

Литература

1. Мониторинг работы в природно-климатических условиях Республики Беларусь импортных биогазовых энергетических комплексов: отчет о НИР (заключ.) / РУП «НПЦ НАН Беларуси по мех. с. х.»; рук. темы Н.Ф. Капустин. – Минск, 2008. – 156 с. – № ГР 20082490; зад. 5.18 ГНТП «Агропромкомплекс – возрождение и развитие села».
2. Капустин, Н.Ф. Анализ мониторинга работы биогазовых энергетических комплексов в Беларуси / Н.Ф. Капустин, А.Н. Басаревский, Т.В. Старченко, С.Н. Поникарчик // Механизация и электрификация сельского хозяйства: межвед. тематич. сб. / РУП «Научн.-практ. центр Нац. акад. наук Беларуси по механиз. сельского хоз-ва. – Минск, 2009. – Вып. 43. – С. 117-124.
3. Басаревский, А.Н. Оценка эффективности работы биогазовых энергетических комплексов в Беларуси / А.Н. Басаревский // Научное обеспечение развития агропромышленного комплекса стран Таможенного союза: материалы междунар. науч.-практ. конф., Астана, 8–9 апреля 2010 г. / АО «КазАгроИновация». – Астана, 2010. – С. 209-215.

УДК 63:(620.95:504.064.34)

**Н.Ф. Капустин,
Ю.А. Сунцова, О.А. Дытман**
(РУП «НПЦ НАН Беларуси
по механизации сельского хозяйства»,
г. Минск, Республика Беларусь)

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ
ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ДВУХ
ТИПОВ КОНСТРУКЦИИ
БИОРЕАКТОРОВ БИОГАЗОВОЙ
УСТАНОВКИ**

Введение

Важнейшим этапом процесса проектирования биогазовой установки является выбор конструкции биореактора (ферментера), от которой зависят затраты тепловой энергии на собственное функционирование биогазовой установки. Для объективной оценки энергетической эффективности ферментера в климатических условиях Республики Беларусь необходимо определить потребление тепловой энергии на поддержание температурного режима в его камере.

Методика определения затрат энергии на собственные нужды биогазовой установки

Сравнительный анализ потребности в тепловой энергии на собственные нужды биогазовой установки выполним на примере двух широко используемых и рекомендуемых типов железобетонных конструкций биореакторов.

Наиболее распространена на практике классическая схема производства биогаза с использованием отдельно расположенных ферментера и дображивателя. Каждый из них, например, при объеме 1500 м^3 выполнен в форме цилиндра высотой 6 м и диаметром 18 м (рисунок 119).

Средняя температура окружающей среды в Минской области
 $-5,4^{\circ}\text{C}$ - зимой
 $+17,4^{\circ}\text{C}$ - летом

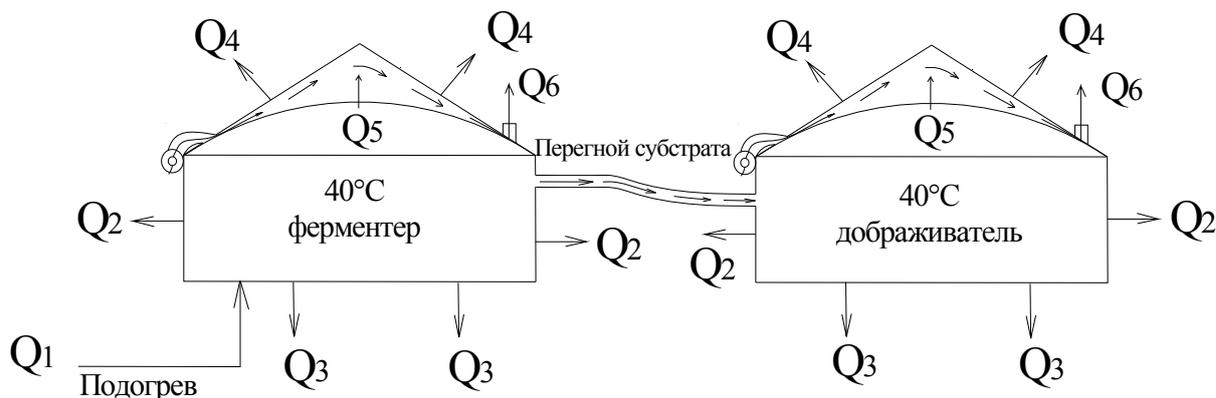


Рисунок 119 – Классическая схема производства биогаза

Второй тип сооружения биореактора представляет собой интегрированную конструкцию с ферментером и дображивателем, объединенными одним газосборником (газгольдером). При объеме такой конструкции, например, 3000 м^3 , ее диаметр составляет 26 м, а высота – 6 м (рисунок 120).

Средняя температура окружающей среды
в Минской области
 $-5,4^{\circ}\text{C}$ - зимой
 $+17,4^{\circ}\text{C}$ - летом

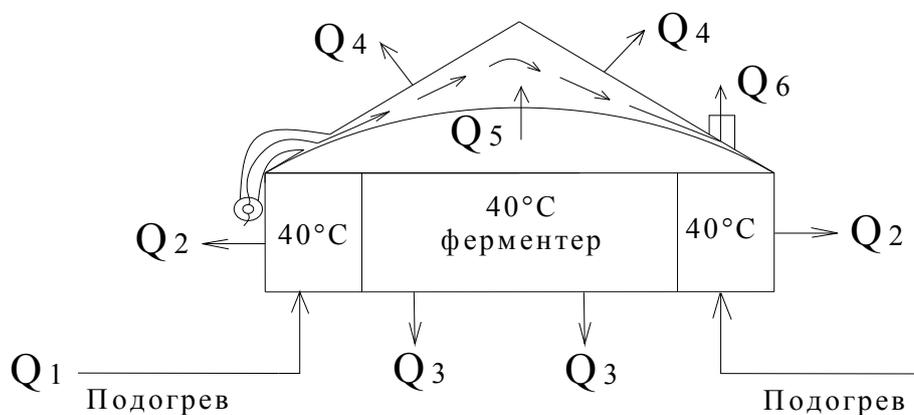


Рисунок 120 – Интегрированная конструкция биореактора биогазовой установки

Каждый час в биогазовые установки данных типов схем поступает 2500 кг органического сырья сельскохозяйственного производства и вырабатывается 170 м^3 биогаза. В камерах биореакторов данных типов поддерживается мезофильный процесс брожения метанобразующих бактерий.

Для проведения расчета были использованы данные климатического мониторинга для Минской области за 2010 г. [1].

В общем виде эквивалентное количество тепловой энергии, затрачиваемое на собственное функционирование биогазовой установки и зависящее от температуры окружающей среды Q ($\text{кВт}\cdot\text{ч}$), можно выразить следующим образом:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4,$$

где Q_1 – энергия, затрачиваемая на подогрев субстрата, $\text{кВт}\cdot\text{ч}$;

Q_2 – потери энергии через стены биореактора, $\text{кВт}\cdot\text{ч}$;

Q_3 – потери энергии через дно биореактора, $\text{кВт}\cdot\text{ч}$;

Q_4 – потери энергии через воздухоопорную крышу биореактора, $\text{кВт}\cdot\text{ч}$.

Чтобы получить необходимую для брожения температуру и по возможности поддерживать ее на постоянном уровне, прежде всего, следует подогревать подаваемый в биореактор субстрат до нужной температуры. Дополнительный подвод тепла необходим для компенсации тепловых потерь.

Количество тепловой энергии, передаваемой от греющего теплоносителя к подогреваемому субстрату, определяется по следующему выражению [2]:

$$Q_1 = m \cdot c \cdot (t_c - t_w),$$

где m – общая масса сбрасываемого сырья, кг ;

c – удельная теплоемкость субстрата, $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$;

t_c – температура сбрасываемого субстрата в биореакторе, $^{\circ}\text{C}$;

t_w – температура загружаемого в биореактор субстрата, $^{\circ}\text{C}$.

В данном расчете сделаем следующие допущения.

1. Температуру субстрата, загружаемого в биореактор зимой, принимаем $t_{w \text{ зимой}} = 0,5^{\circ}\text{C}$.

2. Температуру субстрата, загружаемого в биореактор летом, принимаем $t_{w \text{ летом}} = 21^{\circ}\text{C}$.

3. Принимая во внимание тот факт, что основной составляющей субстрата является вода ($W_{\text{сбр. субстр.}} = 92-94\%$), будем считать, что удельная теплоемкость субстрата равна удельной теплоемкости воды $c = 4,18 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$.

Для определения потери тепловой энергии через стенки, дно и крышу (газгольдер) биореактора рассмотрим его конструктивное устройство.

Стенка биореактора состоит из следующих слоев:

1 слой – железобетон (толщина (δ) 24 см, $\lambda = 1,69 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{K})$);

2 слой – изоляция (пенопласт, толщина 10 см, $\lambda = 0,041 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{K})$);

3 слой – трапецевидная алюминиевая облицовка (толщина 1 см, $\lambda = 221 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{K})$).

Значение теплопроводности (λ , $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{K})$) различных материалов принимаем из соответствующих справочников, например [3].

Сумма изменений температуры в каждом слое составляет полный температурный напор. Из этого соотношения определяется значение теплового потока q , $\text{Вт}/\text{м}^2$:

$$q = \frac{t_f - t_w}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_n}},$$

где t_f – температура сбраживаемого субстрата, °С;

t_w – температура окружающей среды, °С;

α_n – термическое сопротивление теплоотдачи наружной стенки биореактора, $Bm / (m^2 \cdot ^\circ C)$.

Потеря тепла через стенки биореактора определяется по формуле:

$$Q_2 = qF\tau = 2q\pi RH\tau,$$

где F – площадь фигуры (в данном случае цилиндр), m^2 ;

R – радиус основания цилиндра, m ;

H – высота цилиндра, m ;

τ – длительность процесса, $ч$.

Для приближенного расчета сделаем ряд допущений.

1. Стенку биореактора будем считать плоской.

2. Температуру внутренней стенки биореактора принимаем равной температуре сбраживаемого субстрата $t_f = 40^\circ C$.

3. Коэффициент теплоотдачи наружной стенки биореактора принимаем $\alpha_n = 23 Bm / (m^2 \cdot ^\circ C)$ по литературе [3].

Так как плоская поверхность дна биореактора расположена на грунте, то происходит передача теплоты ближайшим его слоям.

Дно биореактора состоит из следующих слоев:

1 слой – железобетон (толщина 24 см, $\lambda = 1,69 Bm / (m \cdot K)$);

2 слой – изоляция (пенопласт, толщина 10 см, $\lambda = 0,041 Bm / (m \cdot K)$);

3 слой – поливинилхлоридная пленка (толщина 2 мм, $\lambda = 0,14 Bm / (m \cdot K)$);

4 слой – щебень (толщина 10 см, $\lambda = 0,11 Bm / (m \cdot K)$).

Значение теплового потока $q (Bm / m^2)$ определяется из выражения:

$$q = \frac{t_f - t_3}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}},$$

где t_f – температура сбраживаемого субстрата, °С;

t_3 – температура земли, °С.

Потеря тепла через дно биореактора определяется по формуле:

$$Q_3 = qF\tau = q\pi R^2\tau,$$

где R – радиус окружности, m ;

F – площадь окружности, m^2 ;

τ – длительность процесса, $ч$.

Делаем допущения:

1. Распределение грунта под дном биореактора равномерное.

2. Температура грунта постоянна и составляет зимой $t_{3 \text{ зимой}} = 3^\circ\text{C}$, а летом $t_{3 \text{ летом}} = 15^\circ\text{C}$.

3. Температура внутренней поверхности дна равна температуре сбраживаемого субстрата $t_f = 40^\circ\text{C}$.

Под крышей биореактора происходит конвективный теплообмен (вынужденная конвекция). Перенос тепла зависит здесь от природы возникновения, режима движения, физических свойств воздуха, а также формы и размеров поверхности ограждающей конструкции.

Крыша биореактора представляет собой огражденный воздухоопорной крышей газгольдер. Газгольдер является необходимым компонентом для эффективной работы биореактора, обеспечивающим сбор газа и способствующим безопасности и надежности всей биогазовой установки. Он имеет форму шарового сегмента и выполнен из поливинилхлоридной пленки толщиной 1 мм ($\lambda = 0,013 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$) [3]. Для поддержания формы и структурной целостности воздухоопорной крыши под крышу газгольдера под давлением из окружающей среды вентилятором подается воздух.

Потери энергии через крышу биореактора Q_4 ($\text{кВт}\cdot\text{ч}$) представляют собой сумму потерь тепловой энергии через газгольдер и воздухоопорную крышу:

$$Q_4 = Q_5 + Q_6,$$

где Q_5 – потери энергии через газгольдер, $\text{кВт}\cdot\text{ч}$;

Q_6 – потери энергии через поток воздуха в воздухоопорной крыше биореактора, $\text{кВт}\cdot\text{ч}$.

Потери тепловой энергии через газгольдер биореактора определяются по формуле [4]:

$$Q_5 = qF\tau = \frac{\pi}{4}q(d^2 + 4h^2)\tau,$$

где F – площадь шарового сегмента, м^2 ;

d – диаметр шара, м ;

h – высота шарового слоя, м ;

τ – длительность процесса, ч .

По закону Ньютона можно найти конвективный тепловой поток q , $\text{Вт}/\text{м}^2$:

$$q = \frac{t_{f1} - t_{f2}}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{1}{\alpha_2}},$$

где t_{f1} – температура биогазовой области, $^\circ\text{C}$;

t_{f2} – температура воздушной области воздухоопорной крыши, $^\circ\text{C}$;

α_1 – коэффициент теплоотдачи с воздухоопорной крыши в окружающую среду, $\text{Вт}/\text{м}^2\cdot^\circ\text{C}$ [4];

α_2 – коэффициент теплоотдачи поверхности газгольдера в воздушную область воздухоопорной крыши ферментера, $\text{Вт}/\text{м}^2\cdot^\circ\text{C}$ [4].

Потери тепловой энергии через поток воздуха в воздухоопорной крыше биореактора определим по выражению[2]:

$$Q_6 = c \cdot m \cdot \Delta t,$$

где c – удельная теплоемкость воздуха, $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$ [5];

m – масса воздуха, кг [5];

Δt – разность конечной и начальной температур воздушной области крыши биореактора, $^{\circ}\text{C}$.

Для предварительного расчета сделаем следующие допущения.

1. Будем считать производительность вентилятора $400 \text{ м}^3/\text{ч}$.
2. Температуру биогазовой области примем 40°C .
3. Удельная теплоемкость воздуха $c = 1,005 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$.
4. Температура воздухоопорной крыши принимается на 10°C выше температуры окружающей среды, следовательно разность конечной и начальной температур воздушной области крыши биореактора составляет 10°C [4].
5. Коэффициент теплоотдачи с воздухоопорной крыши в окружающую среду принимаем $\alpha_1 = 1 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{K})$ [4].
6. Коэффициент теплоотдачи поверхности газгольдера в воздушную область воздухоопорной крыши принимаем $\alpha_2 = 5 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{K})$ [4].
7. Высоту шарового слоя газгольдера для классической схемы производства биогаза примем $h = 4,6 \text{ м}$, а для интегрированной конструкции $h = 6,62 \text{ м}$ [4].

Результаты расчета представлены в таблицах 43 и 44.

Таблица 43 – Затраты тепловой энергии на поддержание температурного режима в биореакторе в зимний период

Тип биореактора	Q	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	
					Q_5	Q_6
<i>кВт·ч</i>						
Классическая схема	153,35	114,75	11,74	5,38	18,8	2,68
Интегрированная конструкция	149,75	114,75	8,47	5,60	19,59	1,34

Таблица 44 – Затраты тепловой энергии на поддержание температурного режима в биореакторе в летний период

Тип биореактора	Q	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	
					Q_5	Q_6
<i>кВт·ч</i>						
Классическая схема	74,04	55,2	5,84	3,62	6,7	2,68
Интегрированная конструкция	71,51	55,2	4,22	3,78	6,97	1,34

На основании проведенного сопоставительного анализа потребности в тепловой энергии на собственные нужды биогазовой установки двух типов конструкции биореакторов можно сделать следующие выводы.

1. Результаты проведенного анализа показали, что основное количество энергии затрачивается на нагрев органического сырья в биореакторе до номинальной температуры и поддержание ее на постоянно заданном уровне. Следует отметить, что в зимний период затраты энергии на подогрев субстрата вдвое выше, чем в летний, и составляют 114,75 и 55,2 *кВт·ч* соответственно.

2. Наблюдаются высокие потери энергии через ограждающие конструкции биореактора. Больше всего тепло теряется через крышу ферментера. Данные виды потерь превышают сумму потерь тепловой энергии через стенки и дно биореактора. Для классической схемы производства биогаза потери тепловой энергии через газгольдер составляют 21,48 *кВт·ч* в зимний и 9,38 *кВт·ч* в летний периоды года, а для интегрированной конструкции биореактора – 20,93 и 8,31 *кВт·ч* соответственно, что превышает сумму потерь тепла через стенки и дно ферментера: для классической схемы в зимний период – 17,12 *кВт·ч* и в летний – 9,46 *кВт·ч*; для интегрированной конструкции – 14,07 и 8 *кВт·ч* в зимний и летний периоды года соответственно. Для уменьшения данных видов потерь особое внимание необходимо уделять изоляции конструкции биореактора, от которой зависит круглогодичная работа биогазовой установки.

3. Подводя итог полученных результатов сравнительного анализа потребности в тепловой энергии биореакторов рассмотренных типов конструкции, необходимо отметить, что более экономичной с точки зрения тепловых потерь в окружающую среду является интегрированная конструкция ферментера биогазовой установки. Однако классическая схема производства биогаза более удобна в эксплуатации.

Заключение

Увеличить выход товарной энергии возможно, уменьшив затраты тепла на собственные нужды на уровне, необходимом для эффективной работы анаэробного ферментера биогазовой установки. Это достижимо путем оптимального выбора значений технологических и конструктивных факторов ферментера с учетом природно-климатических условий Республики Беларусь. От правильного выбора конструкции биореактора зависит эффективность биогазовой установки.

12.08.11

Литература

1. Погода и климат в Минске: климатический мониторинг [Электронный ресурс]. – Минск: Метеорологическая служба, 2010. – Режим доступа: www.pogoda.ru.net. – Дата доступа: 18.06.2011.
2. Удельная теплоемкость // Википедия: энциклопедия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.wikipedia.org. – Дата доступа: 19.06.2011.

3. Строительная теплотехника. Строительные нормы проектирования: ТКП 45–2.04–43–2006 (02250). – Введ. 01.07.2007. – Минск: М-во архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2007. – С. 10–26.
4. KTBL. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft / KTBL. – Darmstadt, 2009. – S. 236
5. Beitz, W. Taschenbuch für den Maschinenbau: 15. Auflage / Beitz Wolfgang, Karl-Heinz Küttner. – Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo: Springer, 1983.

УДК 631.671:620.9

**В.Г. Самосюк, В.О. Китиков,
А.М. Литовский, С.Л. Романов**
(*РУП «НПЦ НАН Беларуси
по механизации сельского хозяйства»,
г. Минск, Республика Беларусь*)

ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА: ТЕПЛОНАСОСНЫЕ СИСТЕМЫ

Министр окружающей среды Германии Н. Рётген (N. Rötgen) [1] заявил, что в 2050 г. почти вся энергия, необходимая стране, будет вырабатываться за счет возобновляемых источников энергии, то есть с помощью гидроэлектростанций, гелиотермических, ветряных, биогазовых систем, использования низкотемпературного тепла земли, воздуха, воды. По-существу, министр экстраполировал тенденцию настоящего времени в будущее – в 2009 г. в Германии доля возобновляемых источников энергии достигла 16,1% [2]. После либерализации энергетического рынка Германии резко возросли цены на электроэнергию. Многие коммуны приняли решение о собственном производстве электроэнергии из возобновляемых источников с целью уменьшить объем закупаемой у энергогигантов энергии на 50%. Правительство Германии поддерживает это направление. Новый тариф на электроэнергию, производимую ветросиловыми установками, будет равен 9,7 евроцентов за кВт·ч, стоимость киловатта электроэнергии, генерируемой на биогазовых комплексах, составит от 13 до 18 евроцентов в зависимости от мощности установки.

В США Акт о возврате капитала (2009 г.) способствовал тому, что Министерство энергетики США значительно увеличило финансовую поддержку компаний, проводящих исследования, развивающих и внедряющих новые технологии в области возобновляемых источников энергии. В 2010 г. федеральное правительство США инвестирует в возобновляемую энергетику 67 млрд долларов в виде грантов, гарантий, займов. Италия за период с 2009 по 2020 гг. планирует инвестировать в возобновляемую энергетику 42 млрд евро.

Основной задачей, поставленной перед Республикой Беларусь в области энергетической безопасности, является достижение к 2015 г. доли собственных энергоресурсов в балансе котельно-печного топлива не менее 28%. Одним из самых перспективных способов снижения энергозатрат для отопления и теплоснабжения объектов, не включенных в систему централизованного теплоснабжения, во всем мире считается применение тепловых насосов.