

УДК 621.433:662.767.2

С. А. КРАВЧЕНКО, канд. техн. наук

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ БАЛАНС КОМПЛЕКСА ПО ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЮ ОТХОДОВ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА С ПОЛУЧЕНИЕМ БИОГАЗА И ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫХ ОРГАНИЧЕСКИХ УДОБРЕНИЙ

*Проведена оценка энергетического баланса биоэнергетического комплекса для очистки и утилизации навозных стоков крупных сельскохозяйственных предприятий. Установлено, что тепловой и электрической энергии, получаемой при использовании биогаза как моторного топлива для двигателей внутреннего сгорания, достаточно для обеспечения работоспособности биоэнергетического комплекса.*

*Проведена оцінка енергетичного балансу біоенергетичного комплексу з очищення та утилізації гнійних стоків великих сільськогосподарських підприємств. Доведено, що теплової та електричної енергії, отримуваної при використанні біогазу як моторного палива двигунів внутрішнього згорання, достатньо для забезпечення роботоздатності біоенергетичного комплексу.*

### Введение

Разработка и строительство биоэнергетических комплексов, использующих в своей основе технологию анаэробного сбраживания навозных стоков сельскохозяйственных предприятий, широко применяется во многих странах. В результате такой переработки получают биогаз, который можно использовать как моторное топливо для двигателей внутреннего сгорания для выработки тепла и электроэнергии, и высококачественные органические удобрения, которыми являются твёрдая и жидкая фракция продуктов брожения. Кроме того, переработка навозных стоков анаэробным сбраживанием предотвращает загрязнение грунтовых вод, водоёмов и заражение почвы гельминтами и болезнетворными бактериями.

В Украине, на основании статистических данных, также проведена оценка потенциала доступной для получения энергии биомассы [1].

Несмотря на то, что в качестве биомассы для анаэробного сбраживания могут быть использованы любые отходы сельскохозяйственного производства, содержащие органические вещества, и их переработка с использованием данной технологии позволяет организовать безотходное производство продукции больших животноводческих предприятий и птицеферм, широкого распространения в нашей стране биоэнергокомплексы не получили.

Из анализа литературных источников видно, что навозные стоки, существенно отличающиеся по своим характеристикам от промышленных и бытовых сточных вод, требуют дополнительных исследований, доработки существующих технологий и оборудования [2].

### Цель исследования

В данной работе не ставится задача оптимизации процессов получения биогаза и органических удобрений методом анаэробного сбраживания, а также, повышения эффективности использования биогаза в когенерационных установках для выработки тепла и электроэнергии, а предпринимается попытка проанализировать и оценить энергетический баланс крупного комплекса по обеззараживанию отходов сельского хозяйства с получением биогаза и высококачественных органических удобрений. Представлены основные материальные и энергетические расчеты, необходимые для определения основных показателей производительности биоэнергетического комплекса в целом и его отдельного технологического оборудования, выполненные на базе существующих методик и имеющихся опытных данных. Данные расчеты положены в основу разработанного в НТУ «ХПИ» проекта автономного когенерационного комплекса по обеззараживанию отходов сельского хозяйства с получением высококачественных органических удобрений и биогаза, используемого как моторное топливо в двигателях внутреннего сгорания.

имеющихся опытных данных. Данные расчеты положены в основу разработанного в НТУ «ХПИ» проекта автономного когенерационного комплекса по обеззараживанию отходов сельского хозяйства с получением высококачественных органических удобрений и биогаза, используемого как моторное топливо в двигателях внутреннего сгорания.

### Результаты исследования

Из анализа действующих биогазовых комплексов видно, что, в основном, все они работают в мезофильном режиме. Это обусловлено, прежде всего, стремлением минимизировать затраты энергии для обеспечения процесса получения биогаза. Однако, несмотря на такой существенный недостаток, как дополнительный расход энергоресурсов для поддержания процесса, очевидны технологические и эксплуатационные преимущества термофильного режима: происходит не только более быстрое, но и более глубокое преобразование органических веществ, вследствие чего выход биогаза в термофильном режиме выше, чем в мезофильном, а продолжительность брожения биомассы в биореакторе – меньше, что способствует существенному повышению производительности метантенков. Кроме того, считают также, что термофильный режим более устойчив к воздействию различных ингибирующих примесей производственных сточных вод. Положительной стороной термофильного сбраживания является надежная дегельминтизация сброженной массы, т. е. обезвреживание яиц гельминтов, что способствует улучшению санитарно-гигиенических показателей сброженной массы и делает возможным использование ее в качестве удобрения без загрязнения почвы [2, 3].

Поэтому для разработанного в НТУ «ХПИ» автономного когенерационного комплекса по обеззараживанию отходов сельского хозяйства с получением биогаза и высококачественных органических удобрений выбран термофильный режим анаэробного сбраживания.

Все массогабаритные и энергетические расчеты для определения основных рабочих характеристик биоэнергетического комплекса производились исходя из необходимости получения биогаза в количестве, достаточном для обеспечения работы когенерационной установки мощностью 1000 кВт электрической и 1100 кВт тепловой энергии.

За базовые двигатели внутреннего сгорания когенерационной установки, работающей на биогазе, приняты двигатели, выпускаемые Балаковским заводом «Волжский дизель имени Маминых» ГДГ 500/1000, устанавливаемые в транспортабельных блоках газовых электростанций ЭП 500.

Характеристики двигателя:

Мощность – 500 кВт.

Удельный расход топлива (природный газ с теплотой сгорания  $7500 \div 8500$  ккал/м<sup>3</sup>) –  $150 \text{ м}^3/\text{кВт}\cdot\text{ч}$ .

Количество биогаза, необходимое для обеспечения работы выбранных двигателей, определяем следующим образом:

Принимаем среднюю теплоту сгорания природного газа равной  $8000$  ккал/м<sup>3</sup>, а среднюю теплоту сгорания биогаза –  $20\text{--}22$  МДж/м<sup>3</sup> [4] или  $4777\text{--}5255$  ккал/м<sup>3</sup>.

Усреднённый коэффициент перевода количества природного газа в биогаз составит

$$k = 8000/5015 = 1,59521 . \quad (1)$$

Удельный расход биогаза при работе газового мотор-генератора ГДГ 500/1000 составит

$$150 \text{ м}^3/\text{кВт}\cdot\text{ч} \times 1,59521 = 239,28 \sim 240 \text{ м}^3/\text{кВт}\cdot\text{ч} . \quad (2)$$

Расход биогаза в сутки, соответственно, составит

$$240 \text{ м}^3/\text{кВт}\cdot\text{ч} \times 24 \text{ ч.} = 5760 \text{ м}^3/\text{кВт}\cdot\text{сут} . \quad (3)$$

Таким образом, для обеспечения работы двух газовых мотор-генераторов ГДГ 500/1000 необходимо ежедневно вырабатывать не менее  $11520 \text{ м}^3$  биогаза. Полученная величина характеризует производительность биоэнергокомплекса по биогазу.

Исходя из упрощенной формулы расчета теоретического выхода биогаза [4], определяем количество биомассы (влажностью 90 %), необходимое для получения суточной потребности биогаза для газовых мотор-генераторов:

$$Q_6 = 0,192 q_6 \times (1-W/100) \times 1,3 , \quad (4)$$

где  $Q_6$  – количество биогаза;

$q_6$  – количество биомассы;

$W$  – влажность биомассы;

1,3 – коэффициент повышения выхода биогаза при термофильном режиме по сравнению с мезофильным

Отсюда,

$$q_6 = Q_6 / 0,192 \times (1-W/100) \times 1,3 , \quad (5)$$

$$q_6 = 11520 \text{ м}^3 / 0,192 \times (1-90/100) \times 1,3 = 459,615 \text{ м}^3 \sim 460 \text{ т} .$$

То есть, производительность биоэнергокомплекса по перерабатываемым навозным стокам (влажностью 90 %) – 460 т/сутки.

Производительность комплекса по исходному сырью является основным критерием для определения объема метантенков – одной из основных характеристик как с точки зрения капитальных затрат на сооружение комплекса, так и с точки зрения эффективности ведения технологического процесса основного технологического оборудования метанового сбраживания [3]:

$$V = \gamma \times t_{\phi} \times V_n , \quad (6)$$

где  $\gamma$  – коэффициент, учитывающий увеличение объема метантенка за счет газовой полости (значение коэффициента  $\gamma$  обычно принимается равным 1,15...1,2 для установок, где для сбора биогаза используется отдельный газгольдер);

$t_{\phi}$  – продолжительность цикла сбраживания, сутки;

$V_n$  – суточный выход навоза, т.

Рекомендуемая продолжительность сбраживания субстрата для термофильного режима [4] – 5–10 суток.

Принимаем продолжительность сбраживания субстрата 7 суток

$$V = 1,2 \times 7 \text{ сут.} \times 460 \text{ м}^3/\text{сут.} = 3864 \text{ м}^3 .$$

Принимая объем одного метантенка равным 500 м<sup>3</sup>, рассчитываем необходимое их количество:

$$3864 \text{ м}^3 / 500 \text{ м}^3 = 7,728 \sim 8 \text{ шт.} \quad (7)$$

Таким образом, для обеспечения технологического процесса в выбранном режиме необходимо 8 метантенков по 500 м<sup>3</sup> каждый.

На основании описанных методик [3] определим объем шлама и фугата (жидких стоков), получаемых в сутки в результате сбраживания 460 т навозных стоков:

для обезвоженного шлама:

$$V_{\text{ш}} = V_n \times x_0 + V_n \times (x_0/x_1) \quad (8)$$

где  $V_{\text{ш}}$  – суточный выход обезвоженного шлама, т;

$V_n$  – суточный выход навоза, т;

$x_0$  – содержание сухого вещества в исходном сырье, т/т (для исходного сырья влажностью 90 %  $x_0 = 0,1$ );

$V_n$  – содержание жидкой фазы в исходном сырье, т (для исходного сырья влажностью 90% определяется произведением  $V_n \times 0,9$ )

$x_1$  – содержание сухого вещества в обезвоженном шламе, т/т (для свиного навоза, прошедшего разделение на шнековых осадительных центрифугах, влажность обезвоженного шлама составляет 65–70 %, соответственно,  $x_1 = 0,35–0,3$ )

Таким образом, для рассчитываемого комплекса объём обезвоженного шлама составит:

$$V_{ш} = 460 \times 0,1 + 460 \times 0,9 \times (0,1/0,35(0,3)) = 164(184) \text{ т},$$

для фугата:

$$V_c = V_n - V_{ш}, \quad (9)$$

где  $V_c$  – выход жидких стоков, т;

$V_n$  – суточный выход навоза, т;

$V_{ш}$  – суточный выход обезвоженного шлама, т,

$$V_c = 460 - 164(184) = 296(276) \text{ т}.$$

Производительность биоэнергокомплекса по обезвоженному шламу – 164–184 т/сутки.

Производительность биоэнергокомплекса по жидким стокам – 276 – 296 м<sup>3</sup>/сутки.

Производительность биоэнергокомплекса по вырабатываемой энергии определяется мощностью когенерационной установки, положенной, в данном случае, в основу расчетов комплекса, и составляет по электрической энергии 1000 кВт, по тепловой – 1100 кВт.

Основные показатели производительности биоэнергокомплекса отражены в табл. 1.

Таблица 1

Показатели производительности биоэнергокомплекса

№	Наименование показателей	Единицы измерения	Значение
1	Производительность по перерабатываемым навозным стокам (влажностью 90 %)	т/сутки	460
2	Производительность по биогазу	м <sup>3</sup> /сутки	11520
3	Производительность по обезвоженному шламу	т/сутки	164-184
4	Производительность по жидким стокам	м <sup>3</sup> /сутки	276-296
5	Производительность по электрической энергии	кВт	1000
6	Производительность по тепловой энергии	кВт	1100

Работа биоэнергокомплекса связана с потреблением энергии.

Потребность в тепловой энергии складывается из количества теплоты, необходимой для подогрева субстрата от температуры подаваемого в реактор жидкого навоза до температуры брожения, и теплоты, идущей на компенсацию тепловых потерь, вызванных рассеиванием в окружающую среду и теплопроводностью.

Рассмотрим каждую из этих позиций в отдельности.

Учитывая низкую концентрацию твёрдой фракции в составе навозных стоков, принимаем удельные физические параметры этих стоков равными параметрам воды.

Определим количество тепла необходимого для первичного подогрева навозных стоков в ёмкостях предварительного подогрева в сутки:

$$Q_c = C \times m \times (t_2 - t_1), \quad (10)$$

где  $C$  – теплоёмкость жидких стоков;

$m$  – масса жидких стоков;

$(t_2 - t_1)$  – начальная и конечная температура жидких стоков.

Принимаем, что навозные стоки в ёмкости предварительного подогрева поступают с температурой  $t_1 = 18^\circ\text{C}$  и нагреваются до температуры  $t_2 = 54^\circ\text{C}$ .

Отсюда:

$$Q_c = 4,178 \times 460000 \times (54-18) = 69187680 \text{ кДж},$$

что в кВт часах в сутки составит

$$Q_{\text{ч}} = 69187680 / 3600 = 19218,8 \text{ кВт}\cdot\text{ч}. \quad (11)$$

Такой расход тепловой энергии в час может обеспечить источник тепла мощностью 801 кВт.

Для поддержания в метантенках постоянной температуры брожения (для термофильного режима –  $52-54^\circ\text{C}$ ) необходимо обеспечить непрерывный подвод тепла. Для определения его количества предположим, что теплоизоляция метантенков при свободном охлаждении допускает снижение температуры биомассы на  $1^\circ\text{C}$  в сутки, тогда для компенсации потерь требуется тепло в количестве:

$$Q_M = C \times m_1 \times \Delta t. \quad (12)$$

При семисуточном брожении в метантенках одновременно находится объём биомассы, равный

$$m_1 = 460000 \times 7 = 3220000 \text{ кг}, \quad (13)$$

$$Q_M = 4,178 \times 3220000 \times 1 = 13453160 \text{ кДж},$$

что в кВт в сутки составит:

$$Q_M = 13453160 / 3600 = 3736,98 \text{ кВт в сутки}. \quad (14)$$

В час потребуются подвод тепла

$$Q_M = 3736,98 / 24 = 155,71 \text{ кВт}. \quad (15)$$

Таким образом, для поддержания в 8-ми метантенках (объёмом  $500 \text{ м}^3$ ) постоянной температуры, необходимой для обеспечения термофильного режима анаэробного сбраживания, требуется 156 кВт.

От газового двигателя внутреннего сгорания ГДГ 500/1000 при утилизации тепла выхлопных газов и охлаждающей жидкости получаем 550 кВт тепловой энергии.

При работе двух газопоршневых двигателей вырабатывается 1100 кВт тепловой энергии, из которой для предварительного подогрева биомассы и поддержания работы метантенков в термофильном режиме затрачивается 957 кВт (87 % произведенного количества). Остаток – 143 кВт тепловой энергии – может быть использован для бытовых и других производственных нужд.

По предварительному анализу энергопотребления электрического оборудования, для обеспечения технологического процесса биоэнергодомкомплекса а также бытовых условий обслуживающего персонала потребуется около 200 кВт электрической энергии (20 % произведенного количества). Значит, из вырабатываемой двумя газовыми двигателями внутреннего сгорания ГДГ 500/1000 1000 кВт электрической энергии 800 кВт может быть продано как товар.

В табл. 2 сведены данные энергетического баланса биоэнергодомкомплекса.

Таблица 2

## Энергетический баланс биоэнергетического комплекса

№	Наименование показателей	Тепловая энергия	Электрическая энергия
1	Производство энергии, кВт	1100	1000
2	Расход энергии на технологические нужды комплекса		
2.1.	всего, кВт (% от произведенного количества)	957 (87 %)	200 (20 %)
2.2.	в том числе		
	- на подогрев субстрата, кВт (% от произведенного количества)	801 (73 %)	×
	- на компенсацию теплопотерь, кВт (% от произведенного количества)	156 (14 %)	×
3	Товарный остаток, кВт (% от произведенного количества)	143 (13 %)	800 (80 %)

**Выводы**

Несмотря на то, что Украина имеет достаточно большие возможности по использованию энергетического потенциала биомассы, строительство биоэнергетических комплексов по её переработке практически не ведется. Это связано с тем, что в настоящее время не уделяется должного внимания вопросам защиты окружающей среды и полностью отсутствуют какие-либо экономические стимулы в виде субсидирования, освобождения от налогов и т. д.

Показатели производительности, рассчитанные для разработанного Национальным техническим университетом «ХПИ» крупного биоэнергетического комплекса по обеззараживанию отходов сельского хозяйства с получением биогаза и высококачественных органических удобрений, и предварительный анализ энергетического баланса позволяют оценить привлекательность данного проекта.

Затраты тепловой и электрической энергии на обеспечение технологического процесса биоэнергетического комплекса, по предварительному анализу, составляют: – электрической энергии – около 200 кВт; – тепловой энергии – около 957 кВт. Товарная электрическая энергия составляет – 800 кВт, тепловая – 143 кВт.

**Список литературы**

1. Гелетуха Г. Г., Железная Т. А., Тишаев С. В., Кобзарь С. Г. Развитие биоэнергетических технологий в Украине // Экологии и ресурсосбережение. – 2002. – № 3. – С. 3–11.
2. Дубровский В. С., Виестур У. Э. Метановое сбраживание сельскохозяйственных отходов // Рига: Знание, 1988. – 204 с.
3. Семененко И. В. Проектирование биогазовых установок / И. В. Семененко – Сумы: Издательский центр ПФ «МакДен», ИПП «Мария-1» МТД, 1996. – 347 с.
4. ВНТП – АПК -09.06 «Навозоудаление».

### **ENERGY BALANCE OF COMPLEX FOR AGRICULTURAL WASTE DECONTAMINATION WITH BIOGAS PRODUCTION AND OBTAINING OF HIGH-QUALITY ORGANIC FERTILIZERS**

S. A. KRAVCHENKO, Cand. Tech. Sci.

*The estimation of the energy balance of the bioenergetical complex used for purification and utilizing of manure streams from the large agricultural farms was made. It is concluded that using biogas as fuel for internal combustion engines generates enough heat and electrical energy to assure complete functionality of the bioenergetical complex.*

*Поступила в редакцию 10.12.2009*