

УДК 620.95; 57.022

ТВЕРДОФАЗНАЯ АНАЭРОБНАЯ ПЕРЕРАБОТКА ОРГАНИЧЕСКОЙ ФРАКЦИИ ТВЕРДЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ, ПРЕДОБРАБОТАННЫХ В АППАРАТЕ ВИХРЕВОГО СЛОЯ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ЧАСТИЦ

Э.Р. Михеева¹, И.В. Катраева²

¹ *Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия*

² *Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, Нижний Новгород, Россия*

Органическая фракция твердых бытовых отходов (ОФ-ТБО) содержит высокую концентрацию биоразлагаемых органических соединений и поэтому является преобладающим возобновляемым ресурсом в общей массе твердых бытовых отходов [1–2]. Благодаря эффективному уменьшению воздействия на окружающую среду, процесс анаэробной переработки выгодно отличается от альтернативных методов утилизации отходов, таких как сжигание, захоронение на полигонах и компостирование [3–5]. Анаэробное сбраживание органических отходов представляет собой комплекс-процесс, включающий гидролиз, ферментативный ацидогенез, ацетогенез и метаногенез. Для оценки пригодности субстратов к анаэробному сбраживанию в мировой практике широко используется тест – «биохимический метановый потенциал». Суть биохимического метанового потенциала сводится к смешиванию образца с микробиологической культурой (инокулят) в определенных условиях, выдерживанию и периодическому измерению объема образующегося биогаза. Наиболее оптимальной для протекания процессов метаногенеза является температура 41⁰С, а выход метана не изменяется при повышении температуры до 48–55⁰С [6]. Традиционно считается, что анаэробное сбраживание протекает в условиях высокой влажности (содержание сухих веществ в реакторе не более 10 %) и используется чаще всего для переработки жидких отходов, таких как сточные воды, животноводческие стоки и стоки скотобойни. Перспективным для переработки сухих и полусухих отходов, в частности пищевых отходов и органической фракции ТКО, является твердофазная анаэробная ферментация. По сравнению с жидкофазной анаэробной ферментацией, твердофазная имеет ряд преимуществ: для протекания процессов требуется реактор меньшего объема; позволяет увеличить количество отхода, перерабатываемого за один цикл; получаемый биопродукт имеет меньшую влажность, что облегчает его дальнейшую переработку (не требуется обезвоживание), образуется больше биогаза и метана [7].

Отличительной особенностью аппаратов вихревого слоя (АВС) от других способов предобработки отходов является низкая энергоемкость. Принцип функционирования АВС достаточно прост. Измельчение осуществляется ферромагнитными рабочими телами цилиндрической формы, помещенными в трубу из немагнитного материала, в котором создается вращающееся магнитное поле. Из-за высокой скорости вращения (3600 об/мин) этого поля начинают быстро двигаться и соударяться рабочие тела, под которые попадают частицы обрабатываемого материала. Наряду с ударными воздействиями на измельченные частицы, в АВС действует также и кавитация, поскольку в жидкой среде при быстром движении твердых тел возникают воздушные пузырьки, способные схлопываться. Совокупность этих двух факторов приводит к тому, что интенсивность измельчения в АВС выше. Кроме того в процессе АВС обработки происходит нагревание образца, что с одной стороны способствует его обеззараживанию, с другой, позволяет его подогреть, снижая тем самым температурный шок инокулята при поступлении в анаэробный реактор.

Целью работы было оценить биохимический метановый потенциал образца ОФ-ТБО до и после 1-ой и 2-х минут обработки в АВС.

Для оценки биохимического метанового потенциала образца ОФ-ТБО использовали в качестве инокулята осадок сточных вод, отобранный на Нижегородской станции аэрации и сброженный в метантенке (рН 7,47; СВ 2,11 ± 0,14 %; оСВ 51,75 ± 0,09 %), а также осадок, сброженный в метантенке и обезвоженный на ленточном фильтр-прессе (СВ 20,70 ± 0,53 % и оСВ 48,32 ± 0,28 %), смешанные в соотношении 1:1.

В представленной работе в качестве образца ОФ-ТБО использовали модельный субстрат, имеющий состав, характерный для пищевых отходов крупных городов России (Таблица 1). Предварительно модельный образец ОФ-ТБО был измельчен вручную (нож, ножницы) и гомогенизирован с помощью ручного перемешивания.

Таблица 1 Усредненный состав пищевых отходов в крупных городах России, %

Состав	Сезон года	
	Лето-осень	Зима-весна
Картофель и его очистки	25–38	38–50
Другие овощи	25–38	9–15
Фрукты	20–25	18–24
Мясо и мясные продукты	3–5	3–5
Мясные кости	3–4	3–4
Рыба и рыбные кости	2–3	2–3
Хлеб и хлебопродукты	2	2
Молочные продукты	0,5	0,5
Яичная скорлупа	0,5	0,5
Непищевые примеси, упаковка	5–8	5–15

Предобработку образца ОФ-ТБО проводили в аппарате вихревого слоя (изготовитель ООО «Регионметтранс», г. Нижний Новгород), который работал в периодическом режиме в течение 1 и 2 минут. Для этого в рабочий стакан из немагнитной стали объемом 500 мл помещали ферромагнитные тела (стержни размером 3,5 x 35 мм, 98 шт.) и 150±180 г. исследуемого образца ОФ-ТБО, затем герметично закрывали стакан завинчивающейся крышкой, вставляли его в рабочую камеру АВС и осуществляли обработку образцов в течение заданного времени (1 минуту или 2 минуты) при U = 180 В, I = 52 А, f = 65 Гц.

Для изучения биохимического потенциала в стеклянные флаконы загружали 80 масс.% инокулята и 20 масс.% образца ОФ-ТБО исходного (образец 1) и обработанного в АВС 1 минуту (образец 2) и 2 минуты (образец 3). Исходные характеристики сбраживаемых образцов были следующие: содержание сухих веществ 23 %, 23,9 %, 26,01 %, зольность образцов 26,85 %, 24,25 %, 22,03 % соответственно для образца 1, образца 2 и образца 3. Анаэробное сбраживание проводили в термофильном режиме (55 ± 1) °С.

На 9 сутки твердофазного анаэробного сбраживания образца ОФ-ТБО начал выделяться биогаз: в образце 1 – 3 мл, в образце 2 – 8 мл, в образце 3 – 10 мл. Динамика выделения биогаза представлена на рисунке 1. Из графика видно, что образование биогаза для необработанного образца ОФ-ТБО происходит интенсивнее, чем для обработанных в АВС.

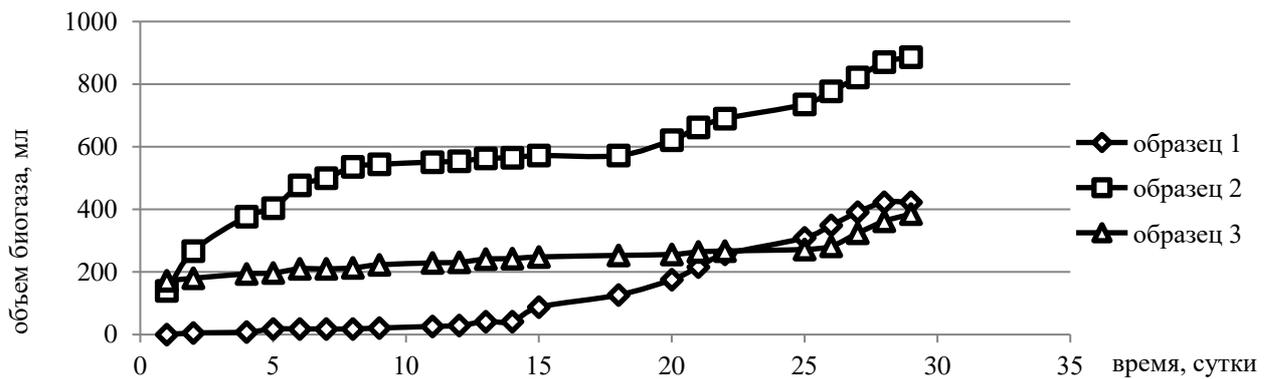


Рисунок 1 – Зависимость суммарного объема выделенного биогаза от времени нахождения систем в анаэробных условиях: образец 1 – контроль, образец 2 – образец ОФ-ТБО, обработанный в АВС 1 минуту, образец 3 – образец ОФ-ТБО, обработанный в АВС 2 минуты

После остановки эксперимента на 29 сутки измерили рН водной вытяжки (1:5): для образца 2 рН $5,8 \pm 0,01$ и образца 3 рН $5,66 \pm 0,01$, тогда как в образце 1 с необработанным образцом ОФ-ТБО рН $6,73 \pm 0,01$. В результате предобработки наблюдали сильное закисление, которое негативно повлияло на метаногенез. Традиционно считается, что для метаногенеза оптимальным является значение рН 6,8–7,4 [8]. Содержание сухих веществ в образце 1 уменьшилось и составило $10,56 \pm 0,16$ %, в образце 2 – $11,80 \pm 0,12$ %, в образце 3 – $21,72 \pm 1,76$ %. Содержание зольности увеличилось в образце 1 на 30 %, тогда как для образцов 2 и образца 3 – на 15 и 5 %. Общее количество биогаза, образовавшегося в результате анаэробного сбраживания составило для образца 1 – 423 мл, для образца 2 – 886 мл и для образца 3 – 385 мл. Forster-Carneir и соавт. (2008) показали, что производство биогаза уменьшалось с увеличением содержания сухих веществ в пищевых отходах от 20 до 30 % при анаэробном сбраживании [7]. Аналогично в работе Amel Abbassi-Guendouz и соавт. было выявлено снижение общего количества биогаза при увеличении содержания сухих веществ от 10 до 25 % в мезофильных условиях [9]. Однако в работе Jing Yi и соавт. (2014) при термофильном анаэробном сбраживании пищевых отходов показано, что чем выше содержание сухих веществ, тем выше объем и скорость образования биогаза [8].

Для эффективного протекания твердофазного процесса анаэробного сбраживания важно соотношение количества инокулята и образца. Так, Sans C. и соавт. рекомендовали вносить не менее 30 % инокулята в сбраживаемую смесь [10], а J-C. Motte и соавт. [11] также утверждают, что в промышленных целях важно соотношение содержания сухих органических веществ в инокуляте (X) к содержанию сухих органических веществ в сбраживаемой смеси (S), которое обычно составляет $S / X = 0,3 \div 0,5$. По их мнению, в лабораторном масштабе это соотношение выше и составляет 2÷6. Однако в литературе встречаются успешно проведенные эксперименты, когда соотношение S/X больше 6 [12], однако при этом наблюдали увеличение фазы адаптации системы (более 30 дней) и продолжительность эксперимента (более 250 дней), чтобы успешно прошел процесс анаэробного сбраживания. В нашем эксперименте соотношение S/X составило около 1,9 для необработанного образца ОФ-ТБО и оно меньше, чем предложено J-C. Motte и соавт. [11] для лабораторных целей. Однако следует учесть, что значение соотношения S/X, предложенное J-C. Motte, применимо для жидкофазной анаэробной ферментации. Согласно полученным Никитиной А.А. [13] результатам, для запуска процесса анаэробного сбраживания осадка сточных вод со сниженной влажностью (92–93 %) во флаконах или лабораторных маломемных биореакторах необходимо, чтобы содержание инокулята в смеси составляло не менее 55 % в расчете на суммарное содержание органических веществ смеси.

Таким образом, наибольший суммарный выход биогаза и биохимический метановый потенциал наблюдали в образце ОФ-ТБО, обработанном в течение 1 минуты в АВС. Наблюдаемое быстрое закисление сбраживаемой массы возможно связано с перегрузкой по органическому веществу процесса твердофазного анаэробного сбраживания образца ОФ-ТБО ($S / X = 1,9$). К тому же учитывая тот факт, что при термофильном режиме анаэробного сбраживания процессы окисления протекают быстро и интенсивно, следует учитывать соотношение S/X и строго его контролировать при анаэробном сбраживании ОФ-ТБО.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18–38–00275.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gunaseelan V.N. Biochemical methane potential of fruits and vegetable solid waste feedstocks. // *Biomass Bioenergy*. 2004. V. 26(4). pp. 389–399.
2. Wang H T, Nie Y F. Municipal solid waste characteristics and management in China // *J Air & Waste Manage Assoc*. 2001. V.51. pp. 251–272.
3. Foresti E. Perspective on anaerobic treatment in developing countries // *Water Sci Technol*. 2001. V. 44. pp. 141–148.
4. McCarty P L. The development of anaerobic treatment and its future // *Water Sci Technol*. 2001. V.44. pp. 149–156.
5. van Lier J B., A. Ahring, B. Kera New perspectives in anaerobic digestion // *Water Sci Technol*. 2001. V. 43. pp. 1–18.
6. Экологическая биотехнология: Пер.с англ. / Под. Ред. К.Ф. Форстера, Д.А.Дж. Вейда. Л.: Химия. 1990, 384 с.
7. T. Forster-Carneiro, M. Pérez, L.I. Romero Influence of total solid and inoculums contents on performance of anaerobic reactors treating food waste // *Bioresource Technology*. 2008 Pages 6994–7002.
8. J. Yi, B. Dong, J. Jin, X. Dai Effect of Increasing Total Solids Contents on Anaerobic Digestion of Food Waste under Mesophilic Conditions: Performance and Microbial Characteristics Analysis // *PLoS One*. 2014. V. 9(7): e102548. 2014. doi.org / 10.1371/journal.pone.0102548.
9. A. Abbassi-Guendouz, D. Brockmann, E. Trably, C. Dumas, J. P. Delgenès, J. P. Steyer, R. Escudié Total solids content drives high solid anaerobic digestion via mass transfer limitation // *Bioresource Technology*. 2012. V. 111. pp. 55–61.
10. Sans, C., Mata-Alvarez, J., Cecchi, F., Pavan, P., Bassetti, A. Acidogenic fermentation of organic urban wastes in a plug-flow reactor under thermophilic conduction. // *Biores. Technol*. 1995. V.54. pp. 105–110.
11. Motte, J. C., Escudié, R., Bernet, N., Delgenès, J. P., Steyer, J. P., & Dumas, C. Dynamic effect of total solid content, low substrate/inoculum ratio and particle size on solid-state anaerobic digestion. // *Bioresource Technology*. 2013. V.144. pp. 141–148. doi : 10.1016/j.biortech.2013.06.057.
12. Abbassi-Guendouz, A., Brockmann, D., Trably, E., Dumas, C., Delgenès, J. P., Steyer, J. P., Escudié, R. Total solids content drives high solid anaerobic digestion via mass transfer limitation. // *Bioresour. Technol*. 2012. V.111. pp. 55–61.
13. Никитина Анна Александровна Биотехнологические и микробиологические аспекты термофильной анаэробной переработки коммунальных органических отходов при высокой нагрузке по субстрату. // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата биологических наук. 2019. Москва. 24 с.