

УДК 66.098.4

М.Г. ЗИНЧЕНКО, канд. техн. наук, доцент, профессор,

В.П. ШАПОРЕВ, докт. техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, **О.А. ТЫНДА**, аспирант

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт» (НТУ «ХПИ»), г. Харьков

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА БИОГАЗА ИЗ ОРГАНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ

Представлены результаты разработки и внедрения биологических технологий для утилизации сточных вод агропромышленных и производственных предприятий. Показаны возможности коммерческого использования биогазовых установок в различных сельскохозяйственных комплексах. Дан анализ основных направлений интенсификации процесса метанового сбраживания органических отходов. Показаны пути дальнейшего совершенствования конструктивного оформления технологии метаногенеза.

Ключевые слова: биосистема, органические отходы, энергетика, экология, метаногенез, UASB-реактор.

© М.Г. Зинченко, В.П. Шапорев, О.А. Тында



Мировой опыт показывает, что для крупномасштабного производства новых видов топлива эффективными являются методы, основанные на использовании биосистем. Среди этих методов достаточно хорошо освоены биологические технологии превращения биомассы в энергоносители в процессах метаногенеза. При этом источниками биомассы могут служить сельскохозяйственные отходы, специально выращенные энергетические культуры, отходы древесины, бытовые отходы и др.

Конечным продуктом метанового брожения является биогаз, в среднем состоящий из 65–70 % метана и 25–30 % диоксида углерода. Теплотворная способность биогаза – 21,5–23,8 МДж/м³. Комплексная обработка, включающая очистку газа от H₂S, осушку, разделение на компоненты, дает возможность получить практически чистый биометан с теплотворной способностью 34–35,8 МДж/м³ [1], который можно использовать как газообразное топливо либо трансформировать в электрическую и тепловую энергию. Сброшенная масса содержит биогенные элементы (азот, фосфор, калий) и обладает свойствами органического удобрения.

Объемы современного производства биогаза изагро-промышленного сырья в Украине можно оценить на уровне 1,6 млн т условного топлива. По данным украинской неправительственной организации «Агентство возобновляемой энергетики», технический потенциал биогаза, получаемого из навоза, составляет 2,3 млрд м³, из сточных вод – 0,33 млрд м³, из свалочного газа – 2,3 млрд м³, что в сумме соответствует 28,2 ТВт·час/год. По оценкам этой организации, производство биогаза в Украине достигнет 10,2 ТВт·час/год в 2030 г. и 17,4 ТВт·час/год – в 2050 г.

В НТУ «ХПИ» длительное время проводятся работы, направленные на интенсификацию и оптимизацию процесса метанового сбраживания, а также разработку соответствующих технических решений. Совместно с ОАО «Сумское НПО им. Фрунзе» (на его подсобном животноводческом хозяйстве) были проведены исследования экспериментальных образцов биореакторов с целью отработки эффективного технологического режима сбраживания.

Факторы, оказывающие существенное влияние на процесс ферментации, и интервалы их варьирования были определены на основе предварительных опытов [2]:

- $z_1 \in \{10; 15\}$, м³/(м³·сут) – доза суточной загрузки – удельный объем сырья, подаваемого в реактор за сутки;
- $z_2 \in \{37; 43\}$, °C – температура в реакторе;
- $z_3 \in \{2; 3\}$, сут⁻¹ – количество перемешиваний реакционной массы в реакторе в течение суток;

- $z_4 \in \{1; 3\}$, сут⁻¹ – частота подачи сырья в реактор за сутки;
- $z_5 \in \{4; 8\}$, % – содержание (массовая доля) сухого вещества в сырье;
- $z_6 \in \{7; 3; 8\}$ – значение водородного показателя pH;
- $z_7 \in \{101; 105\}$, кПа – абсолютное давление в реакторе;
- $z_8 \in \{5; 60\}$, мин – продолжительность каждого перемешивания.

В качестве критерия оптимальности протекания процесса использовался удельный выход биогаза Y_6 (УВБ), выраженный в кубических миллиметрах биогаза на килограмм сухого вещества навоза в секунду, мм³/(кг·с).

Результаты проведенных экспериментов представлены в табл. 1.

По данным экспериментов может быть рекомендован технологический режим с параметрами:

- доза суточной загрузки – $z_1 = 14$ %;
- температура ферментации – $z_2 = 39 \pm 2$ °C;
- количество перемешиваний реакционной массы в метантенке – $z_3 = 3$ сут⁻¹;
- частота загрузки – $z_4 = 3$ сут⁻¹;
- содержание сухого вещества в исходном сырье – $z_5 = 6,6 \pm 1$ %;
- водородный показатель, pH – $z_6 = 7,8 \pm 0,2$;
- абсолютное давление в метантенке – $z_7 = 103 \pm 2$ кПа;
- продолжительность каждого перемешивания массы в метантенке – $z_8 = 20$ минут.

Рекомендуемый технологический режим по температурным условиям является мезофильным, однако доза загрузки (14 %) значительно превышает обычно рекомендуемую для этого режима. Увеличение дробности подачи (частоты загрузки) сырья в метантенк до трех способствует большей стабильности процесса сбраживания, а также большей интенсивности и равномерности газовыделения.

Кроме указанных параметров, на скорость метаногенеза значительно влияют постоянная влажность и однородность подаваемого в метантенк сырья. В этой связи была проведена серия опытов и рекомендованы условия, обеспечивающие прохождение кислотогенной фазы процесса сбраживания в аппарате предварительной подготовки сырья, а именно: выдерживание нативных стоков в течение 8 часов при температуре 39 °C и периодическом перемешивании в течение 20 минут. При этом отмечено увеличение в 4 раза (от 35 до 130 мг·экв/л) концентрации летучих жирных кислот, являющихся главным субстратом для анаэробных метаногенных микроорганизмов. Основная фаза – метаногенная – проходит в метантенке. Реализация интенсивного технологическо-

Таблица 1 – Результаты экспериментов по отработке технологического режима сбраживания

№	Суточная загрузка, %, z ₁	Температура, °C, z ₂	Кол-во перемешиваний, сут ⁻¹ , z ₃	Частота загрузки, сут ⁻¹ , z ₄	Содержание сухого вещества, %, z ₅	Водородный показатель, pH, z ₆	Абсолютное давление, кПа, z ₇	Продолжительность перемешивания, мин, z ₈	Удельный выход биогаза (опыт), м ³ /(кг·с)	Удельный выход биогаза (расчет), м ³ /(кг·с)
7	10	43	2	2	4	7,5	105	60	148	147
4	15	43	2	2	4	7,5	104	5	181	181
9	10	37	2	2	4	7,3	105	5	171	171
2	10	43	2	1	4	7,3	103	5	108	108
5	10	43	3	2	4	7,3	103	5	146	143
1	10	43	2	2	4	7,3	101	5	138	143
8	10	43	2	2	4	8,0	103	5	157	157
3	10	43	2	2	8	7,3	102	5	155	154
6	10	43	2	2	8	8,0	103	5	167	168
Новый основной уровень										
10,1	42	3	2	5	7,5	103	5	167	168	
Шаг варьирования										
	3	5	0	1	2,5	0,5	0	0		
Опыты на векторе-градиенте										
10	13	37	3	3	7,5	8	103	60	204	273
11	16	32	3	4	10	8	103	60	120	378
Оптимальные значения факторов										
	14	39	3	3	6,6	7,8	103	20		210

го режима и эффективных конструктивных решений, как например двухступенчатая технология сбраживания, позволяет сократить общую продолжительность обработки отходов до 8–10 суток, увеличить коэффициент использования оборудования для подготовки сырья к сбраживанию в 2 раза, снизить общую металлоемкость установки на 6 %.

НТУ «ХПИ» совместно с ОАО «Сумское НПО им. Фрунзе» спроектирована и построена в г. Сумы биогазовая установка «БИОГАЗ-301С» для переработки отходов свинофермы на 3000 голов [3].

Основные технико-экономические показатели установки:

- суточный объем перерабатываемых стоков, м³ – 30
- производство (в сутки):
 - биогаза, м³ – 450
 - твердых удобрений, т – 5
 - жидких удобрений, м³ – 25
 - потребляемая мощность электрооборудования, кВт·час/сут – 150
 - объем биореактора, м³ – 310

Утилизация биогаза в котельной позволяет получать горячую воду для нужд фермы.

Опыт эксплуатации установки впоследствии был использован при разработке совместно с НПО «Агробиотехнология» ряда инвестиционных предложений и проектов биогазовых установок. В част-

ности, разработано ТЭО к инвестиционному проекту установки «БИОГАЗ 5-61С» для переработки 50 м³/сут отходов в с. Ново-Мажарово Зачепиловского района Харьковской области. Эксплуатация установки позволит получать 650 м³/сут биогаза, утилизация которого даст возможность полностью обеспечить собственные нужды установки в энергии, а также дополнительно получить товарную энергию: 229 кВт·час/сут электричества и 1,7 Гкал/сут тепловой энергии.



Рисунок 1 – Общий вид установки «БИОГАЗ-301С»



По заказу сельскохозяйственного колледжа провинции Онтарио (Канада) выполнено ТЭО к проекту установки «Биогаз-2-101М» для сбраживания 30 м³/сут смеси свиного и коровьего навоза с переработкой биогаза в электрическую энергию. В проекте предусмотрена дополнительная очистка жидкой фракции сброшенной массы до показателей, позволяющих использовать ее в системе навозоудаления (рН – 7,5–7,6; взвешенные вещества – 75–100 мг/л; ХПК – 30 мг/л; БПК – 21 мг/л).

Для предприятия ОАО «Полтавская птицефабрика» выполнена проектная проработка технических решений для утилизации 336 м³/сут птичьего помета с влажностью 90–91 %. Проектом предусмотрена утилизация биогаза с получением электрической энергии, рекуперация тепла сброшенной массы, а также производство жидких органических удобрений и биогумуса.

Разработан инвестиционный проект «Автономный биоэнергетический центр для производства электрической, тепловой энергии и органических удобрений из отходов сельскохозяйственного производства» для агрокомбината «Слобожанский» (Харьковская обл.) [4]. Реализация данного проекта позволит получить за счет утилизации отходов свинокомплекса 3750 МВт/год электроэнергии, 1711,2 Гкал/год тепловой энергии, 21900 т/год органических удобрений.

К сожалению, по разным причинам (в основном финансового характера) эти проекты до сих пор не реализованы.

Во всех разработанных проектах предусмотрены так называемые реакторы первого поколения со свободноплавающей микрофлорой, предназначенные для переработки субстратов (отходы животноводства, осадки коммунальных сточных вод и т.п.) с высокой концентрацией взвешенных веществ. В них процесс анаэробного сбраживания происходит при постоянном перемешивании среды для обеспечения доступа бактерий к новым порциям сырья и для отвода продуктов сбраживания (при этом вместе со сброшенной массой частично вымывается и свободноплавающая микрофлора). Однако эти реакторы обладают рядом недостатков, главный из которых – низкая концентрация активной микрофлоры внутри реактора, что влечет за собой увеличение объемов метантенков, их стоимости, эксплуатационных расходов и затрат энергии. Все это сдерживает внедрение биореакторов подобного типа в Украине.

В этой связи в дальнейших разработках авторов акцент сделан на интенсификации процесса метаногенеза путем совершенствования оборудования биогазовых установок. Наиболее перспективны в этом плане реакторы второго поколения – UASB-реакторы (реакторы с восходящим потоком через слой анаэробного ила). Это

высокоинтенсивные системы, в которых создаются условия для самоиммобилизации микроорганизмов – образование гранулированной биомассы бактерий с высокой метаногенной активностью. Такие реакторы находят широкое применение за рубежом для очистки высококонцентрированных стоков (ХПК – 1000–10000 мг/л) перерабатывающих производств – спирта, сахара, отходов целлюлозно-бумажной промышленности и др.

Авторами совместно с ОАО «Сумское НПО им. Фрунзе» разработаны технологический регламент и рабочий проект двухстадийной анаэробно-аэробной очистки стоков для Пивненковского сахарного завода (Сумская обл.) с использованием на стадии анаэробного сбраживания UASB-реактора со взвешенно-седиментирующей биомассой, конструкция которого предотвращает вынос биомассы с очищенными стоками и способствует ее грануляции [5]. Вследствие высокой концентрации адаптированной микрофлоры доза загрузки реактора увеличивается на порядок в сравнении с традиционным метантенком первого поколения (до 300 %). Время пребывания сбраживаемой массы в биореакторе уменьшается до 2 сут (в классическом метантенке оно составляет 10–17 сут); требуемый реакционный объем сточных вод для переработки 2400 м³/сут соответственно снижается и составляет 800 м³. Выход биогаза увеличивается с 28–30 м³/м³ отходов до 200 м³/м³ (при концентрации метана в биогазе – 73–81 %). На стадии метанового брожения загрязненность стоков по ХПК снижается лишь на 76–80 %, поэтому для дальнейшей очистки используется аэробная обработка воды. После доочистки в аэротенках состав стоков соответствует показателям качества технической воды: взвешенные вещества – 15–20 мг/дм³, ХПК – 10–15 мг/дм³, БПК – 5–20 мг/дм³, общий азот – 1–10 мг/дм³. Данная установка введена в эксплуатацию в 1996 г.

В настоящее время ведутся исследования, связанные с использованием более совершенных анаэробных реакторов (IC-UASB-реакторов) с системой внутренней циркуляции субстрата, которые сочетают в себе высокую степень перемешивания среды и хорошее удержание биомассы на выходе, что дает возможность использовать меньшие объемы реакторов при более эффективном протекании процесса [6, 7]. В Украине первый такой реактор построен на предприятии ООО «Рубежанский картоннотарный комбинат» для переработки стоков производства картона. Исследование работы установки позволило получить данные о динамике изменения ХПК, удельном выходе биогаза, изменении средних концентраций растворенных веществ и др. Эти данные используются авторами для разработки математической модели IC-UASB-реактора. В основу разработки положен новый подход к

моделированию такого типа реакторов, основанный на линейной диффузионной модели реактора идеального вытеснения, учитывающей удельную активность метаногенных гранул, скорость осаждения, микробиологические характеристики ила, кинетику биотрансформации, массообмен в жидкой, газообразной и твердой средах [8]. В настоящее время ведутся экспериментальные исследования, направленные на уточнение параметров модели [9]. Накопление систематизированных знаний о работе и особенностях эксплуатации IC-реакторов будет способствовать их распространению в Украине.

ВЫВОДЫ

Представленные в статье разработки НТУ «ХПИ» в области технологии и оборудования утилизации сточных вод предприятий сельского хозяйства и пищевой промышленности с получением биогаза свидетельствуют о перспективности метода метанового сбраживания органических отходов с точки зрения использования альтернативных источников энергии. В Украине биоэнергетические установки пока не получили должного развития – их внедрение сдерживается недостатком финансовых средств, слабостью законодательной базы в вопросах защиты окружающей природной среды, отсутствием экономических стимулов развития этого направления.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Пат. 44512 : МПК (2006) В 01 D 53/00. Способ одержання метану та вуглекислого газу з очищеного від домішок біогазу. / Колобродов В.Г., Карнацевич Л.В., Волчок О.И., Хажмуратов М.А. – № 2001053017 ; заявл. 03.05.2001; опубл. 15.02.2002, Бюл. № 2, 2002. – С. 4–28.
2. Зинченко, М.Г. Оптимизация процесса метанового сбраживания отходов животноводческих комплексов. / М.Г. Зинченко, Н.А. Цейтлин, И.В Семененко // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1990. – № 4. – С. 23–24.
3. А. с. № 1587021 СССР : МПК⁶ C 02 F 11/04, 3/28. Установка для получения биогаза / В.П. Шапорев, М.Г. Зинченко,

Наведено результати розробки та впровадження біологічних технологій для утилізації стічних вод агропромислових та виробничих підприємств. Показано можливості комерційного використання біогазових установок у різноманітних сільськогосподарських комплексах. Надано аналіз основних напрямків інтенсифікації процесу метанового зброджування органічних відходів. Указано шляхи подальшого вдосконалення конструктивного оформлення технології метаногенезу.

- Г.А. Ткач. – № 4310315 ; заявл. 29.09.1987 ; опубл. 23.08.1990; Бюл. № 31. – С. 108.
4. Зінченко, М.Г. Автономний біоенергетичний центр для вироблення електричної та теплової енергії й одержання органічних добрив з відходів сільського господарства. Структурна перебудова та екологізація економіки в контексті переходу України до збалансованого розвитку / М.Г. Зінченко, С.А. Кравченко, О.А. Тинда // Матеріали III Українського екологічного конгресу, 10–11 грудня 2009 р. – К : Центр екологічної освіти та інформації, 2009. – 323 с.
 5. Ткач, Г.А. Технологический регламент на опытно-промышленную установку очистки сточных вод ПСЗ производительностью 3,0 тыс. тонн переработки свеклы в сутки / Г.А. Ткач, М.Г. Зинченко, Д.Н. Дрожина. – Х., 1996. – 76 с.
 6. Driessens, W.J.B.M. Novel anaerobic and aerobic process to meet strict effluent plant design requirements. / W.J.B.M. Driessens, L. H.A. Habets, T. Vereijken // Ferment. – 1997. – № 4, Vol. 10. – P. 243–250.
 7. Driessens, W.J.B.M. Compact combined anaerobic and aerobic process for the treatment of industrial effluent. / W.J.B.M. Driessens, P. Yspeert, Y. Yspeert, T. Vereijken // Environmental Forum. Colombia-Canada: Solutions to Environmental Problems in Latin America. May 24–26, 2000. Cartegena de Indias, Colombia. – P. 1–11.
 8. Kalyuzhnyi, S. Novel dispersed plug flow model for UASB reactors focusing on sludge dynamics. / S. Kalyuzhnyi, V. Fedorovich, P.N.L. Lens, // 9th World Congress «Anaerobic Digestion 2001» (Antwerpen, Belgium, 2–6 September, 2001). – P. 123–128.
 9. Тында, О.А. Использование IC-UASB-реакторов для переработки стоков производства картона на ООО «Рубежанский картонно-тарный комбинат» / О.А. Тында, Н.В. Гордеенок, М.Г. Зинченко, В.А. Бударин // Материалы 6-ой международной конференции «Энергия из биомассы» 13–14 сентября 2010 г., г. Киев, Украина. – К : НТЦ «Биомасса», 2010. – 1. электрон. опт. диск (CD-ROM); 12 см. – Систем. требования: Pentium ; 32 Mb RAM ; Windows 95, 98, 2000 XP ; MS Word 97-2000. – Название с контейнера.

Поступила в редакцию 28.10.2010

The results of the development and implementation of biological technologies used for utilization of agro-industrial and industrial wastewaters are presented in this paper. The opportunities for the commercial usage of biogas plants in different agricultural systems are considered. The analysis of the main directions of the anaerobic organic waste treatment intensification is given. The way of the further improvement of constructive solutions for methanogenesis is shown.