -D_1 S_1 + \beta X_1 S_0 - \frac{\mu_1 X_1}{Y_1}$$

(12) $$\frac{dX_1}{dt} = \mu_1 X_1 - D_1 X_1$$

(13) $$\frac{dPr_1}{dt} = \frac{\mu_1 X_1}{Y_{Pr1}} - D_1 Pr_1$$

(14) $$\frac{dBut_1}{dt} = \frac{\mu_1 X_1}{Y_{But1}} - D_1 But_1$$

(15) $$\frac{dAc_1}{dt} = \frac{\mu_1 X_1}{Y_{Ac1}} - D_1 Ac_1$$

(16) $$Q_{H_2} = Y_{H_2} \mu_1 X_1$$

Управляващ вход на модела е степента на разреждане D_1, изход е дебитът на водород Q_{H2}, а основното външно смущение е концентрацията на входяща органика S_0^{in}. За специфичните скорости на растеж са избрани нелинейни функции от тип Моно (9).

Моделът на непрекъснат биотехнологичен процес за получаване на метан в БР$_2$ от прехвърлените от БР$_1$ междинни продукти [Chorukova and Simeonov, 2020] представлява система от шест ОДУ и едно алгебрично уравнение на изхода (дебит на метан):

(17) $$\frac{dX_{Pr}}{dt} = \mu_{Pr} X_{Pr} - D_2 X_{Pr}$$

(18) $$\frac{dPr_2}{dt} = -\frac{\mu_{Pr} X_{Pr}}{Y_{Pr2}} + D_2 (Pr_1 - Pr_2)$$

(19) $$\frac{dX_{But}}{dt} = \mu_{But} X_{But} - D_2 X_{But}$$

(20) $$\frac{dBut_2}{dt} = -\frac{\mu_{But} X_{But}}{Y_{But2}} + D_2 (But_1 - But_2)$$

(21) $$\frac{dX_{Ac}}{dt} = \mu_{Ac} X_{Ac} - D_2 X_{Ac}$$

(22) $$\frac{dAc_2}{dt} = -\frac{\mu_{Ac} X_{Ac}}{Y_{Ac2}} + \frac{\mu_{Pr} X_{Pr}}{Y_{Pr2}} + \frac{\mu_{But} X_{But}}{Y_{But2}} + D_2 (Ac_1 - Ac_2)$$

(23) $$Q_{CH_4} = Y_{CH_4} \mu_{Ac} X_{Ac}$$

(24) $$\mu_{Pr} = \frac{\mu_{Pr\max} Pr_2}{k_{SPr} + Pr_2}$$

(25) $$\mu_{But} = \frac{\mu_{But\max} But_2}{k_{SBut} + But_2}$$

(26) $$\mu_{Ac} = \frac{\mu_{Ac\max} Ac_2}{k_{SAc} + Ac_2}$$

За специфичните скорости на растеж са избрани нелинейни функции от тип Моно (22) и (23).

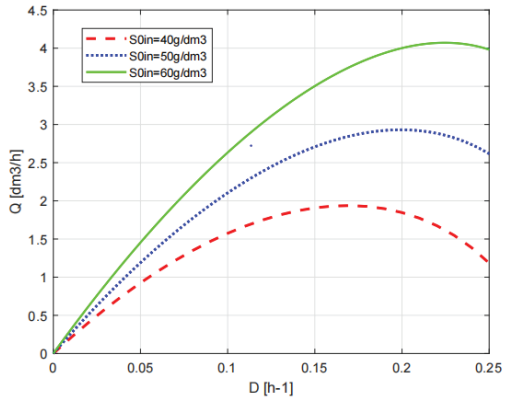
Всички параметри на този модел са дадени в [Chorukova and Simeonov, 2020].

4. Статични характеристики

4.1. Статични характеристики на едностъпална анаеробна биодеградация (ЕАБД)

Равновесните точки на процеса на ЕАБД могат да се получат като решение на системата алгебрични уравнения, получена чрез нулиране на дясната част на системата от ОДУ (3-9) [Simeonov, 1994]. Те са получени аналитично като функция на степента на разреждане D и концентрацията на входяща органика S_0^{in} [Pan et al., 2022].

Задавайки различни стойности на управляващата променлива D, се получава входно-изходната статична характеристика на изхода (дебит на получаваният метан) Q = (D) при параметър S_0^{in}. Тя е показана на *фиг. 2*.



Фиг. 2. Входно-изходната статична характеристика Q = (D) при параметър S_0^{in} за ЕАБД

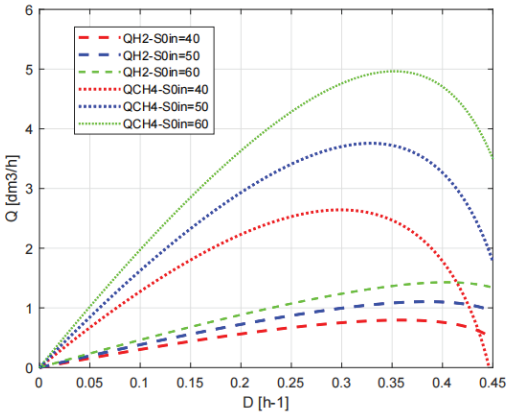
От *фиг. 2* се вижда, че съществува една-единствена максимална точка (D_{max}, Q_{max}).

3.4 Статични характеристики на двустъпална анаеробна биодеградация (ДАБД)

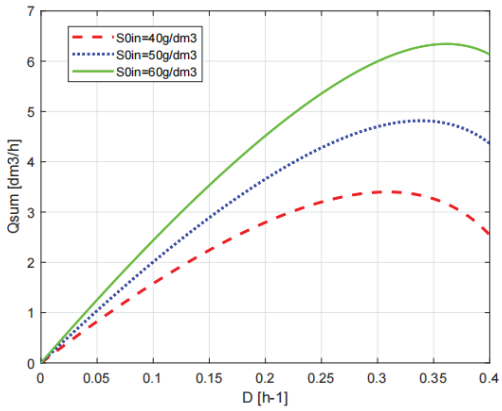
По същия начин са получени статичните характеристика за двата биореактора при ДАБД [Chorukova and Simeonov, 2020]. Те са показани на *фиг. 3* и *фиг. 4*.

В [Chorukova and Simeonov, 2020] са представени статичните характеристики за всички променливи. От тях може да се направят следните изводи:

1. Всички характеристики са нелинейни.
2. Всички характеристики зависят от S_0^{in}, с изключение на $S_1 = f(D_1)$.
3. Само входно-изходните характеристики $Q_{H_2} = f(D_1)$ и $Q_{CH_4} = f(D_2)$ имат максимуми.
4. Не е възможно да се намери аналитично решение за D_{1max} , съответстващо на $Q_{H_2} = Q_{H_{2max}}$, и D_{2max}, съответстващо на $Q_{CH_4} = Q_{CH_{4max}}$. Тези стойности трябва да се изчисляват числено.



Фиг. 3. Входно-изходни статични характеристики $Q_{H_2} = f_1(D)$ и $Q_{CH_4} = f_2(D)$ за различни стойности на S_0^{in} при ДАБД



Фиг. 4. Статична характеристика $Q_{sum}(D) = Q_{H_2} + Q_{CH_4}$ за различни стойности на S_0^{in} при ДАБД

Съотношението на обемите на двата биореактора γ е прието за константно при анализите на статичните характеристики. Това съотношение е много важно при определяне на максимума на получаваната енергия [Chorukova et al, 2021].

5. Симулационни изследвания

Проведени са детайлни симулационни изследвания с използването на Simulink на Matlab, които потвърждават получените по аналитичен път резултати. Изчислени са максималните добиви на биоводород и биометан при ЕАБД и при ДАБД за различни стойности на S_0^{in} [Pan et al., 2022]. Стойностите са показани в *табл. 1*.

Теоретичните сравнения могат да се правят само при следните допускания:

1. Един и същи субстрат (органичен отпадък) се разгражда при ЕАБД и при ДАБД.
2. Не възниква субстратно инхибиране във всички разглеждани случаи.
3. Биореакторите работят през цялото време достатъчно близо до теоретичните максимуми за получаване и на биоводород и на биометан. Това може да се осъществи с прилагането на достатъчно добри алгоритми за екстремално управление [Dandan et al., 2021].

Табл. 1. Максимални стойности на дебитите на биогаз

Биогаз [м³/л.час]	S_0^{in} =40 [г/дм³]	S_0^{in} = 50 [г/дм³]	S_0^{in} = 60 [г/дм³]
Q^{max} (ЕАБД)	$1.9379.10^{-3}$	$2.9307.10^{-3}$	$4.0707.10^{-3}$
Q_{H2}^{max} (ДАБД)	$0.7956.10^{-3}$	$1.1041.10^{-3}$	$1.4288.10^{-3}$
Q_{CH4}^{max} (ДАБД)	$2.6421.10^{-3}$	$3.7573.10^{-3}$	$4.9636.10^{-3}$
Q_{sum} (ДАБД)	$3.3996.10^{-3}$	$4.8166.10^{-3}$	$6.3430.10^{-3}$

От *табл. 1* се вижда, че при работа на биореакторите в максималните точки при ДАБД добивите са с от 55.8% до 75.4% по-големи от тези при ЕАБД (работа също в максималната точка).

6. Енергиен потенциал на получаваните H_2 и CH_4

Енергийният потенциал от ДАБД и ЕАБД беше оценен чрез относителната плътност на H_2 и CH_4

- 0.089 kgH_2/m^3 H_2
- 0.72 $kgCH_4/m^3$ CH_4

и съответно тяхната енергийна стойност

- 120 MJ/kgH_2,
- 50 $MJ/kgCH_4$,

умножени по продукцията на биоводород (16) и биометан (23) за специфичен обем [Thungklin et al., 2018].

E(+) е енергийният потенциал на газа от АБД за ден (MJ/d).

(27) $E(+)H_2$ = продукцията на H^2 x [0.089 kg H_2 / m^3 H_2 x $1m^3H_2$ / 1000 LH_2] x [120 MJ/kgH_2]

(28) $E(+)CH_4$ = продукцията на CH_4 x [0.72 $kgCH_4/m^3CH_4$ x $1m^3$ CH_4 /1000 L CH_4] x [50 $MJ/kgCH_4$]

Прилагайки (27) и (28) за данните от *табл. 1*, е изчислен енергийният потенциал за ЕАБД и ДАБД (*табл. 2*). От *табл. 2* се вижда, че енергийният потенциал за ДАБД е от 1.32 до 1.485 пъти по-голям от този на ЕАБД в зависимост от концентрацията на входяща органика.

Табл. 2

Енергия [MJ/л.час]	S_0^{in} =40 [г/дм³]	S_0^{in} =50 [г/дм³]	S_0^{in} =60 [г/дм³]
$E^{maxOSAD}$ (ЕАБД)	$69.76.10^{-6}$	$105.5.10^{-6}$	$146.5.10^{-6}$
E_{H2}^{max} (ДАБД)	$8.5.10^{-6}$	$11.792.10^{-6}$	$15.259.10^{-6}$
E_{CH4}^{max} (ДАБД)	$95.11.10^{-6}$	135,26	178.69
$E_{sum}^{maxTSAD}$ (ДАБД)	$103.61.10^{-6}$	$147.05.10^{-6}$	$193.95.10^{-6}$
$E_{sum}^{maxДАБД}$ / $E^{maxЕАБД}$	1.485	1.39	1.32

7. Заключение

В тази работа са сравнени максималните теоретични добиви на енергия при еднофазна и при двуфазна АБД на органични отпадъци на основата на математически модели на процесите в биореактори с непрекъснато разбъркване и при идентични условия.

Изследването на статичните характеристики по-

казва съществуването на максимуми за дебитите на получаваните биоводород и биометан. Това е важно за практиката и в бъдеще може да доведе до оптимизиране на работата на биореакторите с оглед достигането на максимална продукция на енергия чрез реализация на екстремални алгоритми за управление [Dandan et al., 2021].

От проведените аналитични и симулационни изследвания се вижда, че получената енергия при ДАБД е от 32% до 48% по-голяма спрямо ЕАБД при аналогични условия (в зависимост от концентрацията на входящата органика).

Благодарности

Тази работа е подкрепена финансово от Междуправителствената програма на Китай 2021YFE0102700 и на българския Фонд „Научни изследвания“ No KP-06-IP-CHINA/3.

Литература

1. Ahring, B. (Ed.). Biomethanation, I and II. Springer – Verlag Berlin – Heidelberg, 2003.

2. Chorukova, E, I. Simeonov, L. Kabaivanova. Volumes Ratio Optimization in a Cascade Anaerobic Digestion System Producing Hydrogen and Methane. – *Ecol Chem Eng S*., 28, 2021, 2,183-200.

3. Chorukova, E., V. Hubenov, Y. Gocheva and I. Simeonov. Two-Phase Anaerobic Digestion of Corn Steep Liquor in Pilot Scale Biogas Plant with Automatic Control System with Simultaneous Hydrogen and Methane Production. – *Appl. Sci*., 2022, 12, 6274.

4. Chorukova, E., I. Simeonov. Mathematical Modeling of the Anaerobic Digestion in Two-Stage System with Production of Hydrogen and Methane Including Three intermediate products. – I*nternational Journal of Hydrogen Energy*, 45, 2020, 20, 11550-11558.

5. Gioannis, G. D., A. Muntoni, A. Polettini, R. Pomi and D. Spiga. Energy Recovery from One- and Two-Stage Anaerobic Digestion of Food Waste. – *Waste Management,* 2017, 68 (Oct.), 595-602.

6. Ning, Pan, Haoping Wang, Yang Tian, Elena Chorukova, Ivan Simeonov, Nicolai Christov. Comparison Study of Dynamic Models for One-stage and Two-stage Anaerobic Digestion Processes, IFAC PapersOnLine 55-7, 2022, 667-672.

7. Ruggeri, B., T. Tommasi and S. Sanfilippo. BioH2 & BioCH4 Through Anaerobic Digestion, 2015.

8. Simeonov I., L. Kabaivanova, E. Chorukova. Two-Stage Anaerobic Digestion of Organic Wastes: A Review. – *Ecological Engineering and Environment Protection*, 2021, No. 3, 38-56.

9. Simeonov, I. Modelling and Control of Anaerobic Digestion of Organic Waste. – *Chem. and Biochem. Eng*. Q., 8, 1994, 2, 1994, 45-52.

10. Simeonov, I., V. Hubenov, E. Chorukova. Renewable Energy from Two-Stage Anaerobic Digestion of Organic Wastes. Proc. of 17-th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), 1-4 July 2021, Sofia, Bulgaria.

11. Thungklin, P., S. Sittijunda, A. Reungsang. Sequential Fermentation of Hydrogen and Methane from Steam-Exploded Sugarcane Bagasse Hydrolysate. – *International Journal of Hydrogen Energy*, 43, 2018, 9924-9934.

12. Wang, H. P., Y. Tian, B. Kalchev, I. Simeonov and N. Christov. Pilot Anaerobic Plant's Description, Modeling and Output Feedback Control. Proceedings of the 32nd Chinese Control Conference, 2013.

13. Dandan, Xu, Haoping Wang, Yang Tian, Nicolai Christov, Lyudmila Kabaivanova, Ivan Simeonov. An UKF-Based Extremum Seeking Control of Two-Stage Anaerobic Digestion Process. Proc. of International Conference Automatics and Informatics`2021, September 30 – October 2, 2021, Varna, Bulgaria (ICAI'21), ©2021 IEEE, 62-67.

За контакти:
Доц. д-р **Иван Симеонов**
issim@microbio.bas.bg
Гл. ас. д-р **Елена Чорукова**
elena@microbio.bas.bg
Институт по микробиология „Стефан Ангелов“
БАН, ул. Акад. Г. Бончев, бл. 26, 1113 София
Нин Пан, Хаопин Ван, Ян Тян
Френско-китайска лаборатория по автоматика
и обработка на сигнали LaFCAS, Нанкински университет за наука и технологии, Китай
LaFCAS Laboratory, Automation School, Nanjing University of Science and Technology, 200 Xiao Ling Wei St., Nanjing 210094, China
hp.wang@njust.edu.cn
Проф. **Николай Христов**
Научноизследователски център по информатика, обработка на сигнали и автоматика CRIStAL, Университет на Лил, Франция
Centre de Recherche en Informatique, Signal et Automatique de Lille – UMR 9189, Université de Lille, 59655 Villeneuve d'Ascq, France
nicolai.christov@univ-lille.fr