

УДК 504.06(57.014)

АНАЛИЗ ИЗМЕНЧИВОСТИ КАЧЕСТВЕННОГО СОСТАВА БИОГАЗА, ПРОИЗВОДИМОГО БИОРЕАКТОРОМ ПРИ ИНТЕНСИФИКАЦИИ АНАЭРОБНОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ТВЕРДЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ

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 статистического исследования по анализу изменчивости качественного состава биогаза на основе полученных с 6-го по 120-й день экспериментальных данных при интенсификации процессов анаэробного разложения твердых бытовых отходов в биореакторах. Согласно проведенным исследованиям выявлено, что высокие коммерческие показатели биогаза, такие как общее производство (39,938 л) и высокое содержание CH_4 ($58,3125 \pm 5,91$ %), низкое содержание CO_2 ($13,125 \pm 1,62$ %) в составе биогаза, были получены из малого биореактора № 1. По сравнению с качеством биогаза, произведенного свалочным телом Карасайского полигона ТБО можно отметить, что в процессе интенсификации анаэробного разложения ТБО в биореакторах, содержание метана в составе биогаза увеличивается примерно на 17 – 20 %. Более рентабельным будет производство биогаза при следующих условиях работы биореактора: содержание компоста не должно быть выше 30%; соблюдение физико-химических показателей работы биореактора (рН – слабощелочная, температура – мезофильный режим) обеспечит за короткий промежуток времени высокое производство биогаза ($0,600 \text{ м}^3/\text{кг}$ ТБО с содержанием метана не менее 67 %).

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

ANALYSIS OF VARIABILITY OF THE QUALITY COMPOSITION OF THE BIOGAS PRODUCED BY BIOREACTOR AT AN INTENSIFICATION OF ANAEROBIC DECOMPOSITION MUNICIPAL SOLID WASTE

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 a statistical study on the analysis of variability of qualitative composition of biogas based on the experimental data from the 6th to the 12th day obtained during intensification of the processes of anaerobic decomposition of MSW in bioreactors. According to the research found that high commercial of indicators of biogas, such as total production (39.938 L) and a high content of CH_4 ($58,325 \pm 5,91\%$) while low- CO_2 ($13,125 \pm 1,62\%$) in the composition of biogas were received from a small number of the bioreactor 1. As compared with the quality of biogas produced by Karasai landfill may be noted that in the process of intensification anaerobic decomposition of MSW in bioreactors, the methane content in biogas composition increases by about 17 - 20%. A more cost-effective production of biogas will be under the following working conditions of the bioreactor: contents of compost must not be higher than 30%, observance of the physic-chemical indicators of the bioreactor (pH is slightly alkaline, the temperature - mesophilic mode) ensures a short time high production of biogas ($0,600 \text{ m}^3 / \text{kg}$ of MSW with methane content of at least 67%).

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

Продуктом анаэробного разложения твердых бытовых отходов (ТБО) является частично стабилизированный сброженный биогаз, основными компонентами которого являются метан (до 55 – 70 %), углекислый газ (до 27 – 45 %), азот (до 1%), водород (до 1 %) и сероводород (до 3 %) [7, с.23].

Биогаз, как коммерческий продукт имеет следующие преимущества [7, с.25]: это качественно стабильный продукт, является возобновляемой энергией, представляет собой

экологически безвредное среднекалорийное газовое топливо (теплотворная способность 5000-5600 ккал/м³).

Энергетическая рекуперация биогаза эффективна только при дешевизне производства. Утилизация энергии биогаза сводится к получению тепловой (при сжигании биогаза в котлах) и электрической энергии или преобразованию химической энергии в механическую (топливо для двигателей) [6, с.25]. Например, при полном энергопотреблении станции 15,1 млн. кВт·ч в год за счет работы мотор-генераторов на биогазе производят в год 15,6 млн. кВт·ч энергии [2; 6, с.31].

Цель исследования – изучение изменчивости качественного состава биогаза при интенсификации анаэробного разложения твердых бытовых отходов в биореакторах.

Материал и методы исследования. Материалом исследования послужил биогаз, вырабатываемый в процессе интенсификации анаэробного разложения ТБО в биореакторах (№ 1, 2 и 3) объемом 8,8 л при разных условиях загрузки: 2200 г (70% ТБО и 30 % компоста), 2304 г (50 % ТБО/ % компоста) и 3000 г (100 % компоста) [3, 4, 8].

В целях изучения количества и качественного состава биогаза во времени пробы отбирались на 6, 12, 20, 34, 40, 46, 53, 60, 67, 74, 81, 87, 95, 101, 115 и 120-й день эксперимента (таблица 1) [8]. Качество биогаза оценивали по содержанию (%) в его составе СН₄ и СО₂.

Анализ изменчивости химического состава проб биогаза был проведен с использованием методов математической статистики [7].

Результаты и обсуждение. Анализ изменчивости количества и качественного состава биогаза при интенсификации анаэробного разложения ТБО проводили с помощью вариационно-статистического метода исследования (таблицы 2 и 3, рисунки 1 – 4).

Как видим из таблицы 2 и 3, изучение количества ежедневной и общей эмиссии биогаза в исследуемый период показало, что:

- среднестатистическая суточная эмиссия биогаза была максимальной для малого биореактора № 1 ($0,363568 \pm 0,13$ л), минимальной – для малого биореактора № 3 ($0,002 \pm 0,002$ л), тогда как малый биореактор № 2 занимал по данному исследуемому параметру промежуточное между малыми биореакторами № 1 и № 3 положение ($0,2482 \pm 0,07$ л);

- изменчивость была относительно высока для всех трех биореакторов, при этом была максимальной для малого биореактора № 3 (398 %), средней – для малого биореактора № 1 (135,8 %) и наименьшей – для малого биореактора № 2 (103 %);

Таблица 1

Количество и качественный состав биогаза, производимых малыми биореакторами [8]

День эксперимента	Малый биореактор № 1				Малый биореактор № 2				Малый биореактор № 3			
	Количество биогаза, л		Качество биогаза, %		Количество биогаза, л		Качество биогаза, %		Количество биогаза, л		Качество биогаза, %	
	Суточная	Общая	CO ₂	CH ₄	Суточная	Общая	CO ₂	CH ₄	Суточная	Общая	CO ₂	CH ₄
6	0	0	0	0	0	0	40	48	0	0	0	0
12	0	0,1275	0	0	0,7325	2,135	23	60	0,0025	0,0825	0	0
20	0	0,1275	15	70	0,8475	7,385	12	60	0	0,1575	8	0
34	1,14	3,1825	20	73	0,37375	17,35375	20	65	0	0,68	8	0,1
40	1,35375	11,41125	20	70	0,500227	20,16864	14	58	0	0,68	7	0,05
46	1,3	19,96	20	68	0,3325	22,46227	14	55	0,03	0,71	5	0
53	0,6775	26,8375	20	70	0,22875	24,22227	14	58	0	0,7425	5	0
60	0,43	31,4025	18	68	0,1525	25,58727	16	58	0	0,7725	5	0
67	0,4775	34,5575	16	68	0,2325	26,87727	16	58	0	0,8025	5	0
74	0,23	36,5925	14	67	0,07	27,97727	16	58	0	0,8325	4	0,1
81	0,1625	37,85	12	66	0,1	28,84727	13	56	0	0,8625	5	0
87	0,0075	38,6575	12	66	0,2525	29,77227	10	52	0	0,8925	5	0,4
95	0	39,3675	9	60	0,065	30,59227	10	58	0	0,9225	5	0,3
101	0,015	39,6225	12	65	0,01	31,03727	11	50	0	0,9525	5	0
115	0,011667	39,87967	11	61	0,036667	32,86144	11	50	0	1,0125	5	0
120	0,011667	39,938	11	61	0,036667	33,04477	11	50	0	1,0125	5	0

Таблица 2

Вариационно-статистический анализ количества и качественного состава биогаза, производимого биореактором при интенсификации процессов биоразложения ТБО

Малый биореактор	Показатель	Суточная эмиссия, л	Качественный состав биогаза, %	
			CO ₂	CH ₄
№ 1	$\bar{X} - m_{\bar{x}}$	0,363568 ± 0,13	13,125 ± 1,62	58,3125 ± 5,91
	C _v , %	135,8	48,2	39,5
№ 2	$\bar{X} - m_{\bar{x}}$	0,2482 ± 0,07	15,6875 ± 1,90	55,875 ± 1,19
	C _v , %	103	47,2	8,3
№ 3	$\bar{X} - m_{\bar{x}}$	0,002 ± 0,002	4,8 ± 0,56	0,06 ± 0,03
	C _v , %	368	46	202

- эмпирический высокий размах по суточной эмиссии биогаза был зафиксирован для малого биореактора № 1 (лимиты: от 0 л на 6, 12, 20 и 59-й день до 1,35375 л на 40-й день эксперимента), средний – для биореактора № 2 (от 0 на 6-й день до 0,8475 л на 20-й день эксперимента) и низкий – для биореактора № 3 (лимиты: от 0 в большинстве и до 0,03 л на 46-й день эксперимента).

Так как вычисленные значения достоверности () намного больше табличных значений t на трех уровнях вероятности (2,13; 2,95; 4,07) [7, 323 с], то можно считать полученные средние арифметические высоко достоверными.

При сравнительном анализе суточной эмиссии биогаза (л) между тремя биореакторами мы наглядно из графика рисунка 1 видим, что по данному показателю лидирует биореактор № 1, т.к. начиная с 20-го дня эксперимента (0 л) мы прослеживаем подъем в выбросе биогаза до 1,14 л на 34-й и далее до 1,35375 л на 40-й день эксперимента, после – планомерное снижение эмиссии до 87-го дня эксперимента. Тогда как производительность второго малого биореактора по суточной эмиссии биогаза в процессе исследования претерпевает менее резкие колебания: подъем производительности отмечается уже на 12-й день эксперимента (0,7325 л) и далее с незначительными колебаниями производительность варьирует в пределах от 0,8475 л на 20-й день до 0,2525 л на 87-й день эксперимента. Производительность третьего малого биореактора была наихудшей, т.к. суточный выброс биогаза был отмечен только на 12-й (0,0025 л) и 46-й (0,03 л) день эксперимента, тогда как в другие исследуемые дни эмиссии биогаза обнаружено не было.

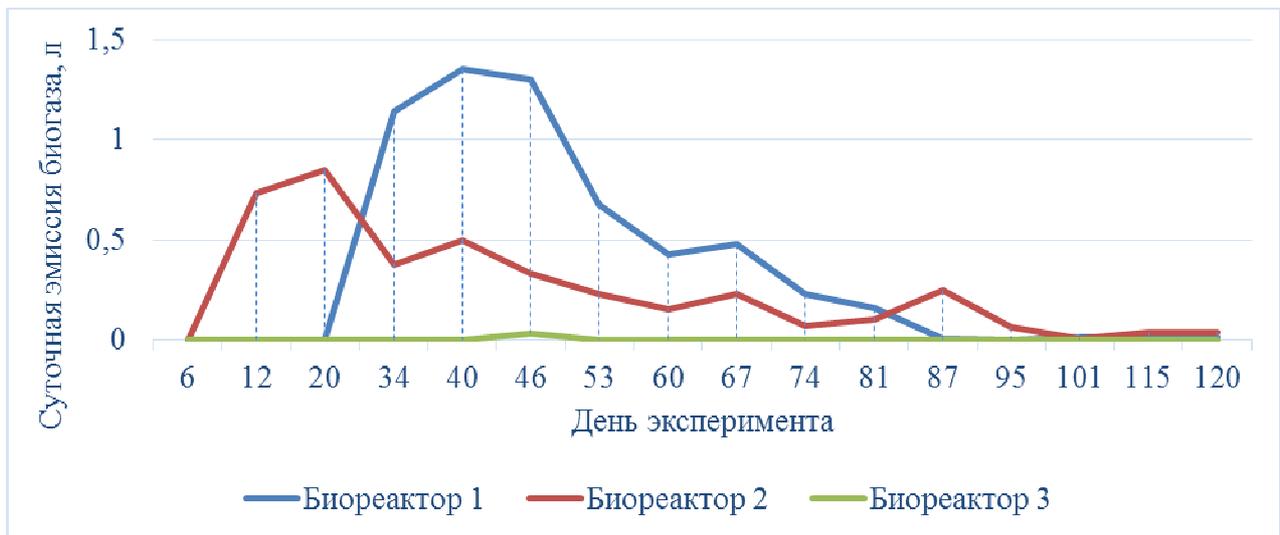


Рис.1. Суточная эмиссия биогаза в сравнительном аспекте между тремя малыми биореакторами, л

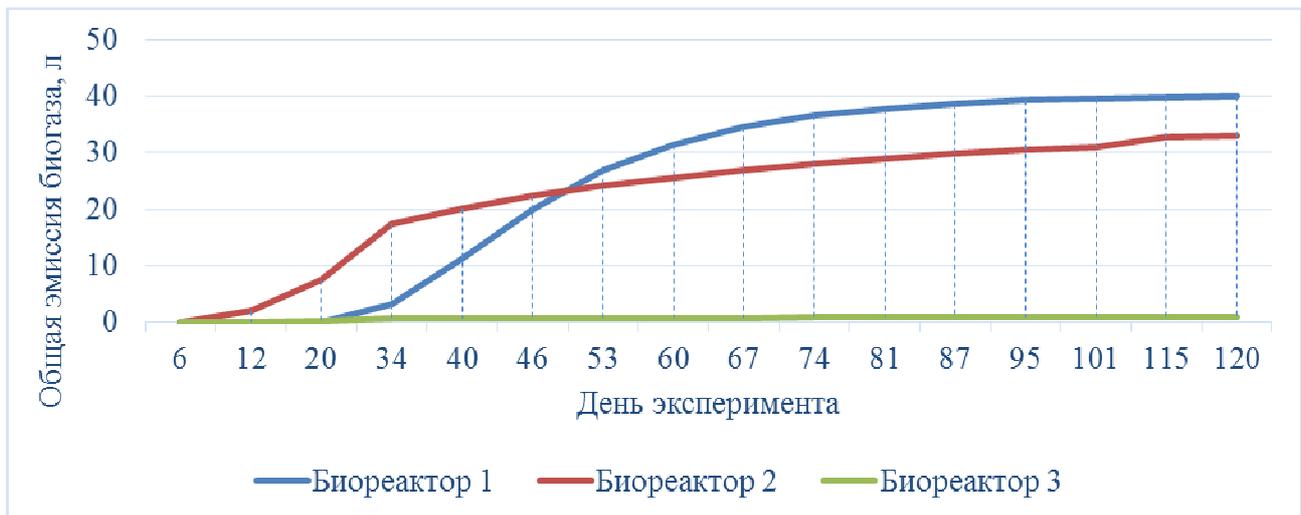


Рис.2. Общая эмиссия биогаза в сравнительном аспекте между тремя малыми биореакторами, л

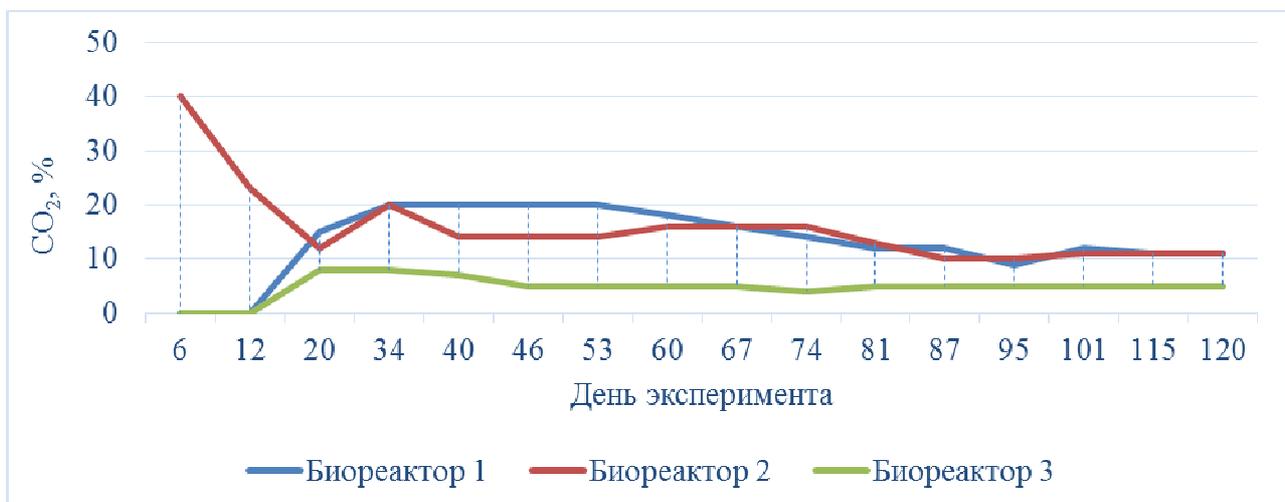


Рис.3. Содержание в составе биогаза CO₂, %

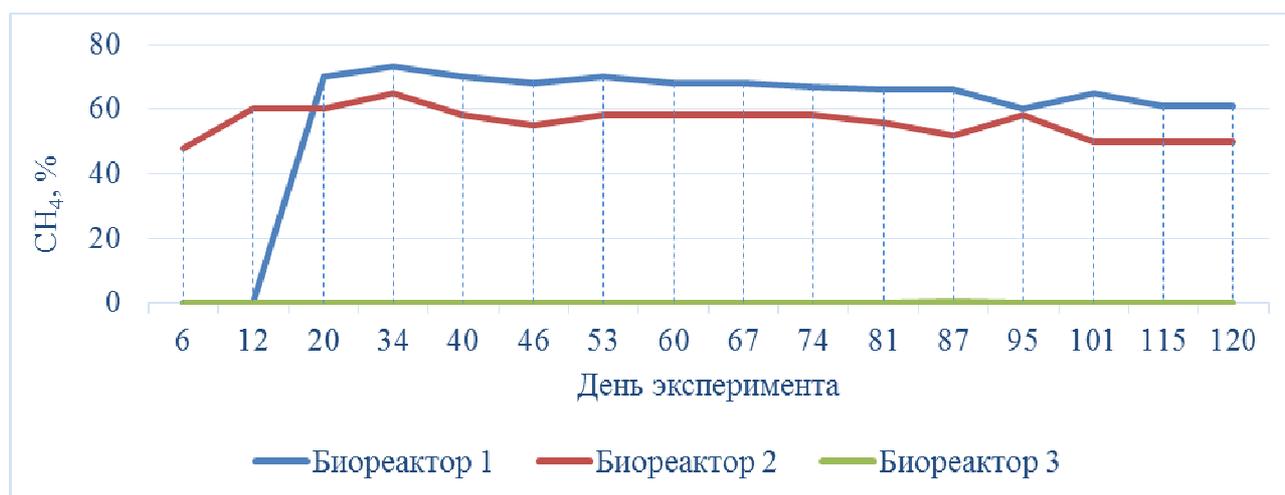


Рис.4. Содержание в составе биогаза CH_4 , %

Следовательно, общая производительность по биогазу (рисунок 2) первого малого биореактора была максимальной (39,938 л), далее по производительности следовал второй малый биореактор (33,04477 л) и наименьшая производительность была отмечена для третьего малого биореактора (1,0125 л).

За исследуемый период изучение среднестатистического качественного состава биогаза (таблица 3, рисунки 3 – 4) показало, что по метану наибольшее содержание было отмечено в биогазе, произведенного первым малым биореактором ($58,3125 \pm 5,91$ %) при лимитах от 0 % на 6-й день эксперимента до 73 % – на 34-й день эксперимента. В произведенном за исследуемый период биогазе среднее содержание CO_2 в рассматриваемом биореакторе составляла $13,125 \pm 1,62$ % и варьировала от 0 (6-й день эксперимента) до 20 % (от 34 – 53-го дня эксперимента). Тогда как второй малый биореактор по качественным показателям уступал первому по содержанию CH_4 ($55,875 \pm 1,19$ %) при лимитах 48% (6-й день эксперимента) и 60% (12 – 20-й день эксперимента), но превосходил по содержанию CO_2 ($15,6875 \pm 1,90$ %) при вариации от 10 % (87 – 95-й день эксперимента) до 40 % (6-й день эксперимента). Наихудший по качеству биогаз в исследуемый период был произведен третьим малым биореактором, т.к. среднестатистическое содержание CH_4 составляла $0,06 \pm 0,03$ % при вариации от 0 (6 – 20-й день эксперимента) до 0,4 % (87-й день эксперимента), а CO_2 – $4,8 \pm 0,56$ % при лимитах от 0 (6 – 12-й день эксперимента) до 8 % (20 – 34-й день эксперимента).

Исходя из вышеизложенного можно отметить, что качество биогаза по содержанию CH_4 претерпевает во времени существенные изменения. Так, на примере биореактора № 1 можно отметить, что качественное развитие биогаза во времени претерпевает периоды от полного отсутствия в составе биогаза метана (по 12-й день эксперимента) до периода, когда состав биогаза «обогащен» метаном (этап максимального производства метана – это с 20-го по 53-й день эксперимента, когда среднее содержание метана в биогазе составляло 70,2 % и с

60 по 87-й день эксперимента, когда среднее содержание метана все еще находился на высоком уровне – 67%) и далее, период спада (со 101-го дня эксперимента), характеризующаяся планомерным снижением содержания метана в биогазе (61,75 %).

На следующем этапе был проведен статистический анализ многомерных (суточная/общая эмиссия биогаза, содержание в биогазе CH_4 и CO_2) корреляционных связей. Силу связи одного из них (X – суточная/общая эмиссия биогаза) с двумя другими признаками (Y – содержание в биогазе CH_4 ; Z – содержание в биогазе CO_2) измеряли с помощью коэффициента множественной корреляции [7, 251 с.].

Согласно произведенным расчетам выявлено, что связь между суточной эмиссией биогаза и содержанием CH_4 и CO_2 была положительной. А по силе связи коэффициент был выше среднего для малого биореактора № 1 (0,63) и № 2 (0,6), тогда как для малого биореактора № 3 – рассчитанный коэффициент был низким (0,14). Критерий достоверности (t_{ϕ}) для биореактора № 1 составил 2,94, № 2 – 2,73 и № 3 – 0,52 ($t_{st} = 2,16$ для $k = 16 - 3 = 13$ и $\alpha = 5\%$ [7, 323 с.]). Следовательно, нулевая гипотеза отвергается для малых биореакторов № 1 и № 2 на 5 %-ном уровне значимости.

При рассмотрении частных коэффициентов корреляции наиболее высокой по силе связи оказался коэффициент корреляции между содержанием метана и углекислого газа при исключении влияния на эту связь суточной эмиссии биогаза (0,95; биореактор № 1) и коэффициент корреляции между суточной эмиссией биогаза и содержанием метана при исключении влияния на эту связь содержания углекислого газа (0,8; биореактор № 1; 0,61; биореактор № 2 и № 3). Наименьший коэффициент частной корреляции был отмечен для малого биореактора № 3 по всем исследуемым сочетаниям (от 0,01 до 0,1). Критерий достоверности (t_{ϕ}) для биореактора № 1 составил 3,43, № 2 – 0,41 и № 3 – 0,44 ($t_{st} = 2,16$ для $k = 16 - 3 = 13$ и $\alpha = 5\%$ [7, 323 с.]). Следовательно, нулевая гипотеза отвергается для малого биореактора № 1 на 5 %-ном уровне значимости. Исходя из полученных данных можно дать следующее утверждение, что исследуемые признаки для малого биореактора № 3 независимы друг от друга и в выборке связаны косвенно.

Заключение. Согласно проведенным исследованиям можно заключить, что высокие коммерческие показатели биогаза, такие как общее производство (39,938 л), высокое содержание CH_4 ($58,3125 \pm 5,91\%$), низкое содержание CO_2 ($13,125 \pm 1,62\%$), были получены из малого биореактора № 1. При сравнении с качеством биогаза, произведенного свалочным телом в условиях Карасайского полигона ТБО г. Алматы можно отметить, что в процессе интенсификации анаэробного разложения ТБО в биореакторах, содержание метана в составе биогаза увеличивается примерно на 17 – 20 %. Более целесообразным будет производство биогаза при следующих условиях работы биореактора: соотношение компоста

в составе биогаза не должно быть выше 30 %, соблюдение физико-химических показателей работы биореактора (рН – слабощелочная, температурный режим – мезофильный) обеспечит за короткий промежуток времени высокое производство биогаза (0,600 м³/ кг ТБО [1, 9] с содержанием метана не менее 67 %). При этом, из 1 м³ биогаза, как коммерческого продукта, можно будет получить от 1,6 до 2,3 кВт.ч [5, с.97] или 1.95 кВт.ч [6, с.31] электроэнергии. Как известно, 1 м³ биогаза с содержанием 60 % метана дает примерно 22 МДж, а 70% – 25 МДж энергии [5, с.97].

Список литературы

1. Ананишвили Г.Д. Основы биоэнергетики и биоэнергетического строительства в сельском хозяйстве. Автор. дис... д-ра с.-х.наук. – М., 1959- 29 с.
2. Баадер В. Биогаз: теория и практика / Баадер В., Доне Е., Брендоорфер М. - Пер. с нем. М., 1982. – 148 с.
3. Джамалова Г.А. Интенсификация анаэробного разложения модельных образцов твердых бытовых отходов в биореакторах. Известия СПбГТИ(ТУ), № 23 (49), СПб- 2014.С.84-86.
4. Джамалова Г.А. Количественный и качественный состав фильтрата, получаемого из биореактора при ускоренной биодegradации твердых бытовых отходов. Известия СПбГТИ(ТУ), № 24 (50), СПб- 2014.С.73-77.
5. Дубровский В.С. Метановое сбраживание сельскохозяйственных отходов/ Дубровский В.С., Виестур У.Э. - Рига: Знание,1988.- 204 с.
6. Крупский К.Н. Использование биогаза в качестве источника энергии: обзорная информация/ Крупский К.Н., Андреев Е.Н., Ютина А.С. - М.: ЦБНТИ Минжилкомхоз РСФСР, 1988. – 43 с.
7. Лакин Г.Ф. Биометрия. М., Высшая школа. 1990. – 349 с.
8. Project No.516732. Project acronym: NISMIST. Project title: Management of environmental risks associated with landfills in seismically active regions in the New Independent States (NIS) of Central Asia. 2008. 91p. URL: <http://www.ist-world.org> (дата обращения: 3.02.2010).
9. Whilte L.P. Biomass at fuel/ Whilte L.P., Plassnet L.G.-1981.-87 P.

Рецензенты:

Еликбаев Б.К., д.б.н., профессор, профессор, Казахский национальный аграрный университет, г. Алматы;

Тлеукулов А.Т., д.с.-х.н., профессор, профессор, Казахский национальный аграрный университет, г. Алматы.