

УДК 628.355

DOI: 10.15587/2313-8416.2014.28767

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ АНАЭРОБНОГО СБРАЖИВАНИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО СУБСТРАТА. ОБЗОР

©Л. И. Ружинская, А. А. Фоменкова

Проведен анализ существующих моделей анаэробного сбраживания органического вещества с выделением биогаза. Представлены наиболее используемые в литературе модели, описывающие кинетику метанового сбраживания, а так же кинетические параметры данного процесса. Предложенные модели описывают рост и развитие микробной популяции, деградацию компонентов субстрата и образование продуктов микробиологической реакции в анаэробном биореакторе.

Ключевые слова: Анаэробное брожение, математическое моделирование, очистка сточных вод, биореактор.

An analysis of existing models of anaerobic fermentation of organic matter with biogas emission is performed. The most used in the literature models describing the kinetics of methane fermentation, as well as the kinetic parameters of the process are presented. The proposed models describe the growth and development of the microbial population, the degradation of substrate components and formation of reaction products in the anaerobic microbial bioreactor.

Keywords: Anaerobic fermentation, mathematical modeling, wastewater treatment, bioreactor.

1. Введение

Биоконверсия органических отходов является одним из самых прогрессивных, экономически эффективных и экологически приемлемых решений предотвращения загрязнения окружающей среды. При этом есть возможность рационально использовать органические вещества и увольнять аккумулированную в них энергию. Однако, на сегодняшний день использование переработки органических веществ методами анаэробного сбраживания с целью получения биогаза в Украине весьма ограничено. Это объясняется тем, что практически отсутствуют теоретические и экспериментальные исследования процессов биоконверсии органических веществ в анаэробных биореакторах при очистке сточных вод.

2. Постановка проблемы

Процессы анаэробного сбраживания являются довольно сложными и часто страдают от нестабильности. Такая нестабильность обычно приводит к таким явлениям, как снижение скорости добычи метана, снижение pH, повышение концентрации летучих жирных кислот (ЛЖК), что приводит к сбоям в работе биореакторов. Это обусловлено такими факторами, как перегрузками в питании биореактора или недогрузками, действием ингибитора, недостаточным контролем температуры. Для того, чтобы проектировать и эффективно оперировать анаэробными системами сбраживания должны быть разработаны, соответствующие математические модели.

3. Формирование целей

Цель данной работы – анализ состояния теоретического описания кинетики процесса анаэробной очистки сточной воды с выделением биогаза.

4. Рост и развитие микробной популяции

В процессе анаэробного сбраживания принимают участие различные группы микроорганизмов. Кинетика роста микроорганизмов каждой из рассматриваемых групп может быть описана через изменение концентрации биомассы в реакторе $\frac{dX}{dt}$ в зависимости от удельной скорости роста биомассы μ , сут⁻¹, удельной скорости отмирания биомассы k_d , сут⁻¹, концентраций биомассы во входящем и выходящем потоке X_0 , X_B , соответственно, кг_{БМ}/кг_С по уравнению [1–8]:

$$\frac{dX}{dt} = D(X_0 - X_B) + \mu X - k_d X, \quad (1)$$

где D – скорость разбавления среды, сут⁻¹.

Отличия подходов различных авторов при описании кинетики бактериального роста заключаются в выборе из факторов, влияющих на удельную скорость роста микрофлоры, наиболее значимых. В общем случае, удельная скорость роста микроорганизмов зависит от доступности лимитирующего субстрата S , наличия ингибиторов I , от pH и температуры среды и т. д.

$$\mu = \mu(S, I, pH, T \dots)$$

Модель кинетики роста микрофлоры описывают исходя из нескольких подходов, которые учитывают [1, 4, 7]:

– влияние максимальной удельной скорости роста микроорганизмов и концентрации

лимитирующего субстрата (базовая модель Моно, 1949, модель Контуа, 1959 и т.п.), а так же уровень деградации субстрата (Чен и Хашимото, 1978, Хилл, 1983);

– замедление роста микроорганизмов на протяжении лаг фазы (модель Моно, модифицированная Вергтером, 1983);

– влияние ингибирования процесса роста микроорганизмов компонентами субстрата (Холдан, 1930, Вебб, 1963, Яно, 1966, Гранд, 1968, Аиба, 1968, Хилл и Барт, 1977, Ханг и Левенспейл, 1988 и др.) и продуктами метаболизма (Иерусалимский, 1967, Холсберг, 1967, Аиба и соавт., 1968, Базау и Вилке, 1977, Мозер, 1981, Бергтер, 1983, Даглей и Хншелвуд, 1983, Хан и Левенспейл, 1988 и др.);

– зависимость удельной скорости роста микроорганизмов от выхода газа (Митсдорфер, 1991);

– влияние междувидовой конкуренции в биопленке [2, 9];

– влияние температуры процесса (Инграхам, 1963, Мозер, 1981, Вертер, 1983, Синклер и Кристайнзен, 1993), а так же pH среды (Анкелидани и соавт., 1993, Нобел и Льюис, 2002 и др.).

5. Деградация субстрата

В процессе микробиологической реакции компоненты субстрата различными группами микроорганизмов разлагаются до более простых веществ. В общем виде массовый баланс системы по i -му компоненту можно записать как [8]:

$$\left(\begin{array}{c} \text{Скорость} \\ \text{накопления} \\ \text{компонента} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Поток} \\ \text{компонента,} \\ \text{поступающего} \\ \text{в реактор} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{Поток} \\ \text{компонента,} \\ \text{выходящего} \\ \text{из реактора} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{Скорость} \\ \text{образования} \\ \text{компонента} \\ \text{вследствие} \\ \text{трансформации} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{Скорость} \\ \text{потребления} \\ \text{компонента} \\ \text{при трансформации} \end{array} \right) \quad (2)$$

Деградация загрязнений, которые содержатся в сточной воде, может быть выражена через скорость изменения концентрации субстрата. Скорость изменения концентрации субстрата исходя из уравнения массового баланса (2) может быть описана как [1–6, 8]:

$$\frac{dS}{dt} = D(S_0 - S) + \left(\frac{dS}{dt} \right)_R - \left(\frac{dS}{dt} \right)_r, \quad (3)$$

где S_0 , S – обобщенная концентрация субстрата на входе и выходе из аппарата, которая выражается в величине ХПК (химического потребления кислорода, необходимого для окисления загрязнений,

содержащихся в стоке), $\text{кг}_{\text{ХПК}}/\text{м}^3$; $\left(\frac{dS}{dt} \right)_R$ – скорость образования компонента в результате

жизнедеятельности биомассы. $\left(\frac{dS}{dt} \right)_r$ – скорость

потребления компонента субстрата. Данная величина прямо-пропорциональна скорости образования продукта реакции и зависит от концентрации биомассы [1].

В общем случае можно записать [1, 5, 6]:

$$\left(\frac{dS}{dt} \right)_r = \left(\frac{dS}{dt} \right)_X + \left(\frac{dS}{dt} \right)_E + \left(\frac{dS}{dt} \right)_P, \quad (4)$$

где $\left(\frac{dS}{dt} \right)_X$ – количество субстрата, который расходуется для формирования клеточной массы;

$\left(\frac{dS}{dt} \right)_E$ – количество субстрата, преобразованного в

энергию в результате разложения субстрата; $\left(\frac{dS}{dt} \right)_P$ –

количество субстрата, который перерабатывается в продукты метаболизма.

6. Образование продуктов микробиологической реакции

Отличительной чертой метанового брожения является то, что для весьма широкого ряда исходных питательных веществ, которые поддаются анаэробному сбраживанию, конечными продуктами метаболизма являются CH_4 (60–90 %), CO_2 (до 40 %), H_2S (1–2 %) и в незначительном количестве другие вещества (общее содержание которых менее 1 %). Данная смесь газов получила название «биогаз».

Однако, на каждой стадии процесса преобразования исходного загрязнения в биогаз образуются соответствующие продукты реакции, являющиеся субстратом для следующей стадии. Согласно [5], скорость образования продукта реакции может быть выражена через потребление субстрата для обеспечения энергетических нужд клеточной массы:

$$\frac{dP}{dt} = Y_S \left(\frac{dS}{dt} \right)_E, \quad (5)$$

Основная часть энергии (90–95 %) в результате анаэробного сбраживания переходит в метан [10], поэтому для описания процессов образования продуктов реакции можно ограничиться описанием выхода метана как основного компонента биогаза.

Рассмотренные выше процессы, а именно рост и развитие биомассы, деградация компонентов субстрата и образование продуктов биореакции, нераздельно взаимосвязаны между собою и их описание

представляет собой полную модель процессов преобразования органического загрязнения субстрата в биогаз. Следует отметить, что анаэробное сбраживание органического вещества является сложным микробиологическим процессом, происходящим в несколько этапов. На каждом этапе преобладает действие определенной группы микроорганизмов. Самый медленный из этапов сбраживания определяют как лимитирующую стадию процесса. Первые модели анаэробного сбраживания, описывающие только лимитирующую стадию, были просты и легки в использовании, однако неточно описывали процесс. К тому же, в разных условиях сбраживания различные этапы представляют собой лимитирующую стадию [7].

Для уточнения модели различные группы исследователей рассматривают от 2 до 5 стадий процесса метанового сбраживания органического вещества [4–8, 12–20].

Наиболее обобщенной и в то же время достаточно полно описывающей данный процесс, является трехступенчатая модель [11, 12]. Каждая стадия, а именно, гидролиз, кислотообразование и метаногенез, протекает под действием одной из трех физиологических групп микроорганизмов. Авторы R. Moletta и соавт. и G. Kiely и соавт. [5, 6] для описания процессов, происходящих при анаэробном сбраживании органического вещества, используют трехстадийную модель, однако, при математическом описании объединив в одну стадию гидролиза и кислотообразования, а как завершающую стадию приняв ацетатное метанообразование. Для упрощения математического описания авторы выразили исходное загрязнение сточной воды, поддающимся анаэробному сбраживанию, через эквивалентную концентрацию глюкозы ($C_6H_{12}O_6$), а продукты преобразования исходного загрязнения (ацетаты) через эквивалентную концентрацию уксусной кислоты, которая, в свою очередь разлагается до метана и углекислого газа. Для описания роста кислотогенной и метаногенной популяции использовалась модель ингибирования летучими жирными кислотами (ЛЖК). Кинетика микробиологических реакций в модели описана исходя из соображений энергетических затрат микробной популяции на рост, развитие, поддержание жизнедеятельности биомассы. Предложен стехиометрический подход с соответствующими значениями используемых кинетических параметров модели.

Siegrist и соавт [13] использует 5-ти ступенчатую модель, включающую в себя 7 подпроцессов. Авторы используют модель ингибирования процессов роста микробных популяций ацетатами и водородом, а так же низкими значениями рН и свободным аммиаком. Так же для процессов 3–8 учитывается влияние отмирания биомассы. В работе представлены все стехиометрические и кинетические параметры. Модель с откалиброванными

кинетическими параметрами была подтверждена результатами исследований со ступенчатой подачей субстрата в мезофильных и термофильных лабораторных реакторах, а так же данными полномасштабных мезофильных реакторов с залповыми нагрузками муниципального стока и промышленных отходов.

Авторы [14, 15] рассматривают пятистадийный периодический процесс анаэробной переработки глюкозы с различными примесями. Как основные факторы, влияющие на процесс, учитывались значение рН и концентрация H_2 , ингибирование метаногенеза бутиратами, пропионатами и этанолом, а так же скорость отмирания бактерий. Предложены стехиометрические коэффициенты, на основе которых построена математическая модель процесса.

Группой авторов [16, 17] (The IWA Anaerobic Digestion Modelling Task Group), в которую входили и некоторые авторы, модели которых рассматривались выше, была разработана обобщенная модель анаэробного сбраживания органического вещества. Структурированная модель включает в себя несколько стадий в описании биохимических, а также физико-химических процессов. Рассматриваются биохимические стадии: разделение гомогенных частиц на углеводы, белки и липиды; их внеклеточный гидролиз в сахара, аминокислоты и длинноцепочечные жирные кислоты (ДЛЖК) соответственно; ацидогенез из сахаров и аминокислот в летучие жирные кислоты и водород; ацетогенез из ДЛЖК и летучих жирных кислот в ацетат, а также отдельные этапы метаногенеза из ацетата и водорода/ CO_2 . Физико-химические уравнения описывают ионную ассоциацию и диссоциацию, а так же передачу газ-жидкость. Модель записана как в виде совокупности дифференциальных и алгебраических уравнений с 26 переменными концентраций в динамическом состоянии и 8 неявными алгебраическими переменными реактора, а так же в виде только дифференциальных уравнений с 32 переменными концентраций в динамическом состоянии. Более поздние модели как основу используют ADM1.

В табл. 2 представлены значения некоторых кинетических параметров и стехиометрических коэффициентов для рассмотренных выше моделей при сбраживании глюкозы.

Как видно из анализа существующих моделей процессов анаэробного брожения, не существует единой универсальной модели для описания процессов с различным составом стока, при различных условиях сбраживания и в биореакторах различной конструкции. Для каждого конкретного случая (характеристики загрязнения стока, условий протекания процесса, конструкции биореактора) необходимо определять стадии и подпроцессы, имеющие наибольшее влияние и из этих соображений строить модель.

Таблица 1

Выражения для скоростей подпроцессов метанового брожения

Подпроцесс	Выражение для скорости микробиологической реакции			
	R. Moletta и соавт.	Siegrist и соавт.	Каложный	ADM1
Дезинтеграция	–	–	–	$k_{dis} X_C$
Гидролиз частиц органического вещества и мертвой биомассы	–	$\rho_j = k_H X_S$	–	Углеводов $k_{hyd, ch} X_{ch}$
	–	–	–	Белков $k_{hyd, pr} X_{pr}$
	–	–	–	Липидов $k_{hyd, ch} X_{ch}$
Ферментация аминокислот	–	$\rho_3 = \mu_{max,3} \frac{S_{aa}}{K_{S,aa} + S_{aa}} I_{pH,3} X_{aa}$	–	$k_{m,aa} \frac{S_{aa}}{K_S + S_{aa}} X_{aa} I_1$
Ферментация сахаров	$\frac{dS}{dt} = D(S_0 - S) - \left(\frac{dS}{dt}\right)_X - \left(\frac{dS}{dt}\right)_E, \left(\frac{dS}{dt}\right)_X = \frac{\mu_a X_a}{Y_{Sa}}$ $\left(\frac{dS}{dt}\right)_E = K_{S,sa} X_a + K_{m,sa} X_a \frac{S}{K_{S,sa} + S}$	$\rho_4 = \mu_{max,4} \frac{S_{su}}{K_{S,su} + S_{su}} I_{pH,4} X_{su}$	$\frac{dS_1}{dt} = -\frac{\mu_1}{Y_1} X_1$	$k_{m,su} \frac{S_{su}}{K_S + S_{su}} X_{su} I_1$
Ферментация этанола	–	–	$\frac{dS_2}{dt} = 0,34 \cdot (1 - f_1 Y_1) \frac{\mu_1}{Y_1} X_1 - \frac{\mu_2}{Y_2} X_2$	–
Анаэробное окисление длинноцепочечных жирных кислот (ДЦЖК)	–	$\rho_5 = \mu_{max,5} \frac{S_{fa}}{K_{S,fa} + S_{fa}} \times I_{ac,5} I_{H_2,5} I_{pH,5} X_{fa} \frac{1}{2}$	–	$k_{m,fa} \frac{S_{fa}}{K_S + S_{fa}} X_{fa} I_2$
Анаэробное окисление промежуточных продуктов	Пропионаты	–	–	$k_{m,pro} \frac{S_{pro}}{K_S + S_{pro}} X_{pro} I_2$
	Валераты	–	–	$k_{m,c4} \frac{S_{w}}{K_S + S_{w}} X_{c4} \times$ $\times \frac{1}{1 + S_{bu}/S_w} I$
	Бутираты	–	$\frac{dS_3}{dt} = 0,39 \cdot (1 - f_1 Y_1) \frac{\mu_1}{Y_1} X_1 - \frac{\mu_3}{Y_3} X_3$	$k_{m,c4} \frac{S_{bu}}{K_S + S_{bu}} \times$ $\times X_{c4} \frac{1}{1 + S_{w}/S_{bu}} I$
Ферментация ацетатов	$\frac{dA}{dt} = D(A_0 - A) + \left(\frac{dA}{dt}\right)_P - \left(\frac{dA}{dt}\right)_X - \left(\frac{dA}{dt}\right)_E,$ $\left(\frac{dA}{dt}\right)_X = \frac{\mu_m X_m}{Y_{Sm}}, \left(\frac{dA}{dt}\right)_E = K_{S,sm} X_m + K_{m,2} X_m \frac{A}{K_{Sm} + A}$ $\left(\frac{dA}{dt}\right)_P = Y_{S2} \left(\frac{dS}{dt}\right)_E, \left(\frac{dA}{dt}\right)_m = \frac{1}{Y_{ma}} \left(\frac{dCH_4}{dt}\right)$	–	$\frac{dS_4}{dt} = 1,31 \cdot (1 - f_1 Y_1) \frac{\mu_1}{Y_1} X_1 +$ $+(1 - f_2 Y_2) \frac{\mu_2}{Y_2} X_2 +$ $+2 \cdot (1 - f_3 Y_3) \frac{\mu_3}{Y_3} X_3 - \frac{\mu_4}{Y_4} X_4$	$k_{m,ac} \frac{S_{ac}}{K_S + S_{ac}} X_{ac} I_3$
Ферментация H ₂	–	–	$\frac{dS_5}{dt} = 0,82 \cdot (1 - f_1 Y_1) \frac{\mu_1}{Y_1} X_1 +$ $+2 \cdot (1 - f_2 Y_2) \frac{\mu_2}{Y_2} X_2 +$ $+2 \cdot (1 - f_3 Y_3) \frac{\mu_3}{Y_3} X_3 - \frac{\mu_5}{Y_5} X_5$	–
Производство CO ₂	–	–	$\frac{dS_6}{dt} = 0,82 \cdot (1 - f_1 Y_1) \frac{\mu_1}{Y_1} X_1 +$ $+(1 - f_4 Y_4) \frac{\mu_4}{Y_4} X_4 -$ $-0,25 \cdot (1 - f_5 Y_5) \frac{\mu_5}{Y_5} X_5 - 0,5 f_5 \mu_5 X_5$	–
Производство метана				
из ацетатов	$\frac{dCH_4}{dt} = V_{m,max} X_m \times \frac{AH}{AH + K_m} \cdot \frac{K_m}{K_m + AH}$	$\rho_7 = \mu_{max,7} \frac{S_{ac}}{K_{S,ac} + S_{ac}} I_{pH,7} I_{NH_3,7} X_{ac}$	$\frac{dS_7}{dt} = (1 - f_4 Y_4) \frac{\mu_4}{Y_4} X_4 +$	–
из водорода	–	$\rho_8 = \mu_{max,8} \frac{S_{H_2}}{K_{S,H_2} + S_{H_2}} I_{H_2,8} I_{pH,8} X_{H_2}$	$-0,25 \cdot (1 - f_5 Y_5) \frac{\mu_5}{Y_5} X_5$	$k_{m,H_2} \frac{S_{H_2}}{K_S + S_{H_2}} X_{H_2} I_1$
	<i>S</i> – концентрация глюкозы, <i>A</i> – концентрация ацетата (уксусной кислоты), <i>CH₄</i> – концентрация метана. Индексы: <i>a</i> – для кислотообразования, <i>m</i> – для метанообразования.	<i>ρ_j</i> – скорость соответствующего подпроцесса, <i>I_{i,j}</i> – функция ингибирования. Индексы: <i>H</i> – гидролиз; <i>aa</i> – аминокислота; <i>su</i> – сахар; <i>fa</i> – жирные кислоты; <i>ac</i> – ацетат; <i>pro</i> – пропионат.	<i>f₁ – f₅</i> – факторы преобразования для субстрата,	–

Таблица 2

Кинетические параметры процесса анаэробного сбраживания глюкозы при 35°C

Название	Условное обозначение	Единица измерения	Значение	Источник
Максимальная скорость роста кислотообразующих бактерий	μ_{max1}	сут ⁻¹	1,5 4,0 0,202 0,1 1-3 0,4	[5] [13] [18] [19] [10] [20]
Максимальная скорость роста метаногенных бактерий	μ_{max2}	сут ⁻¹	0,138 0,37 0,5976 0,00058 0,3-0,5 0,4	[5] [13] [18] [19] [10] [20]
Скорость отмирания кислотообразующих бактерий	k_{d1}	сут ⁻¹	0,8 0,000667 0,002 0,025	[13] [18] [19] [20]
Скорость отмирания метаногенных бактерий	k_{d2}	сут ⁻¹	0,05 0,00389 0,0042 0,04	[13] [18] [19] [20]
Максимальный прирост биомассы кислотообразующих бактерий, потребляющих глюкозу	Y_{x1}	г·г ⁻¹	0,82 0,000575 0,2039 0,2-0,3 0,2	[5] [18] [19] [10] [20]
Максимальный прирост биомассы для метаногенных бактерий, потребляющих уксусную кислоту	Y_{x2}	г·г ⁻¹	0,82 0,08 0,71 0,1588 0,04-0,05 0,06	[5] [6] [18] [19] [10] [20]
Константа насыщения производства метана (выраженная как ионизированная уксусная кислота)	K_m	гл ⁻¹	0,0208	[5]
Постоянная полунасыщения для кислотообразующих бактерий	K_{S1}	гл ⁻¹	0,0089 0,5 0,5	[18] [19] [20]
Постоянная полунасыщения для метанообразующих бактерий	K_{S2}	гл ⁻¹	0,594 0,36 0,025	[18] [19] [20]
Константа ингибирования процесса производства метана уксусной кислотой	K_{im}	гл ⁻¹	0,059 0,2-0,8	[5] [10]
Постоянная насыщения в выражении потребления глюкозы для преобразования в энергию, необходимую для поддержания жизнедеятельности кислотообразующих микроорганизмов	K_{mx1}	гл ⁻¹	0,26	[5]
Постоянная насыщения в выражении потребления уксусной кислоты для преобразования в энергию, необходимую для поддержания жизнедеятельности метаногенных микроорганизмов	K_{mx2}	гл ⁻¹	0,93	[5]
Постоянная насыщения в выражении роста кислотообразующих бактерий	K_{Sx1}	гл ⁻¹	0,26 0,3-0,15	[5] [10]
Постоянная насыщения в выражении роста метаногенных бактерий	K_{Sx2}	гл ⁻¹	0,003 0,03-0,1	[5] [10]
Максимальная скорость преобразования глюкозы в кислоту	Y_{s1}	г/г	0,83	[5]
Максимальная скорость преобразования уксусной кислоты в метан	Y_{s2}	г/г	0,26	[5]
Максимальная скорость производства метана 1г метаногенных бактерий в сутки	V_{mmax}	г/(г·сут)	0,5	[5]

7. Выводы

1. Для описания кинетики процесса анаэробной очистки воды с выделением биогаза рассматривают три взаимосвязанных процесса:

- рост и развитие микробной популяции;
- деградация субстрата (загрязнений, которые содержатся в сточной воде);
- образование продуктов микробиологической реакции (в частности, биогаза).

2. Для теоретического описания этих процессов в литературе предлагается достаточно широкий спектр математических зависимостей. Описание роста и развития биомассы, деградации компонентов субстрата, образования продуктов биологической реакции представляет собой полную модель процессов деградации органических загрязнений сточной воды.

3. В литературе предлагаются кроме математического описания лимитирующей стадии процесса модели, учитывающие от 2 до 5 подпро-цессов сбраживания органического вещества.

4. Предложенные модели, описывающие кинетику метанового сбраживания, а так же кинетические параметры, могут использоваться для математического моделирования процессов массопереноса в анаэробных биореакторах.

Литература

1. Gerber, M. An Analysis of Available Mathematical Model for Anaerobic Digestion of Organic Substances for Production of Biogas [Text] / M. Gerber, R. Span // International Gas Union Research conference, Paris. – 2008. – Vol. 1. – P. 1294–1324.

2. Lardon, L. Modélisation des biofilms de digestion anaérobie par système multi-agents: Mémoire de DAA [Text] / L. Lardon. – Montpellier, 2001. – 79 p.

3. Hu, W. C. Kinetic study of anaerobic digestion of sulfate-rich wastewaters from manufacturing food industries [Text] / W.C. Hu, K. Thayanithy, C. F. Forster // 7th International Conference on Environmental Science and Technology. Ermoupolis, Syros island, Greece. – 2001. – P. 342–349.

4. Havlik, I. Mathematical modeling of the anaerobic digestion process: application of dynamic mass-energy balance [Text] / I. Havlik, J. Votruba, M. Sobotka // Folia Microbiol. – 1986. – Vol. 31, Issue 1. – P. 56–68. doi: 10.1007/bf02928680

5. Moletta, R. Dynamic modeling of anaerobic digestion [Text] / R. Moletta, D. Verrier, G. Albagnac // Water Research. – 1986. – Vol. 20, Issue 4. – P. 427–434.

6. Kiely, G. Physical and mathematical modelling of anaerobic digestion of organic wastes [Text] / G. Kiely, G. Tayfur, C. Dolan, K. Tanjif // Water Research. Great Britain: Pergamon Press Ltd. – 1997. – Vol. 31, Issue 3. – P. 534–540. doi: 10.1016/s0043-1354(96)00175-3

7. Lyberatos, G. Modelling of anaerobic Digestion – a review [Text] / G. Lyberatos, I. V. Skiadas // Global Nest: the Int. J. – 1997. – Vol. 1, Issue 2. – P. 63–76.

8. Mathematical Modeling of Biofilms [Text] / IWA Task Group on Biofilm Modeling. – IWA Publishing, 2006. – 208 p.

9. Guyot, J.-P. Etude de quelques interactions microbiennes lors de la digestion anaérobie de la matière organique par des cultures mixtes définies ou naturelles [Text] / J.-P. Guyot. – Aix-Marseille, 1990. – 123 p.

10. Хенце, М. Очистка сточных вод [Текст] / М. Хенце, П. Армоэс, Й. Ля-Кур-Ясен, Э. Арван. –

М.: Мир, 2009. – 480 с.

11. Семененко, И. В. Проектирование биогазовых установок [Текст] / И. В. Семененко. – Сумы: ПФ «МакДен», ИПП «Мрия-1» ЛТД, 1996. – 347 с.

12. Калюжный, С. В. Высокоинтенсивные анаэробные технологии очистки промышленных сточных вод [Текст] / С. В. Калюжный // Катализ в промышленности. – 2004. – № 6. – С. 42–50.

13. Siegrist, H. Mathematical Model for Meso- and Thermophilic Anaerobic Sewage Sludge Digestion Environ [Text] / H. Siegrist, D. Vogt, J. L. Garcia-Heras, W. Gujer // Sci. Technol. – 2002. – Vol. 36, Issue 5. – P. 1113–1123. doi: 10.1021/es010139p

14. Kalyuzhnyi, S. V. Batch anaerobic digestion of glucose and its mathematical modeling. I. Kinetic investigations [Text] / S. V. Kalyuzhnyi, M. A. Davlyatshina // Biore. Technol. – 1997. – Vol. 59, Issue 1. – P. 73–80. doi: 10.1016/s0960-8524(96)00124-1

15. Kalyuzhnyi, S. V. Batch anaerobic digestion of glucose and its mathematical modeling. II. Description, verification and application of model [Text] / S. V. Kalyuzhnyi // Biore. Technol. – 1997. – Vol. 59, Issue 2-3. – P. 249–258. doi: 10.1016/s0960-8524(96)00125-3

16. Batstone, D. J. Anaerobic Digestion Model No.1 (ADM1). Scientific & Technical Report No.13 [Text] / D. J. Batstone, J. Keller, I. Angelidaki, S. V. Kalyuzhnyi, S. G. Pavlostathis, A. Rozzi, W. T. M. Sanders, H. Siegrist, V. A. Vavilin. – IWA Publishing, 2002. – 80 p.

17. Batstone, D. The IWA Anaerobic digestion Model No 1 [Text] / D. Batstone, J. Keller, I. Angelidaki, S. Kalyuzhnyi, S. Pavlostathis, A. Rozzi, W. Sanders, H. Siegrist, V. Vavilin // Wat. Sci. Technol. – 2002. – Vol. 45, Issue 10. – P. 65–73.

18. Simeonov, I. Modelling and Dynamic Compensator Control of the Anaerobic Digestion of Organic Wastes [Text] / I. Simeonov, S. Stoyanov // Chem. Biochem. Eng. Q. – 2003. – Vol. 17, Issue 4. – P. 285–292.

19. Pullammanappallil, N. A. Kinetics and dynamic modelling of batch anaerobic digestion of municipal solid waste in a stirred reactor [Text] / N. A. Pullammanappallil, C. Pratap, W. P. Clarke // Waste Management. – 2007. – Vol. 27, Issue 5. – P. 595–603. doi: 10.1016/j.wasman.2006.04.010

20. Hill, D. T. A Dynamic Model for Simulation of Animal Waste Digestion [Text] / D. T. Hill, C. L. Barth. // Journal of Water Pollution Control Federation. – 1977. – Vol. 49, Issue 10. – P. 2129–2143.

References

1. Gerber, M., Span, R. (2008). An Analysis of Available Mathematical Model for Anaerobic Digestion of Organic Substances for Production of Biogas. International Gas Union Research conference, Paris, 1, 1294–1324.

2. Laurent, L. (2001). Modélisation des biofilms de digestion anaérobie par système multi-agents: Mémoire de DAA, 79.

3. Hu, W. C., Thayanithy, K., Forster, C. F. (2001). Kinetic study of anaerobic digestion of sulfate-rich wastewaters from manufacturing food industries. 7th International Conference on Environmental Science and Technology. Ermoupolis, Syros island (Greece), 342–349

4. Havlik, I., Votruba, J., Sobotka, M. (1986). Mathematical modeling of the anaerobic digestion process: application of dynamic mass-energy balance. Folia Microbiol, 31 (1), 56–68. doi: 10.1007/bf02928680

5. Moletta, R., Verrier, D., Albagnac, G. (1986). Dynamic modeling of anaerobic digestion. Water Research, 20 (4), 427–434.

6. Kiely, G., Tayfur, G., Dolan, C., Tanjif, K. (1997).

Physical and mathematical modelling of anaerobic digestion of organic wastes. Water Research. Great Britain: Pergamon Press Ltd, 31 (3), 534–540. doi: 10.1016/s0043-1354(96)00175-3

7. Lyberatos, G., Skiadas, I. V. (1997). Modelling of anaerobic Digestion - a review. Global Nest: the Int. J., 1 (2), 63–76.

8. IWA Task Group on Biofilm Modeling (2006). Mathematical Modeling of . IWA Publishing, 208.

9. Guyot, J.-P. Etude de quelques interactions microbiennes lors de la digestion anaerobie de la matiere organique par des cultures mixtes definies ou naturelles. Aix-Marceille (France), 123.

10. Hence, M. P., Armoes, Y., Lya-Kur-Yasen, E. A. (2009). Ochistka stochnyih vod. Moscow, Russia: Mir, 480.

11. Semenenko, I. V. (1996). Proektirovanie biogazovyih ustanovok. Sumyi (Ukraine): PF «MakDen», IPP «Mriya-1» LTD, 347.

12. Kalyuzhnyi, S. V. (2004). Vysokointensivnyie anaerobnyie tehnologii ochistki promyishlennyih stochnyih vod. Kataliz v promyishlennosti, 6, 42–50.

13. Hansruedi, S., Dea, V., Jaime, L. Garcia-Heras, Willi, G. (2002). Mathematical Model for Meso- and Thermophilic Anaerobic Sewage Sludge Digestion Environ. Sci. Technol, 36 (5), 1113–1123. doi: 10.1021/es010139p

14. Kalyuzhnyi, S. V., Davlyatshina, M. A. (1997). Batch anaerobic digestion of glucose and its mathematical

modeling. I. Kinetic investigations. Biore. Technol., 59 (1), 73–80. doi: 10.1016/s0960-8524(96)00124-1

15. Kalyuzhnyi, S. V. (1997). Batch anaerobic digestion of glucose and its mathematical modeling. II. Description, verification and application of model. Biore. Technol., 59 (2-3), 249–258. doi: 10.1016/s0960-8524(96)00125-3

16. Batstone, D. J., Keller, J., Angelidaki, I., Kalyuzhnyi, S. V., Pavlostathis, S. G., Rozzi, A., Sanders, W. T. M., Siegrist, H., Vavilin, V. A. (2002). Anaerobic Digestion Model No.1 (ADM1). Scientific & Technical Report. IWA Publishing, 80.

17. Batstone, D., Keller, J., Angelidaki, I., Kalyuzhnyi, S., Pavlostathis, S., Rozzi, A., Sanders, W., Siegrist, H., Vavilin, V. (2002). The IWA Anaerobic digestion Model No 1. Wat. Sci. Technol., 45 (10), 65–73.

18. Simeonov, I., Stoyanov, S. (2003). Modelling and Dynamic Compensator Control of the Anaerobic Digestion of Organic Wastes. Chem. Biochem. Eng. Q.17 (4), 285–292.

19. Pullammanappallil, N. A., Pratap, C., Clarke, W. P. (2007). Kinetics and dynamic modelling of batch anaerobic digestion of municipal solid waste in a stirred reactor. Waste Management, 27 (5), 595–603. doi: 10.1016/j.wasman.2006.04.010

20. Hill, D. T., Barth, C. L. (1977). A Dynamic Model for Simulation of Animal Waste Digestion. Journal of Water Pollution Control Federation, 49 (10), 2129–2143.

Рекомендовано до публікації д-р техн. наук Мельник В. М.

Дата надходження рукопису 29.08.2014

Ружинская Людмила Ивановна, кандидат технических наук, доцент, кафедра биотехники и инженерии, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Пр. Победы, 37, г. Киев, Украина, 03056

E-mail: ruzhli@ukr.net

Фоменкова Анастасия Алексеевна, аспирант, кафедра биотехники и инженерии, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Пр. Победы, 37, г. Киев, Украина, 03056

E-mail: hyrondelle@list.ru

УДК 65.012.12

DOI: 10.15587/2313-8416.2014.28952

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОПУЛЯРНОСТИ ТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЕКТАМИ В БАНКАХ СРЕДИ ИНТЕРНЕТ-АУДИТОРИИ (НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ИНТЕРНЕТ-ЗАПРОСОВ)

©А. А. Климчук, И. А. Лагода

В статье был определен уровень заинтересованности темой банковского проектного менеджмента среди украинской интернет-аудитории за 2004-2014 гг. Полученные результаты мы сравнили с показателями стран Западной Европы и США. Был очерчен портрет интернет-пользователя, интересующегося данной темой, в частности его географическое расположение. В результате исследования был получен ответ на вопрос: популярна ли тема банковского проектного менеджмента среди интернет-аудитории Украины.

Ключевые слова: управление проектами в банках, проект, Google Trends, web-аналитика, поисковый запрос.

The level of interest in the subject of banking project management of Ukrainian Internet users for the 2004-2014 years is determined in the article. We compared received results with results of European countries and United States. We have outlined a portrait of the Internet user, who is interested in this topic, in particular, his geographical location. As a result of the study we answer the question: does the theme of banking project management is popular among Internet users in Ukraine.

Keywords: project management in banks, project, Google Trends, web-analytics, search request.

1. Введение

Управление проектами в Украине с каждым годом активно развивается во всех отраслях. Однако, мы заинтересованы в изучении банковского

проектного менеджмента. Для нашего исследования необходимо проанализировать уровень популярности темы управления проектами в банках среди украинских интернет-пользователей для понимания