

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ ВЫХОДА ПРОДУКТОВ БИОРАЗЛОЖЕНИЯ ТВЕРДЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПРОТОКОЛА ЗАГРУЗКИ БИОРЕАКТОРА

Джамалова Г.А.

Казахский национальный технический университет имени К.И. Сатпаева, Казахстан (050013, г. Алматы, ул. Сатпаева, 22), e.mail: j.ga@bk.ru

В статье показаны результаты по изучению влияния независимых факторов, таких как содержание в утилизируемой массе ТБО органического компонента (X_1), горючей (X_2) компостной (X_3) и балластной (X_4) фракции; добавления воды (X_5) на содержание (%) основного энергетического компонента биогаза – метана. Выполнена аппроксимация полученных закономерностей методом наименьших квадратов. Функции описываются линейной зависимостью. Методом моделирования на основе множественной корреляции изучено влияние независимых переменных на степень генерирования метана в составе биогаза в процессе анаэробной переработки ТБО. Установлено, что наиболее сильнодействующими факторами являются содержание органической и горючей фракции, а также содержание воды. Наибольшее содержание метана в составе биогаза образуется в пределах 70,4–72,8 % при изменении таких факторов, как содержание органического компонента, содержание горючей и компостной фракции, содержание воды.

Ключевые слова: твердые бытовые отходы (ТБО), биореактор, анаэробное разложение, биогаз, метан.

MATHEMATICAL PLANNING OF YIELD OF PRODUCTS OF BIODEGRADATION SOLID WASTE DEPENDING ON THE PROTOCOL LOADING OF THE BIOREACTOR

Jamalova G.A.

Kazakh National Technical University after K.I. Satpayev, Kazakhstan (050013 Almaty, Satpayev str., 22), e.mail: j.ga@bk.ru

The article shows the results of the influence of independent factors: content in recyclable of mass of solids waste of the organic component (X_1), combustible (X_2) compost (X_3) and ballast (X_4) fraction; adding water (X_5) on the content (%) of basic of energy component of biogas – methane. Made approximation of laws produced by the method of least squares. The functions are described by a linear dependence. The method of modeling based on multiple correlation studied the effect of independent variables on the degree of generation of methane in the biogas composition in the process of anaerobic digestion of solid waste. It found that the most potent factors include content organic and combustible of fraction, and content of water. The highest content of methane in the composition of biogas produced in range of 70.4–72.8 %, when changing factors such as the content of organic component, content of combustible and compost fraction, water content.

Keywords: municipal solid waste (MSW), bioreactor, anaerobic digestion, biogas, methane.

Стабилизация органических отходов в процессе контролируемого промышленного биохимического разложения в установках на полигонах [2] направлено на получение газообразного продукта – биогаза [9, с. 260].

В работах [4, с.168] показано, что анаэробному биоразложению подвергается 70 % органических веществ и 30 % содержатся в остатке (лигнит, небольшое количество летучих жирных кислот и биомасса). Как известно из этой же работы [4, с.7], основным преимуществом анаэробного биоразложения отходов является низкий прирост биомассы, высокая энергетическая эффективность процесса с выходом основного продукта – метана.

Цель исследования – математическое планирование выхода продуктов биоразложения твердых бытовых отходов (метан) в зависимости от протокола загрузки биореактора.

Методика исследования. В основе биохимического разложения ТБО лежит некоторая многофакторная зависимость. Планирование многофакторного эксперимента позволяет найти эмпирическую зависимость, описывающую с приемлемым приближением влияние исследуемых факторов на конечный результат, в нашем случае – на эмиссию метана в составе биогаза в заданных для установки условиях.

В работе применен метод планирования эксперимента, в основу которого положена нелинейная множественная корреляция [5, 6]:

$$R = \sqrt{1 - \frac{(N-1) \times \sum (Y_s - Y_m)^2}{(N-K-1) \times \sum (Y_s - Y_{cp})^2}} \quad (1)$$

где: N – число описываемых точек, K – число действующих факторов, Y_s – экспериментальный результат, Y_m – теоретический (расчетный) результат, Y_{cp} – среднее экспериментальное значение.

Величина значима, если выполняется условие:

$$t_R = \frac{R \times \sqrt{N-K-1}}{1-R^2} > 2 \quad (2)$$

Математическая статистика и теория вероятностей подразделяют описывающие функции на значимые и незначимые, которые устанавливаются коэффициентом нелинейной множественной корреляции R и его значимостью t_R для 5 %-ного уровня, достаточного в биотехнологических исследованиях. Если функция незначима, то интервал ее изменения не выходит за пределы допустимого разброса результатов эксперимента, который называется доверительным интервалом. При анализе значимости частной функции $N = 5$, $K = 1$, так как учитывается влияние только одного фактора.

В основе большинства приемов подбора аппроксимирующей функции лежит метод наименьших квадратов. Применительно к уравнению прямой линии:

$$Y = a + b \times X. \quad (3)$$

$$b = \frac{n \sum XY - \sum X \sum Y}{n \sum X^2 - (\sum X)^2} \quad (4)$$

$$a = \frac{\sum Y - b \sum X}{n} \quad (5)$$

После выявления значимости частных функций на основании полученных результатов выводится обобщенное уравнение $Y_{об}$:

$$Y_{об} = \frac{Y_1 \times Y_2 \times \dots \times Y_n}{Y_{cp}^{n-1}} \quad (6)$$

где: $Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_n$ – частные функции, Y_{cp} – общее среднее всех учитываемых значений обобщенной функции в степени, на единицу меньшей числа частной функции.

Обобщенное уравнение анализируется на адекватность по величине коэффициента корреляции R и значимости t_R . Анализ обобщенного уравнения позволяет определить оптимальные условия для интенсификации процесса разложения ТБО в установке с максимальным выходом метана.

Результаты и обсуждение. В эксперименте были приняты основные факторы, влияющие на анаэробный процесс промышленного биоразложения ТБО – протокол загрузки биореактора, включающий поток следующих составляющих разложения:

1. Органический субстрат (фактор X_1), которого не должно быть меньше 25 % по весу на сухое вещество [8, с.3]. В работе [1] установлено, что 80 % органического компонента в составе ТБО является благоприятным фактором при производстве обогащенного метаном биогаза.

2. Фракции: горючая (фактор X_2), компостная (фактор X_3) и балластная (фактор X_4). Факторы X_2 и X_4 определяются локально, т.к. зависят от производимого населением морфологического состава ТБО. В работе [1] установлено, что содержание компоста при производстве биогаза не должно превышать 30 %. Поэтому на данном этапе методом математического моделирования будет рассмотрено влияние вводимого компоста в состав разлагаемого техногенного субстрата в объеме до 30 %.

3. Добавление воды (фактор X_5). Как известно, 25–60 % от объема осадков на полигонах становятся фильтратом [10]. Согласно ранее проведенным исследованиям установлено, что при анаэробной деградации смеси, включающей 70 % ТБО и 30 % компоста, выделяется (без учета влажности) 500 г H_2O на 1 кг сухого веса ТБО [3].

Учитывая все эти условия, были выделены уровни факторов, определяющие область факторного пространства. При проведении биотехнологических экспериментов необходимы априорные знания, чтобы задавать уровни факторов в соответствии с требованиями оптимизации процесса. Критерием полноты протекания процесса биоразложения ТБО, как известно, являются степень превращения исходных органических веществ в биогаз, степень извлечения полезного компонента – метана и т.п. Этот критерий – зависимая величина (функция Y_p). По результатам опытов из полученного массива экспериментальных значений степени превращения вещества ($Y, \%$) приводится выборка согласно плану – матрице для построения частных зависимостей, описывающих влияние отдельных факторов на Y_p .

В таблице 1 дана область факторного пространства для эксперимента.

Область факторного пространства

Факторы	Уровни факторов				
	1	2	3	4	5
X ₁ – Органический компонент, %	60	65	70	75	80
X ₂ – Горючая фракция, %	50	55	60	65	70
X ₃ – Компостная фракция, %	10	15	20	25	30
X ₄ – Балластная фракция, %	7	10	13	16	20
X ₅ – Добавление воды, мл на кг ТБО	100	150	200	250	300

Таблица 2

Пятифакторная матрица планирования эксперимента

№ опыта	Пятифакторная матрица планирования эксперимента										СН ₄ , %
	X ₁		X ₂		X ₃		X ₄		X ₅		
	Уровень	Значение	Уровень	Значение	Уровень	Значение	Уровень	Значение	Уровень	Значение	
1	1	60	1	50	1	10	1	7	1	100	71
2	1	60	3	60	3	20	3	13	3	200	73
3	1	60	2	55	2	15	2	10	2	150	70
4	1	60	5	70	5	30	5	20	5	300	68
5	1	60	4	65	4	25	4	16	4	250	72
6	3	70	1	50	3	20	2	10	5	300	68
7	3	70	3	60	2	15	5	20	4	250	69
8	3	70	2	55	5	30	4	16	1	100	67
9	3	70	5	70	4	25	1	7	2	150	66
10	3	70	4	65	1	10	3	13	3	200	74
11	2	65	1	50	2	15	4	16	5	300	71
12	2	65	3	60	5	30	1	7	4	250	73
13	2	65	2	55	4	25	3	13	2	150	70
14	2	65	5	70	1	10	2	10	3	200	68
15	2	65	4	65	3	20	5	20	1	100	72
16	5	80	1	50	5	30	3	13	5	300	71
17	5	80	3	60	4	25	2	10	1	100	73
18	5	80	2	55	1	10	5	20	4	250	70
19	5	80	5	70	3	20	4	16	2	150	68
20	5	80	4	65	2	15	1	7	3	200	72
21	4	75	1	50	4	25	5	20	4	250	73
22	4	75	3	60	1	10	4	16	2	150	69
23	4	75	2	55	3	20	1	7	5	300	67
24	4	75	5	70	2	15	3	13	1	100	72
25	4	75	4	65	5	30	2	10	3	200	74

Как видно из таблицы 2, по исследуемым факторам составлена матрица планирования на основе латинского квадрата, включающая 25 экспериментов ($n = p^2$, где $p = 5$), по ней распределены независимые переменные/факторы X₁, X₂,...X₅ по уровням 1–5 [5, 6].

После выборки экспериментальных данных получают частные функции (Y_1, Y_2, \dots, Y_5), описывающие влияние исследуемых факторов на содержание метана (%) в составе биогаза (таблица 3).

Таблица 3

Расчет экспериментальных значений частных функций

№ фактора	Уровень					Среднее значение
	1	2	3	4	5	
X ₁	70,8	70,8	68,8	71	70,8	70,44
X ₂	70,8	68,8	71,4	72,8	68,4	70,44
X ₃	70,4	70,8	69,6	70,8	70,6	70,44
X ₄	69,8	70,6	72	69,4	70,4	70,44
X ₅	71	68,6	72,2	71,4	69	70,44

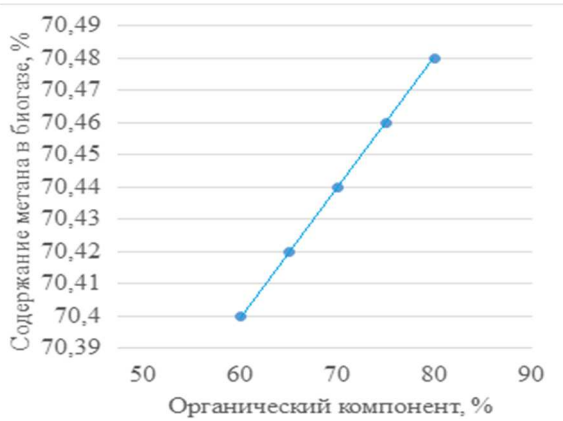
Выполнен анализ моделей для алгебраического описания функций методом наименьших квадратов (таблица 4).

Таблица 4

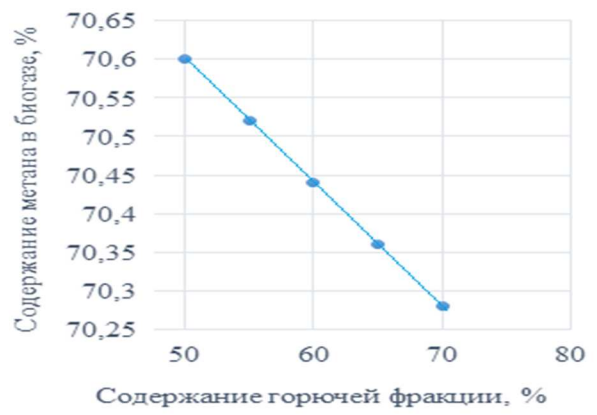
Расчетные значения и аппроксимация исследуемых функций

№ опыта	X ₁				X ₂							
	X	Y	X ²	XY	X	Y	X ²	XY				
Σ	350	352,2	24750	24655	300	352,2	18250	21128				
№ опыта	X ₃				X ₄				X ₅			
	X	Y	X ²	XY	X	Y	X ²	XY	X	Y	X ²	XY
Σ	100	352,2	2250	7046	66	352,2	974	4649	1000	352,2	225000	70380
Формулы		X ₁		X ₂		X ₃		X ₄		X ₅		
$b = \frac{n \sum XY - \sum X \sum Y}{n \sum X^2 - (\sum X)^2}$		0,004		-0,016		0,008		-0,0004		-0,002		
$a = \frac{\sum Y - b \sum X}{n}$		70,16		71,4		70,28		70,4		70,92		
$Y = a + b \cdot X$		Y ₁ = 70,16 + 0,004 · X ₁		Y ₂ = 71,4 - 0,016 · X ₂		Y ₃ = 70,28 + 0,008 · X ₃		Y ₄ = 70,4 - 0,0004 · X ₄		Y ₅ = 70,92 - 0,002 · X ₅		
Теоретические значения частных функций:												
Y _{n1} = a + b · X _{n1}		70,4		70,6		70,36		70,4		70,72		
Y _{n2} = a + b · X _{n2}		70,42		70,52		70,4		70,4		70,62		
Y _{n3} = a + b · X _{n3}		70,44		70,44		70,44		70,4		70,52		
Y _{n4} = a + b · X _{n4}		70,46		70,36		70,48		70,4		70,42		
Y _{n5} = a + b · X _{n5}		70,48		70,28		70,52		70,4		70,32		

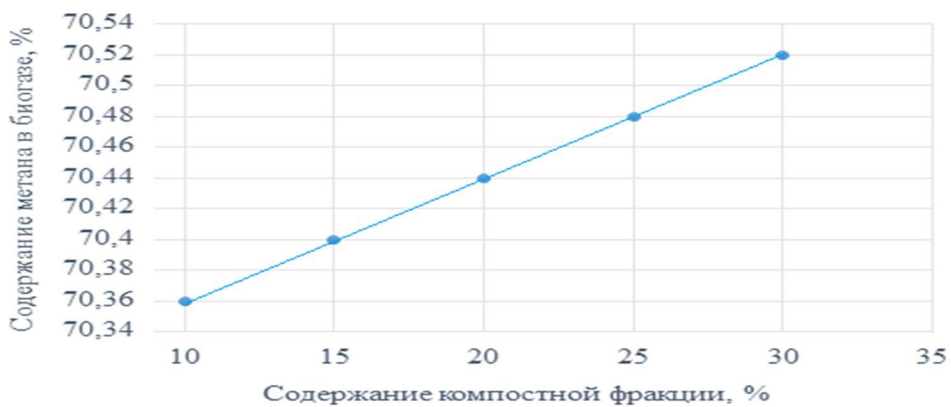
На рисунке 1 показаны закономерности изменения содержания метана (CH₄) в биогазе в процессе анаэробной утилизации ТБО.



а) зависимость содержания метана в биогазе от содержания органического компонента



б) зависимость содержания метана в биогазе от содержания горючей фракции



в) зависимость содержания метана в биогазе от содержания компостной фракции



г) зависимость содержания метана в биогазе от содержания балластной фракции

Рис.1. Выборка на точечные графики: влияние независимых факторов на содержание (%) основного энергетического компонента биогаза – метана

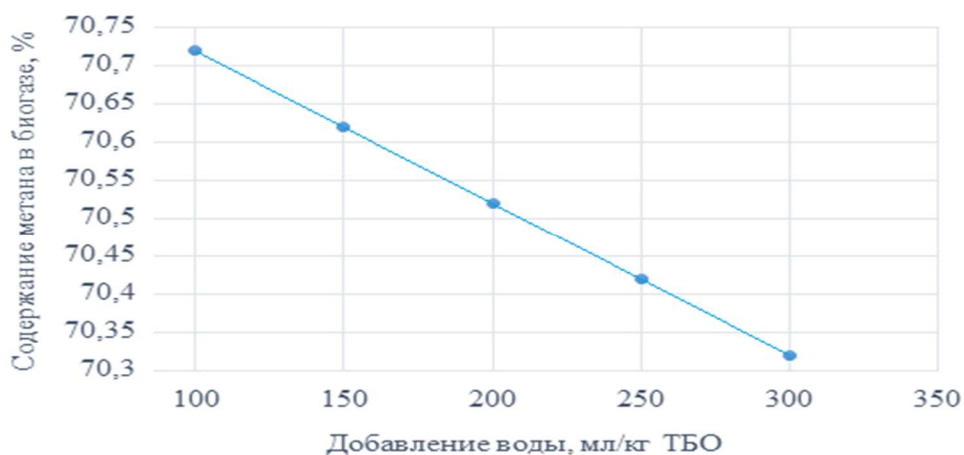


Рис. 2. Выборка на точечные графики: зависимость содержания метана в биогазе от добавления воды

Как видим из таблицы 4 и рисунков 1–2, изучено влияние независимых факторов – содержание в утилизируемой массе ТБО органического компонента (X_1), горючей (X_2), компостной (X_3) и балластной (X_4) фракции; добавления воды (X_5 , мл/кг ТБО) на содержание (%) основного энергетического компонента биогаза – метана.

Анализ функций показал, что влияние органических компонентов (X_1) значительно, т.к. значение Y_1 изменяется в достаточно заметном интервале.

Однако, как показали расчеты теоретических значений функции Y_1 -функция, описывающая влияние независимого фактора X_1 , сильнодействующая, поскольку характеризуется значительной крутизной при изменении в интервале 70,40–70,48 % (рисунок 1, а). Это согласуется с положением об энергетической ценности образующегося основного горючего компонента – биогаза. Чувствительность изменения степени генерации метана находится в интервале сотых долей, что свидетельствует о значительной чувствительности эксперимента и энергетического подхода к выявлению закономерностей в системе «техногенный отход – окружающая среда».

В результате моделирования процесса образования биогаза в установке по утилизации ТБО на полигонах получены закономерности, которые описываются частными уравнениями. Функции описываются линейной зависимостью.

Следует отметить, что построение точечных графиков по экспериментальным данным выявляет естественный разброс с учетом экспериментальной ошибки, т.е. присущую эксперименту, описывающему сложное взаимодействие в процессе разложения ТБО в динамически изменчивых условиях. Коэффициент корреляции в пределах 0,7 ($t_R = 2,4 > 2$) свидетельствует об адекватности уравнения функциональному.

Анализ функции Y_2 , описывающей влияние содержания горючей фракции на степень образования биогаза, выявил снижение содержания биогаза, поскольку под влиянием горючих компонентов протекают быстрые реакции горения, кроме того, происходит интенсификация диффузионных процессов, в результате – происходит снижение содержания биогаза (рисунок 1, б).

Функция Y_3 , описывающая влияние содержания компостной фракции, изменяется в пределах 70,3–70,5 % с некоторым возрастанием содержания в продуктах разложения метана (рисунок 1, в).

Влияние содержания балластной фракции незначительно, так как кривая изменения содержания в метане довольно стабильна в пределах 70,4 % (рисунок 1, г).

Воздействие содержания воды в системе значительно. Зависимость $Y_5=f(X_5)$ показывает заметное снижение содержания метана в изучаемом интервале фактора (рисунок 2). Это можно объяснить снижением интенсивности взаимодействия в сложной смеси в присутствии воды.

Частные функции объединены в обобщенное уравнение б:

$$Y_{об} = \frac{(70,16 + 0,004 \cdot X_1)(71,4 - 0,016 \cdot X_2)(70,28 + 0,008 \cdot X_3)(70,4 - 0,0004 \cdot X_4)(70,92 - 0,002 \cdot X_5)}{70,44^4}$$

Анализ обобщенного уравнения показал, что при интенсификации биоразложения ТБО в установке [2] при заданных технологических параметрах (содержание органического компонента в ТБО 70–80 %, компостной фракции – не более 30 %, горючей фракции – в интервале 50–70 %, балластной фракции – не более 20 %) способствует выделению биогаза с максимальным содержанием метана в интервале 70,4–72,8 %.

Заключение и выводы. При интенсификации процесса анаэробного разложения ТБО в установках на полигоне [2] с соблюдением оптимальных условий разложения можно улучшить качество производимого биогаза путем повышения содержания метана почти на 18 % (при сравнении с вырабатываемым свалочным телом Карасайского полигона ТБО г. Алматы биогаза: до 73 % против 55,2 %) с одновременным снижением содержания углекислого газа на 25,8 % (менее 16 % против 41,8 % соответственно) [1].

Выводы:

1. Методом моделирования на основе множественной корреляции изучено влияние независимых переменных на степень генерирования метана в составе биогаза в процессе анаэробной переработки ТБО.

2. Установлено, что наиболее сильнодействующими факторами являются содержание органической и горючей фракции, а также содержание воды.

3. Наибольшее содержание метана в составе биогаза образуется в пределах 70,4–72,8 % при изменении факторов X_1 (содержание в ТБО органического компонента, %), X_2 (содержание в ТБО горючей фракции, %), X_3 (содержание компоста, %) и X_5 (содержание воды, мл/кг ТБО).

Список литературы

1. Джамалова Г.А. Интенсификация анаэробного разложения модельных образцов твердых бытовых отходов в биореакторах // Известия СПбГТИ(ТУ). – СПб., 2014. – № 23 (49). – С.84-86.
2. Джамалова Г.А., Гарабаджиу А.В., Козлов Г.В., Шевченко А.А. Установка утилизации ТБО на полигонах. Патент на полезную модель РФ 137676. – 2013.
3. Джамалова Г.А., Ивахнюк Г.К. Количественный и качественный состав фильтрата, получаемого из биореактора при ускоренной биодegradации твердых бытовых отходов // Известия СПбГТИ(ТУ). – СПб., 2014. – № 24 (50). – С.73-77.
4. Дубровский В.С. Метановое сбраживание сельскохозяйственных отходов / В.С. Дубровский, У.Э. Виестур. – Рига: Знание, 1988. – 204 с.
5. Казова Р.А. Моделирование обезвреживания техногенных материалов // Материалы XI международной научно-технической конференции «Новое в безопасности жизнедеятельности. Экология». – Алматы: КазНТУ имени К.И. Сатпаева, 2008. – С.56–59.
6. Малышев В.П. Математическое планирование металлургического и химического эксперимента. – Алма-Ата: Наука, 1977. – 35 с.
7. Потапов П.А. Методы локализации и обработки фильтрата полигонов захоронения твердых бытовых отходов / П.А. Потапов, Е.И. Пупырев, А.Д. Потапов. – М.: Изд-во ассоциации строительных вузов, 2004. – 168 с.
8. Разнощик В.В. Полевые методы обезвреживания и переработки бытовых отходов в компост / В.В. Разнощик, В.С. Карасев, В.Н. Суворов // Обзоры по городскому хозяйству. № 6/9-70. – Москва, 1970. – 24 с.
9. Утилизация твердых отходов / под ред. Д. Вилсона. В 2 т. Т.1. Сокращенный перевод с англ. Э.Г. Тетерина, А.С. Скотников. Под ред. А.П. Цыганкова. – М.: Стройиздат, 1985. – 336 с.
10. Plock A. Vorschlaege zur Behandlung von Deponiesickerwasser unter Berücksichtigung von wirtschaftlichen Aspekten. – Weimar, 1993.

Рецензенты:

Ошакбаев М.Т., д.т.н., профессор; зав. кафедрой прикладной экологии, профессор НАО «КазНУТУ имени К.И. Сатпаева», г. Алматы;

Курбанова Г.В., д.б.н., профессор НАО «КазНУТУ имени К.И. Сатпаева», г. Алматы.