

Ж. К. БАХОВ¹, К. У. КОРАЗБЕКОВА¹, А. ЛЕММЕР²

¹Южно-Казахстанский государственный университет им. М. Ауезова, Шымкент,
Республика Казахстан,

²Университет Хоэнхайм, Германия)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВА МЕТАНА ИЗ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ОТХОДОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КИНЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГОМПЕРЦА

Аннотация. Исследована кинетика производства метана из сельскохозяйственных отходов (навозная жижа КРС и свиней, птичий помет) в лабораторных реакторах периодического действия в мезофильном режиме (при температуре $37 \pm 0,2^\circ\text{C}$). Изучены кинетические константы производства метана – потенциальный выход метана (P), максимальная скорость производства метана (R_m) и минимальное время для производства метана (λ) и смоделировано производство метана с учетом этих кинетических параметров по Гомперцу. Анализирована продолжительность анаэробного брожения, необходимая для получения 95% потенциального выхода метана в качестве технического времени сбраживания и эффективный период производства метана при анаэробном брожении сельскохозяйственных отходов. По результатам исследований получены следующие качественные показатели для навозной жижи КРС и свиней и птичьего помета: потенциальный выход метана – 0,381, 0,420 и 0,383 $\text{Нм}^3/\text{кг оСВ}^{-1}$, максимальная скорость производства метана – 0,022, 0,013 и 0,036 $\text{Нм}^3/\text{кг оСВ}^{-1}$ в день⁻¹, длительность лаг-фазы – 10,17, 12,20 и 1,67 дней, соответственно.

Ключевые слова: сельскохозяйственные отходы, анаэробное брожение, биогаз, производство метана, кинетические параметры.

Тірек сөздер: ауылшаруашылық қалдықтары, анаэробты ашу, биогаз, метан алу, кинетикалық пара-метрлер.

Keywords: agricultural waste, anaerobic fermentation, biogas, methane production, kinetic parameters.

Анаэробное сбраживание является эффективным процессом для деструкции органических веществ биомассы с участием четырех групп микроорганизмов: гидролизных, кислотообразующих, ацетогенных и метанобразующих бактерий в анаэробных условиях [1]. В течение взаимосвязанных, последовательно и параллельно протекающих биологических реакций, продукты одной группы микроорганизмов служат, как субстраты для следующих микроорганизмов, и приводят к трансформации органических веществ, в основном, в смесь метана и двуокиси углерода [2].

Технология анаэробного брожения широко применяется для переработки сельскохозяйственных отходов, в том числе и отходов крупного рогатого скота. Переработка навоза с получением биогаза, удобрений и других попутных продуктов

решает проблемы защиты окружающей среды, повышения плодородия земель, получения экологически чистого вида энергии [3].

По данной проблеме проведены многочисленные исследования [3-11], особенно по вопросу определения потенциала выхода метана из различных сельскохозяйственных отходов, по оценке и оптимизации условий производства биогаза. Разработаны многочисленные модели, учитывающие биологические и физико-химические основы анаэробного брожения, а также кинетику роста мета-нообразующих микроорганизмов.

При оценке общей скорости производства биогаза в анаэробных реакторах лимитирующей стадией выступает метаногенная стадия, несмотря на то, что метанобразующие бактерии имеют более низкую скорость роста, чем кислотообразующие бактерии. Кинетические параметры производства метана облегчают понимание процесса метаногенеза и оптимизацию работы биогазовых установок.

Материалы и методы исследования

Исходное сырье. Исследования проводились с использованием таких сельскохозяйственных отходов, как навозная жижа КРС, навозная жижа свиней и птичий помет. Перед использованием образцы птичьего помета были высушены при 58°C и измельчены таким образом, чтобы они могли проходить через сито с размером ячеек 1 мм. Для брожения птичьего помета использована сброженная навозная жижа, взятая из работающего в непрерывном режиме реактора (объем 400 л) в биогазовой лаборатории Университета Хоэнхайм (Германия).

Образцы всех свежих материалов (СМ) проанализированы на содержание сухого вещества (СВ) или твердых веществ (ТВ), органического сухого вещества (оСВ), летучих твердых веществ (ЛТВ) и золы по методикам АРНА-Стандарт [12].

«Хоэнхайм» – система тестирования выхода биогаза. «Хоэнхайм» – система тестирования выхода биогаза состоит из ферментеров в виде стеклянных шприцев (колбы для пробоотбора), объемом 100 мл с 1/1 градации и капиллярным удлинителем (рисунок 1), ферментационной камеры (инкубатор) (рисунок 2) и газового датчика [13].

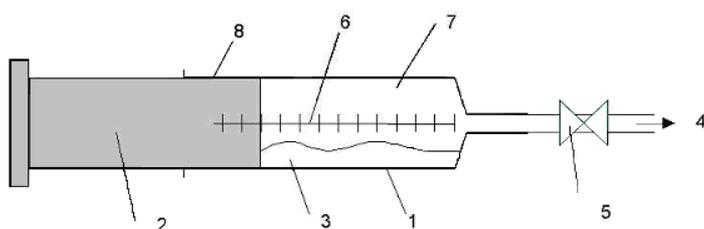


Рисунок 1 – Лабораторный мини-реактор «Хоэнхайм» системы тестирования выхода биогаза (Helffrich &

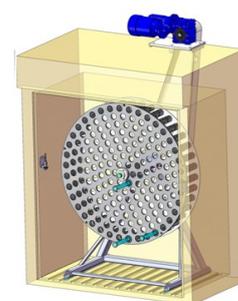


Рисунок 2 – Схематическое изображение инкубатора

Oechsner, 2003 [13]):

1 – стеклянный шприц; 2 – пробка; 3 – субстрат; 4 – отверстие

для газоанализа; 5 – зажим для трубки; 6- градуировка;
7 – газовое пространство; 8 – смазка

«Хоэнхайм» системы
тестирования выхода биогаза
(Ohl, 2011, Dissertation [14])

Исследования проводились при температуре 37⁰С. Все тестируемые образцы были подготовлены в трех повторениях по плану подготовки образцов на тестирование выхода биогаза. Содержание метана измерялось с помощью преобразователя газа модели AGM 10 (датчики Europe GmbH, Германия) с недисперсионным инфракрасным (NDIR) датчиком, способным обнаружить содержание метана в биогазе в диапазоне от 0 до 100%. Датчик газа был калиброван со стандартным газом, содержащим 60,7% (v) метана. Температура инкубатора, давление воздуха, дата и время, при которых проведены, были зафиксированы для анализа биогаза. Содержание биогаза в стандартных условиях (273K и 101325 Па) определяли в соответствии с Ludington D [15].

Моделирование. Исследования кинетики производства метана для описания и оценки процесса метаногенеза проводились путем внесения экспериментальных данных производства метана в уравнение Гомперца [9-11], которое описывает совокупное производство метана в реакторах периодического действия, предполагающее, что производство метана – это функция роста бактерий. Модифицированное уравнение Гомперца (уравнение 1) представлено ниже:

$$M = P t \exp\left(\frac{M}{N} - \exp\left(\frac{R_m t}{P} (\lambda - t) + 1\right)\right) \frac{M}{N} \quad (1)$$

где M – кумулятивное производство метана (Нм³/кг оСВ⁻¹) в t времени, P – потенциальный выход метана (Нм³/кг оСВ⁻¹), R_m – максимальная скорость выхода метана (Нм³/кг оСВ⁻¹ в день⁻¹), λ – продолжительность лаг-фазы (день), t – время, при котором рассчитывается кумулятивный выход метана M (день).

Полученные результаты обработаны в *MS-Excel* с помощью функции "*Solver*". Параметры P , λ и R_m подсчитывались для каждого набора данных. Кроме того, определены значения параметров, минимизирующих сумму квадратов отклонения между необходимыми и экспериментальными данными.

Результаты и обсуждение

Характеристика исследуемых субстратов. Результаты измерения сухого вещества, органического сухого вещества, золы и влажности протестированных субстратов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты анализа субстратов

Образцы субстратов	Параметры (%)			
	СВ (в СМ)	оСВ (в СВ)	Зола (в СМ)	Влажность субстрата
Навозная жижа КРС	3,75 ± 0,09	72,14 ± 0,48	1,04 ± 0,008	96,25
Навозная жижа свиней	2,11 ± 0,03	66,15 ± 0,85	0,72 ± 0,02	97,89
Птичий помет	97,89 ± 0,11	64,63 ± 1,95	34,62 ± 1,95	2,11
Сброженная навозная жижа	5,02 ± 1,19	64,54 ± 6,84	1,73 ± 0,031	94,98

Птичий помет использовался в сухом виде. Среднее содержание СВ по 3 образцам субстратов было в пределах 97,89±0,11, влажность – 2,11%. В навозной жиже КРС содержится 3,75±0,09 СВ, меньше 3% в навозной жиже свиней (2,11±0,03). В птичьем помете, по результатам анализов, содержится меньшее количество оСВ, но большое количество в процентах минеральных веществ (золы) по сравнению с другими видами субстратов (64,63±1,95% оСВ, 34,62±1,95% минеральное содержание). В навозной жиже КРС и свиней содержание минеральных веществ (золы) меньше 5%.

При анаэробном брожении навозной жижи КРС и свиней использовано примерно 40 мл субстрата, а в брожении птичьего помета 30 мл субстрата с добавлением 450 г сброженной навозной жижи КРС для создания влажной среды (93,16%). Во всех пробах влажность была в среднем 96%, что хорошо подходит для метаногенеза, поскольку метановые бактерии могут жить и размножаться только во влажной среде (свыше 50%) и в отличие от аэробных бактерий, дрожжей и грибов, не могут существовать в твердой фазе.

Исследование условий производства метана по кинетическим параметрам Гомперца. Согласно уравнению Гомперца при производстве метана основными кинетическими константами являются: P -потенциальный выход метана, R_m -максимальная скорость производства метана и λ -длительность лаг-фазы приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты кинетического анализа производства метана (усредненные данные)

Пробы	Кумулятивный выход метана, Нм ³ /кг оСВ	Параметры Гомперца (модель)			Продолжительность для получения 95% потенциального выхода метана, дни
		P , Нм ³ /кг оСВ ⁻¹	R_m , Нм ³ /кг оСВ ⁻¹ в день ⁻¹	λ , дни	
1	0,330 ± 0,038	0,381±0,045	0,022±0,003	10,17±0,34	34,71±1,55
2	0,275 ± 0,049	0,420±0,069	0,013±0,002	12,20±1,71	60,41±2,01
3	0,383 ± 0,009	0,383±0,010	0,036±0,001	1,67±1,01	17,03±0,10

Внеся данные кумулятивного производства метана и моделируя модифицированное уравнение Гомперца, получили графики, показанные на рисунке 3.

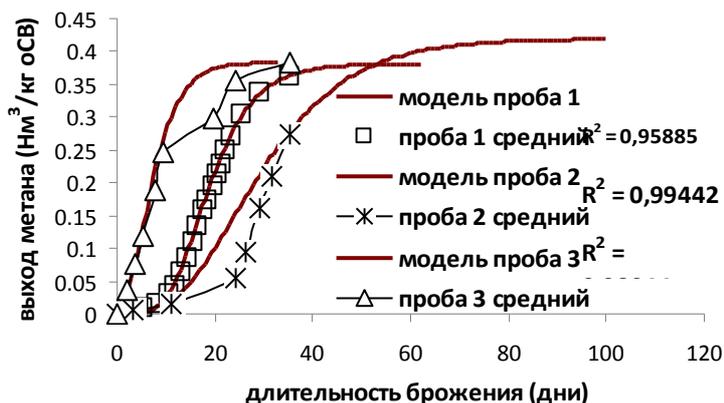


Рисунок 3 – Сравнение экспериментальных и расчетных данных, используя кинетической модели уравнения Гомперца

Так как время сбраживания считается ключевыми показателями биоразлагаемости субстрата и скорость переработки отходов [16], дополнительно оценивали общую продолжительность анаэробного брожения. При этом в качестве технического времени сбраживания использовали время, необходимое для получения 95%-го потенциального выхода метана. Известно, что после асимптотического приближения кривой кумулятивного производства метана к выходу метана, реактор будет принимать бесконечное время, чтобы произвести 100% потенциала метана. Таким образом, значение 95% было произвольно выбрано, как и в работах Корраг & Pullamannappallil [10]. Техническое время сбраживания также используется как основание для разработки времени гидролитического удержания (ВГУ) и времени удерживания твердых веществ для анаэробного сбраживания. Время сбраживания может быть сокращено в соответствии с эффективным периодом производства метана. Если из времени достижения 95%-го потенциала выхода метана вычесть время задержки (λ), то получим эффективную длительность производства метана [16].

Навозная жижа КРС, навозная жижа свиней и птичий помет были подвергнуты анаэробному сбраживанию (пробы 1-3, таблица 2). Средний потенциальный выход метана (P) по первой пробе – $0,381 \text{ Нм}^3/\text{кг оСВ}^{-1}$ со стандартным отклонением $0,069$ и со стандартной ошибкой $0,040$. Зафиксирована длительность лаг-фазы (λ) в диапазоне $10,17 \pm 0,34$ дней (стандартная ошибка $0,19$ дней). Средняя максимальная скорость выхода метана (R_m) по пробе 1 равна $0,022 \text{ Нм}^3/\text{кг оСВ}^{-1}$ в день⁻¹ (стандартное отклонение = $0,003$, стандартная ошибка = $0,001$).

По результатам расчетов параметров кинетики производства метана, проба 2 показала следующие константы: средний заключительный выход метана был в диапазоне $0,420 \pm 0,069$ со стандартной ошибкой $0,040$. Длительность лаг-фазы (λ) составила в среднем $12,2 \pm 1,71$ дней (стандартная ошибка = $0,987$). Средняя максимальная скорость производства метана R_m равна $0,013 \text{ Нм}^3/\text{кг оСВ}^{-1}$ в день⁻¹.

Проба 3 из птичьего помета дала следующие значения параметров кинетики производства метана: потенциальный выход метана (P) в среднем составил $0,383 \text{ Нм}^3/\text{кг оСВ}^{-1}$ со стандартным отклонением $0,010 \text{ Нм}^3/\text{кг оСВ}^{-1}$ и ошибкой $0,006 \text{ Нм}^3/\text{кг оСВ}^{-1}$. Время для минимального производства метана (λ) было в пределах $1,67 \pm 0,01$ дней. Зафиксирована средняя максимальная скорость производства метана в количестве $0,036 \pm 0,001 \text{ Нм}^3/\text{кг оСВ}^{-1}$ в день⁻¹.

Если сравнить кинетические константы уравнения Гомперца для анаэробного брожения трех типов сельскохозяйственных отходов – навозной жижи КРС, навозной жижи свиней и птичьего помета (по таблице 2 и рисунку 3), то можно увидеть различия в процессе метаногенеза. Анаэробное брожение навозной жижи КРС требует для адаптации микроорганизмов в среду $10,17 \pm 0,34$ дней, а навозная жижа свиней $12,20 \pm 1,71$ дней. Кроме того, при максимальной скорости выхода метана (R_m) в пробах с навозной жижей КРС ($0,022 \text{ Нм}^3/\text{кг оСВ}^{-1}$ в день⁻¹) производство метана происходит почти в два раза быстрее, чем в экспериментах с жижей свиней ($\text{Нм}^3/\text{кг оСВ}^{-1}$ в день⁻¹).

В экспериментах с птичьим пометом минимальное время для производства метана (λ) $1,67 \pm 0,01$ дней, которое короче в 6 раз, чем при работах с навозной жижей КРС и в 7 раз, чем в пробе с навозной жижей свиней. Вдобавок, специфическая активность метаногенов высокая, так как максимальная скорость образования метана (R_m) равна $0,036 \text{ Нм}^3/\text{кг оСВ}^{-1}$ в день⁻¹, т.е. метано-генерация протекает быстрее, чем в пробах 1 и 2. Максимальная скорость образования метана (R_m) для птичьего помета в 1,7 раза выше, чем в пробе 1, и в 3 раза выше, чем в пробе с жижей КРС (таблица 2).

Несмотря на низкую скорость выхода метана и длительность лаг-фазы, потенциальный выход метана (P) из навозной жижи свиней выше, чем в экспериментах с навозной жижей КРС и птичьим пометом. Потенциальный выход метана (P) равен $0,381$; $0,420$ и $0,383 \text{ Нм}^3/\text{кг оСВ}^{-1}$, соответственно, для проб 1, 2 и 3. То есть, кумулятивный выход метана соответствует $86,6\%$, $65,5\%$ и 100% потенциального выхода метана (P), соответственно в пробах 1, 2 и 3.

В экспериментах с навозной жижей КРС потребовалось $34,71 \pm 1,55$ дней, чтобы достичь 95%-го потенциального выхода метана. Продолжительность была ниже в пределах $17,03 \pm 0,10$ дней в пробе 3. Но для полного преобразования органического субстрата в метан в пробе 2 необходимо $60,41 \pm 2,01$ дней. После вычитания эффективный период производства метана из навозной жижи КРС, навозной жижи свиней и птичьего помета был равен $27,54$, $48,21$ и $15,36$ дням.

Кинетические модели уравнения Гомперца для пробы из навозной жижи КРС совпадают с экспериментальным графиком кумулятивного выхода метана. Величина достоверности аппроксимации равна в среднем $R^2=0,9588$, со стандартной ошибкой $0,02948$, то есть достоверность между значениями функции регрессии и фактическим значением равна 96% (рисунок 3).

Модель кумулятивного выхода метана из навозной жижи свиней, основанная на уравнении Гомперца, с достоверностью аппроксимации $R^2 = 0,9944$ показывает торможение метаногенеза после 10-го дня и интенсивный выход метана после 25-го дня процесса (рисунок 3).

Сравнивая экспериментальные и расчетные данные пробы 3, можно обнаружить нестабильность в производстве метана между 10-25 днями. Модель выхода метана из птичьего помета показала достоверность аппроксимации $R^2 = 0,98044$, стандартную ошибку $0,01807$ (рисунок 3). В отличие от навозной жижи КРС, в свином жидком навозе содержится около 50% органики, в жидком курином помете более 65% разлагаются при анаэробном сбраживании [17]. Но чем больше биоразлагаемость органического вещества, тем выше содержание аммиака в навозе по сравнению с необработанными материалами. Количество аммиака в жидком курином помете составляет около 85% от общего объема исходного содержания азота.

Сравнительный анализ результатов анаэробного брожения жидкого навоза КРС и свиней (пробы 1 и 2) показал, что процесс метаногенеза в пробе 1 происходит быстрее и интенсивное образование метана начинается с 12-го дня, а в пробе 2 с 20-го дня. Это объясняется тем, что КРС, благодаря особой флоре желудка, содержащей среди прочих и

метановые бактерии, а также длинному кишечному тракту и сильному измельчению легко перевариваемых веществ, потребляет существенное количество сырой клетчатки. При этом углеводов содержится больше, чем других полимеров. Поэтому процесс брожения навоза КРС протекает быстрее, хотя процентное содержание метана остается низким, чем из навоза свиней [17]. Это связано с тем, что для свиней характерно плохое переваривание корма из-за короткого кишечника и однокамерного желудка. Поэтому навоз свиней содержит большое количество неразложившихся питательных веществ (жира, протеинов и др.), которых изначально больше из-за специфики их кормового рациона.

Заключение. При анаэробном брожении сельскохозяйственных отходов в мезофильном режиме при влажности субстратов 96% можно получить метан в количестве 0,330; 0,275 и 0,383 $\text{Нм}^3/\text{кг}$ оСВ в конце 35 дневного времени гидролитического удерживания, соответственно из навозной жижи КРС и свиней, птичьего помета. Анаэробная ферментация навозной жижи КРС показала кинетические константы P , R_m и λ в значениях 0,381 $\text{Нм}^3/\text{кг}$ оСВ $^{-1}$; 0,022 $\text{Нм}^3/\text{кг}$ оСВ $^{-1}$ в день $^{-1}$ и 10,17 дней. Кинетически анализ производства метана из навозной жижи свиней представляет $P=0,420$ $\text{Нм}^3/\text{кг}$ оСВ $^{-1}$; $R_m=0,013$ $\text{Нм}^3/\text{кг}$ оСВ $^{-1}$ в день $^{-1}$ и $\lambda=12,20$ дней. Птичий помет отличается кинетическими параметрами P , R_m и λ равными соответственно 0,383 $\text{Нм}^3/\text{кг}$ оСВ $^{-1}$, 0,036 $\text{Нм}^3/\text{кг}$ оСВ $^{-1}$ в день $^{-1}$ и 1,67 дней. Эффективный период производства метана из навозной жижи КРС, навозной жижи свиней и птичьего помета был равен 27,54; 48,21 и 15,36 дням по анализу продолжительности анаэробного брожения для достижения 95% потенциального выхода метана. Большая энергетическая ценность навоза свиней способствует большему выходу из него биогаза и метана.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Бахов Ж.К., Коразбекова К.У., Сапарбекова А.А. Усовершенствование биотехнологической переработки животноводческих отходов // Вестник СемГУ им. Шакарима. – 2013. – № 2(62). – С.112-118.
- 2 Gujer W., Zehnder A.J.B. Conversion Processes in Anaerobic Digestion // Water Science and Technology. – 1983. – Vol. 15. – P. 127-167.
- 3 Budiyo, Widiya I N., Johari S., Sunarso. The Kinetic of Biogas Production Rate from Cattle Manure in Batch Mode // International Journal of Chemical and Biological Engineering. – 2010. – 3:1. – P. 39-44.
- 4 Budiyo, Widiya I N., Johari S., Sunarso. Influence of Inoculum Content on Performance of Anaerobic Reactors for Treating Cattle Manure using Rumen Fluid Inoculum // International Journal of Engineering and Technology. – 2009. – Vol. 1(3). – P. 109-116.
- 5 Kaparaju P., Ellegaard L., Angelidaki I. Optimisation of biogas production from manure through serial digestion: Lab-scale and pilot-scale studies // Bioresource Technology. – 2009. – 100. – P.701-709.
- 6 Luthfianto D., Mahajoeno, Sunarto. The impact of various organic waste and dilution to the biogas production of biomass waste of poultry farms // Nusantara Bioscience. – 2012. – Vol. 4. – N 1. – 6 p.

7 Cantrell K.B., Ducey T., Ro K.S., Hunt P.G. Livestock waste-to-bioenergy generation opportunities // *Bioresource Technology*. – 2008. – 99. – P. 7941-7953.

8 Gerber M. An Analysis of Available Mathematical Models for Anaerobic Digestion of Organic Substances for Production of Biogas // International gas union research conference. – Paris, 2008. – 30 p.

9 Lay J-J., Li Y-Y., Noike T. Mathematical Model for methane production from landfill bioreactor // *J. Environ. Engng.* – 1998. – 124(8). – P. 730-736.

10 Koppar A., Pullammanappallil P. Single-stage, batch, leach-bed, thermophilic anaerobic digestion of spent sugar beet pulp // *Bioresource Technology*. – 2007. – 99. P. 2831-2839.

11 Lo H.M, Kurniawan T.A., Sillanp M.E.T., Pai T.Y., Chiang C.F., Chao K.P., Liu M.H., Chuang S.H., Banks C.J., Wang S.C., Lin K.C., Lin C.Y., Liu W.F., Cheng P.H., Chen C.K., Chiu H.Y., Wua H.Y. Modeling biogas production from organic fraction of MSW co-digested with MSWI ashes in anaerobic bioreactors // [Bioresour Technol.](#) – 2010. – 101(16). – P. 6329-6335.

12 APHA. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. – Washington DC, 1995. – 53 p.

13 Helffrich D., Oechsner H. The Hohenheim biogas yield test. Comparison of different laboratory techniques for the digestion of biomass // *Landtechnik*. – 2003. – 58:3. – P. 148-149.

14 Ohl S. Ermittlung der Biogas- und Methanausbeute ausgewählter Nawaro // Dissertation. – ISSN 0931-6264. – Kiel, 2011. – 234 p.

15 Ludington D. Calculating the Heating Value of Biogas. DLtech: Inc. Ithaca NY, 2006. – Available from. – www.dairyfarmenergy.com.

16 Xie S. Evaluation of biogas production from anaerobic digestion of pig manure and grass silage // Dissertation. National University of Ireland. –2012. –193 p.

17 Deublein D., Steinhauser A. Biogas from Waste and Renewable Resources. – Germany, 2008. – 423 p.

REFERENCES

1 Bakhov Zh.K., Korazbekova K.U., Saparbekova A.A. *Vestnik SemGU*, **2013**, 2 (62), 112-118.

2 Gujer W., Zehnder A. J. B. *Water Science and Technology*. **1983**, 15, 127 – 167.

3 Budiyono, Widiassa I N., Johari S., Sunarso. *International Journal of Chemical and Biological Engineering*, **2010**, 3:1, 39-44.

4 Budiyono, Widiassa I N., Johari S., Sunarso. *International Journal of Engineering and Technology*, **2009**, 1(3), 109-116.

- 5 Kaparaju P., Ellegaard L., Angelidaki I. *Bioresource Technology*, **2009**, 100, 701–709.
- 6 Luthfianto D., Mahajoeno, Sunarto. *Nusantara Bioscience*, **2012**, 4 (1), 6p.
- 7 Cantrell K.B., Ducey T., Ro K.S., Hunt P.G. *Bioresource Technology*, **2008**, 99, 7941–7953.
- 8 Gerber M. *International gas union research conference*, **2008**, 30p.
- 9 Lay J-J., Li Y-Y., Noike T. *J. Environ. Engng.* **1998**, 124(8), 730–736.
- 10 Koppa A., Pullammanappallil P. *Bioresource Technology*, **2007**, 99, 2831–2839.
- 11 Lo H.M, Kurniawan T.A., Sillanp M.E.T., Pai T.Y., Chiang C.F., Chao K.P., Liu M.H., Chuang S.H., Banks C.J., Wang S.C., Lin K.C., Lin C.Y., Liu W.F., Cheng P.H., Chen C.K., Chiu H.Y., Wua H.Y. *Bioresour Technol.* **2010**, 101(16), 6329-6335.
- 12 APHA. Washington DC, 1995, 53 p.
- 13 Helffrich D., Oechsner H. *Landtechnik*. **2003**, 58:3,148-149.
- 14 Ohl S. *Disertation. ISSN 0931-6264*. Kiel. **2011**, 234 p.
- 15 Ludington D. DLtech: Inc. Ithaca NY, **2006**.
- 16 Xie S. *Dissertation. National University of Ireland*. **2012**, 193 p.
- 17 Deublein D., Steinhauer A. Germany, **2008**. 423p.

Резюме

Ж. К. Бахов¹, К. У. Қоразбекова¹, А. Леммер²

(¹М. О. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан мемлекеттік университеті, Шымкент,
Қазақстан Республикасы,

²Хоэнхайм университеті, Германия)

АУЫЛШАРУАШЫЛЫҚ ҚАЛДЫҚТАРЫНАН МЕТАН ӨНДІРУДІ ГОМПЕРЦТІҢ КИНЕТИКАЛЫҚ ПАРАМЕТРЛЕРІН ҚОЛДАНА ОТЫРЫП ҮЛГІЛЕУ

Ауылшаруашылық қалдықтарынан (ірі қара мал және шошқа қиы, құс саңғырығы) метан алудың кинети-касы периодты режимде жұмыс істейтін зертханалық реакторларда мезофильді ($37\pm 0,2^\circ\text{C}$ температурада) зерттелді. Метан өндірудің кинетикалық константалары – метанның әлеуеттік өндірілуі (P), метан алудың максимальды жылдамдығы (R_m) және метан алудың минимальды уақыты (λ) зерттелді және метан өндіру осы Гомперцтің кинетикалық параметрлерін есепке ала отырып үлгіленді. Ауылшаруашылық қалдықтарының анаэробты ашуы кезіндегі метан өндірудің тиімді периодына және 95% әлеуетті метан алу үшін қажетті анаэробты ашудың ұзақтығына талдау жасалды. Зерттеу нәтижелері бойынша ірі қара мал және шошқа қиы, құс саңғырығы үшін келесі сапалық көрсеткіштер сәйкесінше алынды: метанның әлеуеттік

өндірілуі – 0,381; 0,420 және 0,383 Нм³/кг оҚЗ⁻¹ (органикалық құрғақ зат), метанның максималды өндірілу жылдамдығы күніне – 0,022; 0,013 және 0,036 Нм³/кг оСВ⁻¹, лагфаза ұзақтығы – 10,17; 12,20 и 1,67 күн.

Тірек сөздер: ауылшаруашылық қалдықтары, анаэробты ашу, биогаз, метан алу, кинетикалық пара-метрлер.

Summary

Zh. K. Bakhov¹, K. U. Korazbekova¹, A. Lemmer²

(¹M. Auezov South-Kazakhstan State University, Shymkent, Republic of Kazakhstan,
²University Of Hohenheim, Germany)

SIMULATION OF METHANE PRODUCTION FROM AGRICULTURAL WASTE USING KINETIC PARAMETERS OF GOMPERTZ

The kinetics of methane production from agricultural waste (slurry of cattle and swine, poultry manure) in laboratory batch reactors in mesophilic regime (at a temperature of $37 \pm 0,20^{\circ}\text{C}$) were investigated. The kinetic constants of the methane production - the potential yield of methane (P), the maximum production rate of methane (R_m) and the minimum time for the production of methane (λ) were studied and methane production using of these kinetic parameters of Gompertz was modeled. The duration of anaerobic fermentation required producing 95% of the methane potential yield as a technical digestion time and the effective period of the methane production by anaerobic fermentation of agricultural waste was analyzed. According to the research results, the following qualitative indicators for cattle and pigs slurry and poultry manure were obtained: the potential yield of methane – 0.381, 0.420 and 0.383 Nm³/kg oDM⁻¹, the maximum production rate of methane – 0.022, 0.013 and 0.036 Nm³/kg oDM in day⁻¹, the lag-phase duration – 10.17, 12.20 and 1.67 days, respectively.

Keywords: agricultural waste, anaerobic fermentation, biogas, methane production, kinetic parameters.

Поступила 05.09.2013 г.