

## ОЦЕНКА ВЫХОДА БИОГАЗА ПРИ АНАЭРОБНОЙ КОНВЕРСИИ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

*Ю.В. Караева, Е.Е. Олейникова, М.В. Слобожанинова*

*Институт энергетики и перспективных технологий ФИЦ КазНЦ РАН, Казань, Россия*

В работе изучено влияние добавки амаранта красного и биоугля из лузги подсолнечника на выход биогаза при анаэробной ферментации коровьего навоза. Произведено кинетическое описание процесса с помощью модифицированной модели Гомпертца. Предложены варианты реализации рассматриваемого метода сбраживания коровьего навоза с амарантом и биоуглем на примере поселка городского типа Актюбинский (Республика Татарстан).

**Ключевые слова:** биогаз, анаэробная ферментация, коровий навоз, растительное сырье, модифицированная модель Гомпертца

### **Введение**

Глобальное потепление, вызванное усиленным парниковым эффектом, стало основной движущей силой катастрофических событий, происходящих на нашей планете: наводнения, засуха, лесные пожары, таяние ледников. Две основные причины сильного загрязнения окружающей среды парниковыми газами – сжигание ископаемого топлива и образование большого количества отходов различного происхождения (сельскохозяйственные, промышленные, пищевые, твердые бытовые отходы).

Численность населения ежегодно растет, появляется все больше энергоемких отраслей промышленности, а вместе с этим увеличивается потребление ископаемого топлива и количество отходов [4]. Полностью отказаться от данного топлива и предотвратить образование отходов невозможно, поскольку данные процессы прямо или косвенно связаны с удовлетворением потребностей человечества в разных сферах, поэтому важным моментом в улучшении экологической ситуации является полная или частичная замена традиционного топлива возобновляемыми источниками энергии и тепла, а также организация надлежащего способа управления отходами, не способствующего выбросам парниковых газов.

Технология анаэробной ферментации является перспективным решением данных проблем. Биогаз, получаемый в результате данного процесса, представляет собой альтернативное газообразное биотопливо, основными составными компонентами которого являются метан (40 – 75 %) и углекислый газ (15 – 60 %). Благодаря большому содержанию метана биогаз можно использовать для получения тепла, энергии и транспортного топлива. Сырой биогаз при стандартной температуре и давлении, содержащий 60%  $\text{CH}_4$ , обладает теплотворной способностью, равной 21,5 МДж/м<sup>3</sup>, при тех же условиях у чистого  $\text{CH}_4$  теплотворная способность составляет 35,8 МДж/м<sup>3</sup> [1, 5].

Получение биогаза из отходов органического происхождения и дальнейшее его использование для получения тепла и энергии, поможет значительно сократить выбросы парниковых газов и предотвратить полное истощение ископаемых видов топлива. Несмотря на многолетние исследования в этой области, промышленное производство биогаза все еще ограничено, это связано в первую очередь с низкой производительностью, вызванной трудностью в разложении органического сырья [2]. В связи с этим актуальным направлением является разработка методов, позволяющих повысить степень разложения органических отходов и производительность процесса ферментации.

Цель данной работы заключалась в исследовании возможности повышения выхода биогаза при анаэробной ферментации коровьего навоза путем добавления растительного сырья (amarанта красного) и адсорбирующей добавки (биоугля из лузги подсолнечника).

### **Основная часть**

#### *Объекты исследования*

Для проведения исследования в качестве основного перерабатываемого субстрата был выбран коровий навоз, содержащий 19,06 % сухого вещества и 8,72 % зольности. В качестве растительного сырья был выбран амарант красный, поскольку он обладает высокой скоростью фотосинтеза, хорошей адаптацией к любым условиям выращивания, а также является отличным активатором метаногенеза. Амарант, используемый в исследовании, содержал 92,50 % сухого вещества и 13,29 % зольности. В качестве адсорбирующей добавки был выбран биоуголь из лузги подсолнечника, полученный методом медленного пиролиза (температура 550°C). Содержание сухого вещества в биоугле составило 94,80 %, зольности - 10,07 %.

#### *Методика проведения эксперимента*

Эксперимент проводился на лабораторной биогазовой установке периодического действия, работающей в мезофильном температурном режиме (37°C). В состав установки входили 12 метантенков общим объемом 0,4 л, помещенные в водяную баню для обогрева перерабатываемой смеси, и 12 газгольдеров. Измерение объема образующегося биогаза производилось ежедневно с помощью волюметрического метода на протяжении 41 дня.

В ходе эксперимента проводилось четыре параллельных опыта в трех повторах для каждого. Опыт №1 – контрольный опыт, где проводилось моносбраживание коровьего навоза (80 г навоза и 250 г воды). В опыте №2 изучалось влияние добавки биоугля из лузги подсолнечника на анаэробную переработку коровьего навоза (80 г навоза, 0,1 г биоугля и 250 г воды), в опыте №3 – влияние амаранта (64 г навоза, 4 г амаранта и 250 г воды), в опыте №4 – совместное влияние амаранта и биоугля (64 г навоза, 4 г амаранта, 0,1 г биоугля и 250 г воды).

#### **Результаты и обсуждение**

##### *Кинетика получения биогаза*

Для оценки динамики образования биогаза по полученным результатам эксперимента было произведено кинетическое описание процесса с помощью модифицированной модели Гомпертца (1):

$$F(t) = P \exp \left\{ -\exp \left[ \frac{R_{\max} \cdot e}{P} \cdot (\lambda - t) + 1 \right] \right\}, \quad (1)$$

где  $F(t)$  - суммарный выход биогаза в момент времени  $t$ , мл/г органического сухого вещества (oCB);  $P$  – потенциальный выход биогаза мл/г oCB;  $R_{\max}$  – максимальная скорость производства биогаза мл/г oCB·сут;  $\lambda$  – период лаг-фазы, сут;  $e$  - математическая константа.

Кинетические параметры  $P$ ,  $R_{\max}$  и  $\lambda$ , представленные в таблице 1, были определены с помощью компьютерной программы, разработанной в Казанском научном центре РАН (сертификат № 2018662045).

Таблица 1

Кинетические параметры модифицированной модели Гомпертца

Опыт	$P$ , мл/г oCB	$R_{\max}$ , мл/г oCB·сут	$\lambda$ , сут	Ср. кв. погрешность, %	$R_2$	$R_2$ по Пирсону
№1	166,990	9,225	10	8	0,9999	0,9802
№2	173,911	9,689	10	6	1,00	0,9896
№3	197,596	13,050	11	6	1,00	0,9978
№4	247,886	15,230	8	6	1,00	0,9912

Для всех опытов коэффициент детерминации ( $R_2$ ) стремится к единице, а  $R_2$  по Пирсону больше 0,9, следовательно, прогнозируемые значения хорошо согласуются с экспериментальными данными. Также средняя квадратическая погрешность во всех опытах меньше 10 %. Таким образом, модифицированное уравнение Гомпертца подходит для описания кинетики выхода биогаза в данном исследовании, а рассчитанные значения кинетических параметров можно считать достоверными.

Наименьший потенциальный выход биогаза характерен для опыта №1 (контроль). При добавлении биоугля к коровьему навозу выход биогаза увеличивается на 4,14 % (опыт №2), при

добавлении амаранта - на 18,33 % (опыт №3), при совместном добавлении угля и амаранта – на 48,44 % (опыт №4).

Все исследуемые варианты добавки способствуют повышению скорости выхода биогаза. Максимальная скорость газообразования при добавлении биоугля увеличивается незначительно по сравнению с контролем (на 5,03 %), тогда как добавка амаранта вызывает повышение скорости на 41,46 %. Наибольшее увеличение скорости газообразования (на 65,09 %) наблюдалось в опыте № 4. Продолжительность лаг-фазы при добавке биоугля не изменяется, а при добавке амаранта увеличивается на 1 день, однако совместное добавление амаранта и биоугля способствует интенсификации процесса и вызывает сокращение данного параметра на 2 дня по сравнению с контролем.

Таким образом, согласно кинетическому описанию эксперимента наибольшего выхода биогаза при анаэробной ферментации коровьего навоза можно добиться путем одновременного добавления фитомассы амаранта и биоугля из лузги подсолнечника.

#### *Возможности реализации предлагаемого проекта*

Рассмотрим реализацию данного подхода на примере поселка городского типа Актюбинский (Республика Татарстан). В настоящее время там работает биогазовая установка «Актюба», производящая газ для получения электричества (рис. 1).



Рис. 1. Фотография биогазовой установки [6]

На мегаферме находятся около 10 000 коров, поэтому ежедневно образуется около 500 т навоза. Для получения биогаза используется 3 метантенка. Генерируемая мощность составляет 1 МВт, при этом планируется увеличение этого показателя. Рассмотрим 2 варианта переработки отходов.

*1 вариант.* Для достижения уровня генерации в 1,5 МВт необходимо ежедневно перерабатывать: 400 т коровьего навоза, 25 т амаранта, 0,63 т биоугля. Следует отметить, что при этом конструкция биогазовой установки остается неизменной. Имеющаяся в поселении пиролизная установка позволит получать биоуголь непрерывно в течение всего года (без расходов на транспортировку и хранение). Для выращивания амаранта потребуется задействовать всего лишь 10 % от имеющихся площадей земель сельскохозяйственного назначения, а именно, 45,6 га. Наиболее урожайные сорта позволяют получить до 50 ц/га семян. Соответственно, это 228 т в год сырья, которое может использоваться для производства муки или масла. Например, выход цельномолотой амарантовой муки может составлять 92 %, а отрубей – 8 % [3]. Использование амаранта обладает хорошей перспективой, так как мука из его семян является безглютеновым продуктом. Площади посевов под культуру в РФ в настоящее время составляют около 10 тыс. га. Если считать цену муки равной 269 руб., а отрубей 576 руб., то доход от их реализации может составить 66,9 млн. руб. в год.

*2 вариант.* При ежедневной переработке смеси из 500 т коровьего навоза, 31,25 т амаранта и 0,78 т биоугля мощность генерации достигнет 1,9 МВт. Конструкция биогазовой установки

также остается неизменной. Для выращивания амаранта потребуется 57 га земель сельскохозяйственного назначения. Соответственно, урожайные сорта позволят получить до 50 ц/га семян, а это 285 тонн. Доход от реализации амарантовой муки и отрубей может составить 83,7 млн. руб. в год.

### **Выводы**

Проведенное исследование показало, что интенсифицировать процесс анаэробной переработки коровьего навоза и увеличить выход биогаза на 48,44 % можно путем добавления такого растительного сырья, как амарант, и адсорбирующей добавки – биоугля из лузги подсолнечника. Данный метод сбраживания возможно реализовать двумя способами на одной из ферм Республики Татарстан, в результате чего повысится годовой доход от производства.

### **Библиографический список**

1. Chozhavendhan S., Karthigadevi G. et al. Current and prognostic overview on the strategic exploitation of anaerobic digestion and digestate: A review. Environmental Research. 2023. Vol. 216. P. 452 – 468.
2. Jameel M. K, Mustafa M. A. et al. Biogas: Production, properties, applications, economic and challenges: A review. Results in Chemistry. 2024. Vol. 7. P. 215 – 245.
3. Kandrokov R., Bekshokov K., Bekshokova P. Продукты переработки зерна амаранта как источники растительного белка, крахмала, жира и антиоксиданта. Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture. 2024. Том 16. №2. С. 403 – 430.
4. Kundu R., Kunnoth B. et al. Biochar symbiosis in anaerobic digestion to enhance biogas production: A comprehensive review. Journal of Environmental Management. 2023. Vol. 344. P. 135 – 152.
5. Wang Q., Xia C. et al. Biogas generation from biomass as a cleaner alternative towards a circular bioeconomy: Artificial intelligence, challenges, and future insights. Fuel. 2023. Vol. 333. P. 264 – 271.
6. Биогазовая станция «Актуба». URL: <https://transut.ru/projects/aktyuba> (дата обращения: 10.07.2024).