

## НАУКИ О ЗЕМЛЕ

УДК 697.97

DOI 10.22213/2410-9304-2018-4-154-162

ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ БИОРЕАКТОРА  
В УСЛОВИЯХ СУРОВОГО КЛИМАТА*В. Г. Исаков*, доктор технических наук, профессор, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова*М. В. Свалова*, кандидат технических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова*А. А. Абрамова*, кандидат технических наук, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова*А. М. Непогодин*, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

*На основе математического моделирования тепловых режимов биогазовой установки проведено исследование влияния климатических условий, режимов сбраживания, конструктивных особенностей метантенка, видов используемого субстрата на получение товарного биогаза. Установлено, что круглогодичная работа биогазовой установки в полностью автономном режиме в условиях сурового климата возможна только при объеме метантенка больше некоторого критического объема, определяемого как климатическими условиями, так и видом используемого субстрата, конструкцией установки и теплоизоляции. При объеме меньше критического автономная работа биореактора возможна только в теплое время года. Определена величина термического сопротивления теплоизоляции реактора, при которой возможна автономная круглогодичная работа реактора. При этом мезофильный режим работы реактора предпочтительнее в климатических условиях Удмуртии, если ориентирован на получение биогаза как основного продукта сбраживания и его энергетического использования.*

**Ключевые слова:** биогазовая установка, метантенк, тепловой баланс, климатические условия, режим сбраживания, анализ факторов.

**Введение**

Использование осадков сточных вод с городских очистных сооружений канализации как альтернативных возобновляемых источников тепловой и электрической энергии является одним из важнейших направлений в энергетической стратегии многих стран мира. Особое внимание уделяется развитию технологий получения биогаза, получающегося при утилизации осадков сточных вод (СВ).

Анализ мирового и российского опыта применения биогазовых технологий, существующих биоэнергетических установок и конструкций биореакторов показывает, что большая часть результатов получена для районов с положительными среднегодовыми температурами и неясно, в какой степени они применимы в суровых климатических условиях. Как минимум, просматриваются следующие проблемы, снижающие энергетическую эффективность биогазовой установки из-за наличия месяцев с отрицательной среднемесячной температурой и относительно низкой температурой в остальные месяцы:

- необходимость усиления теплоизоляции реактора для уменьшения потерь тепла;
- сырье должно храниться при положительных температурах для обеспечения возможно-

сти насосной подачи в технологическую линию;

- повышенные затраты энергии на обеспечение рабочей температуры сбраживания субстрата и компенсацию тепловых потерь;
- не все режимы сбраживания могут быть применимы.

Для оценки критичности этих предположений рассмотрим тепловую модель процесса для разных условий его реализации.

Для обеспечения метанового сбраживания в метантенках осадок необходимо подогреть до температуры, при которой происходит брожение, на что используется, как правило, часть произведенного биогаза. В случае если метановое сбраживание отходов происходит для получения биогаза, важно определить то количество производимого биогаза, которое сжигается для поддержания теплового баланса метантенка и той части, которая может быть использована для полезных целей, поскольку этот показатель существенно влияет на рентабельность производства биогаза.

Целью работы является определение оптимальной конструкции и размеров биореакторов, режимов сбраживания, обеспечивающих получение товарного биогаза при минимальных тепловых потерях в условиях Удмуртской Респуб-

лики. Под товарным биогазом будем понимать количество биогаза, полученное при полной автономности биогазовой установки (часть теплоты сгорания метана расходуется на нужды самой установки).

**Описание модели**

Рассмотрим биогазовую установку (рис. 1 [1]), при которой субстрат перед подачей в реактор нагревается до температуры 70 °С с целью уничтожения бактерий в емкости приемника субстрата 2. При этом исходный субстрат (осадок СВ, навоз КРС, канализационные стоки и т. д.) подается из бункера 1 при положительной температуре для обеспечения возможности насосной подачи. Затем из данной емкости

с помощью насоса 3 осадок перекачивается в биореактор 4, где подогревается до температуры анаэробного брожения теплообменником 6 в зависимости от режима сбраживания (при мезофильном режиме – 25–38 °С, оптимум 35–37 °С, используются мезофильные бактерии, при термофильном 45–60 °С, оптимум 55–56 °С, термофильные бактерии). Биогаз под собственным давлением через газовый штуцер и конденсатор для удаления влаги идет в газгольдер 5, откуда подается либо для сжигания в отопительных приборах, либо для производства электрической и тепловой энергии в когенерационной энергоустановке. Твердый остаток накапливается в бункере-отстойнике 8.

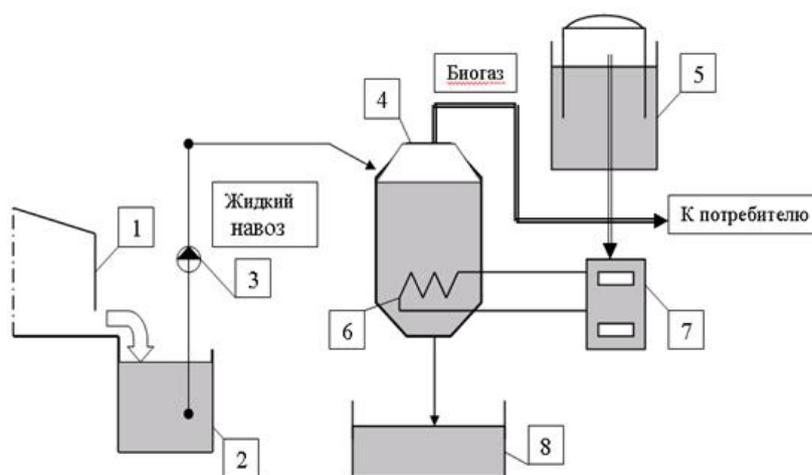


Рис. 1. Принципиальная схема биогазовой установки для переработки жидкого субстрата: 1 – бункер для хранения сырья; 2 – приемник субстрата; 3 – насос; 4 – биореактор-метантенк; 5 – газгольдер; 6 – теплообменник; 7 – котел; 8 – бункер-отстойник

Анализируемый биореактор работает по точной схеме при непрерывном или квазинепрерывном процессе – субстрат загружают в реактор ежедневно, удаляя соответствующий объем шлама. Объем субстрата всегда постоянен и определяется в соответствии с заданным временем пребывания массы в реакторе. Такой вид производства позволяет получить максимальный выход газа при непрерывном процессе газообразования.

Форма биореактора должна обеспечивать максимальный рабочий объем при минимальной поверхности, чтобы сократить материалоемкость и теплотери при строительстве и эксплуатации метантенков. Минимальные затраты материалов и минимальные теплотери достигаются в метантенках сферической и яйцевидной формы, однако при больших объемах метантенков это конструктивно сложно осуществить. Поэтому при строительстве крупных установок используют в основном цилиндриче-

скую форму (отношение диаметра метантенка к его глубине в пределах 1:1–1:0,8) с перекрытием в форме конуса или полусферы в наземном или полуназемном исполнении. Верхняя часть реактора активным субстратом не заполнена, поэтому для теплового расчета форма перекрытия малосущественна (легко учитывается соответствующим увеличением площади поверхности и теплотерью).

Сокращение тепловых потерь биореактора осуществляется применением теплоизоляции общим термическим сопротивлением  $R_0, \text{ м}^2 \text{ }^\circ\text{C}/\text{Вт}$  (рис. 2, б, в). Для целей данной работы конструкция теплоизоляции не рассматривается (покрытие из теплоизоляционного материала, размещение биореактора в изолированном помещении, комбинация методов и т. д.).

Тогда для указанной схемы установки с цилиндрическим реактором минимальной поверхности ( $D = H$ ) суточный тепловой баланс определяется уравнениями табл. 2–3. Формулы для рас-

чета процессов теплоотдачи – стандартные уравнения строительной теплофизики для теплопередачи через ограждение (СНиП 23-02-2003. Тепловая защита зданий (с 01.10.2003 взамен СНиП II-3-79)) или цилиндрическую стенку [2]. Рабо-

чий объем реактора состоит из рабочей области и газового буфера (порядка 20 % объема), следовательно, объем загрузки меньше объема реактора. Для учета данной особенности введен коэффициент полезного использования объема  $k_{и.о.}$

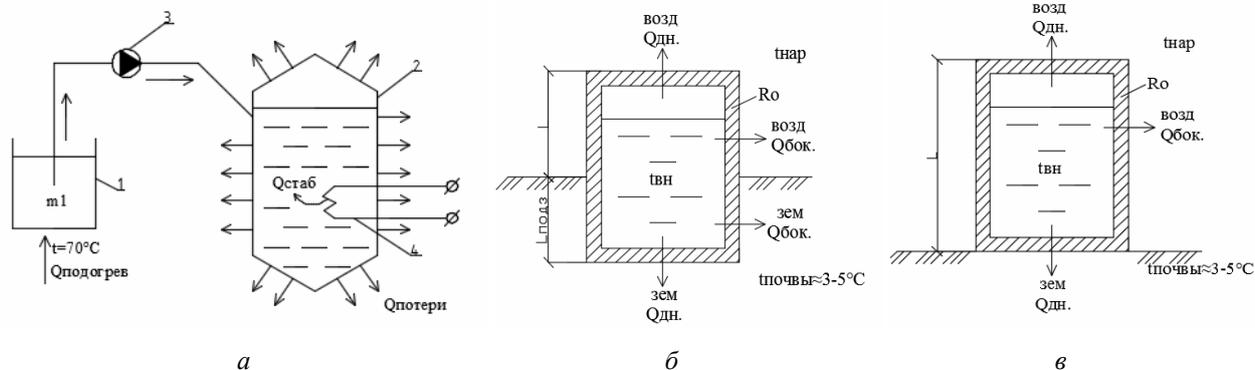


Рис. 2. Схема теплообменных процессов в биогазовой установке: а – в установке в целом; б – расчетная схема теплоотдачи биореактора при полужаглубленной установке; в – расчетная схема теплоотдачи биореактора при наземной установке

Результаты расчета по данной модели представлены на рис. 3–7. Климатические характеристики соответствовали Удмуртской Республике (табл. 1). Температура хранения субстрата при температуре наружного воздуха меньше нуля принималась равной 2 °С, предполагая хранение субстрата в помещении. При температуре наружного воздуха больше нуля температуру хранения субстрата принимаем равной температуре наружного воздуха.

Варьируемые параметры:

- объем метантенка ( $V = 3 \dots 2000 \text{ м}^3$ );
- тип конструкции реактора (надземный или полуподземный с заглублением ниже глубины промерзания ( $1,8 \text{ м}$ )  $l_{\text{подз}} = 2,5 \text{ м}$ );
- термическое сопротивление изоляции биореактора  $R_0$  ( $R_0 = 0,8; 3,0; 10,0 \text{ м}^2\text{°C/Вт}$ );
- тип субстрата (осадок СВ  $B_{\text{уд}} = 29 \text{ г/кг}$  (экспериментально определенный для осадка СВ МУП «Ижводоканал»), свиной навоз  $B_{\text{уд}} = 40 \text{ г/кг}$ , птичий помет  $B_{\text{уд}} = 60 \text{ г/кг}$  [3, 4];

– режим сбраживания (мезофильный  $t_{\text{вн}} = 38 \text{ °C}$  или термофильный  $t_{\text{вн}} = 55 \text{ °C}$ ).

Таблица 1. Климатические характеристики Удмуртской Республики (СП 131.13330.2012 Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99)

Месяц	Среднемесячная температура, °С	Температура хранения субстрата, °С
Январь	-14,6	2
Февраль	-13,3	2
Март	-6,7	2
Апрель	3,3	3,3
Май	11,3	11,3
Июнь	16,4	16,4
Июль	18,5	18,5
Август	16,4	16,4
Сентябрь	10,1	10,1
Октябрь	2,1	2,1
Ноябрь	-5,1	2
Декабрь	-11,6	2

Таблица 2. Суточный тепловой баланс биогазовой установки по схеме рис. 1, Дж/сутки

№ п/п	Тепловые потери	Приток тепла
1	Обеззараживание и дегельментизация субстрата в приемнике $Q_{\text{под}} = M / T \cdot C_{\text{ос}} (70 - t_{\text{бунк}})$	Теплота, поступившая в биореактор с учетом потерь на линии 2-3-4 (см. рис. 1) $Q_{\text{рек}} = M / T \cdot C_{\text{ос}} (70 - t_{\text{вн}}) \cdot k_r$
2	Отвод тепла при удалении шлама $Q_{\text{шл}} = M / T \cdot C_{\text{ос}} \cdot t_{\text{вн}}$	Теплота реакции брожения субстрата $Q_{\text{бр}} = M / T \cdot E_{\text{бр}}$
3	Отвод тепла при раздаче биогаза $Q_{\text{бр}} = M / T \cdot B_{\text{уд}} \cdot C_{\text{бр}} \cdot t_{\text{вн}} \ll Q_{\text{шл}}$	Теплота поддержания теплового баланса метантенка (стабилизации температурного режима в реакторе – подогревом в теплообменнике б) $Q_{\text{стаб}} = Q_{\text{шл}} + Q_{\text{бр}} + Q_{\text{потери}} - Q_{\text{рек}} - Q_{\text{бр}}$

Окончание табл. 2

№ п/п	Тепловые потери	Приток тепла
4	<p>Теплоотдача корпуса метантенка в окружающую среду через стенки и днища</p> $Q_{\text{потери}} = Q_{\text{верх.дн}} + Q_{\text{нижн.дн}} + Q_{\text{надз.цил}} + Q_{\text{подз.цил}}$ <p>где</p> $Q_{\text{верхн.дн}} = \frac{n \cdot (t_{\text{вн}} - t_{\text{нар}})}{R_0} \cdot S_{\text{дн}};$ $Q_{\text{нижн.дн}} = \frac{n \cdot (t_{\text{вн}} - t_{\text{почвы}})}{R_0} \cdot S_{\text{дн}};$ $Q_{\text{надз.цил}} = \frac{n \cdot \pi \cdot l \cdot (t_{\text{вн}} - t_{\text{нар}})}{\frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_{\text{нар}}}{d_{\text{вн}}}};$ $Q_{\text{подз.цил}} = \frac{n \cdot \pi \cdot l_{\text{подз}} \cdot (t_{\text{вн}} - t_{\text{ср}})}{\frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_{\text{нар}}}{d_{\text{вн}}}}$	
<p><b>Общий тепловой баланс биореактора</b></p> $Q_{\text{шл}} + Q_{\text{бг}} + Q_{\text{потери}} = Q_{\text{рек}} + Q_{\text{бр}} + Q_{\text{стаб}}$		

Таблица 3. Энергетические характеристики биогазовой установки по схеме рис. 1

№ п/п	Характеристика
1	<p>Суточное количество биогаза, получаемого в реакторе, кг:</p> $m_{\text{бг}} = M / T \cdot V_{\text{уд}} \cdot k_{\text{ио}}$
2	<p>Суточное количество теплоты от сгорания биогаза, Дж/сутки:</p> $Q_{\text{бг}} = E_{\text{бг}} \cdot m_{\text{бг}}$
3	<p>Суточные затраты теплоты на функционирование биогазовой установки, Дж/сутки:</p> $Q_{\text{затр}} = Q_{\text{стаб}} + Q_{\text{пол}}$
4	<p>Количество теплоты на внешние цели (теплота сгорания товарного биогаза), Дж/сутки:</p> $Q_{\text{пол}} = Q_{\text{бг}} - Q_{\text{затр}}$
5	<p>Количество товарного биогаза, кг (м<sup>3</sup>):</p> $m_{\text{пол}} = Q_{\text{пол}} / E_{\text{бг}}; V_{\text{пол}} = m_{\text{пол}} / \rho_{\text{бг}}$

Обозначения в табл. 2 и 3:

*M* – масса субстрата, загружаемого в метантенк, кг/цикл;

*T* – продолжительность цикла брожения субстрата, сут;

*C*<sub>ос</sub>, *C*<sub>бг</sub> – удельные теплоемкости субстрата и биогаза соответственно, Дж/(кг · °С);

70 – температура преднагрева, °С;

*t*<sub>бунк</sub> – температура биомассы в бункере 2 (см. рис. 1), °С.

*t*<sub>вн</sub> – температура внутри реактора (температура брожения субстрата), °С;

*t*<sub>нар</sub> – температура окружающей среды (воздуха), °С;

*t*<sub>почвы</sub> – температура почвы, °С;

$t_{\text{ср}} = \frac{t_{\text{нар}} - t_{\text{почвы}}}{2}$  – средняя температура почвы

по высоте подземной части биореактора;

*λ* – расчетный коэффициент теплопроводности ограждения, Вт/(м · °С);

*l*, *l*<sub>подз</sub>, *L* – высоты, соответственно, наземной и подземной части реактора при полузаглубленной установке; общая высота реактора при наземной установке (см. рис. 2, б, в);

*d*<sub>нар</sub>, *d*<sub>вн</sub> – соответственно наружный и внутренний диаметр метантенка, м;

*Q*<sub>шл</sub> – потери теплоты при удалении шлама из реактора, Дж/сутки;

*Q*<sub>пол</sub> – потери теплоты на нагревание субстрата до температуры брожения, Дж/сутки;

*Q*<sub>потери</sub> – потери энергии в окружающую среду, Дж/сутки;

*Q*<sub>верх.дн</sub>; *Q*<sub>нижн.дн</sub>; *Q*<sub>надз.цил</sub>; *Q*<sub>подз.цил</sub> – потери тепла в окружающую среду через поверхность верхнего днища; нижнего днища; боковую поверхность наземной части цилиндра; боковую поверхность подземной части цилиндра соответственно, Дж/сутки;

$Q_{рек}$  – рекуперация тепла в реакторе, Дж/сутки;

$Q_{бр}$  – количество теплоты, образующееся при брожении субстрата, Дж/сутки;

$Q_{стаб}$  – суточные затраты теплоты для поддержания теплового баланса метантенка, Дж/сутки;

$R_0$  – термическое сопротивление ограждения,  $м^2\text{°C/Вт}$

$S_{дн}$  – площадь поверхности верхнего и нижнего днища метантенка,  $м^2$ ;

$n$  – коэффициент, принимаемый в зависимости от положения наружной поверхности ограждающих конструкций по отношению к наружному воздуху по табл. 3\* [5] – для горизонтальной поверхности в воздухе 0,9; для горизонтальной поверхности в почве 0,75; для вертикальной поверхности 1,0;  $k_r$  – коэффициент рекуперации тепла;

$k_{и.о}$  – коэффициент использования объема реактора;

$V_{уд}$  – удельный выход биогаза на 1 кг субстрата, кг/кг;

$E_{бг}$  – теплотворная способность биогаза, Дж/кг газа;

$m_{бг}$  – суточное количество биогаза, получаемого в реакторе, кг;

$Q_{бг}$  – суточное количество теплоты от сгорания биогаза, Дж/сутки;

$Q_{затр}$  – суточные затраты теплоты на функционирование биогазовой установки, Дж/сутки;

$Q_{пол}$  – теплота сгорания товарного биогаза), Дж/сутки;

$m_{пол}$  – суточное количество товарного биогаза реакторе, кг;

$V_{пол}$  – суточный выход товарного биогаза реакторе,  $м^3$ ;

$\rho_{бг}$  – плотность биогаза,  $кг/м^3$ .

Теплотворная способность биогаза принималась  $18860 \text{ кДж/м}^3$  (минимальная из  $18860\text{--}26400 \text{ кДж/м}^3$  [5]), тепловой эффект реакции брожения субстрата в реакторе  $10560 \text{ Дж/кг}$  газа [6], коэффициент рекуперации тепла  $k_r = 0,95$  (5 % тепловых потерь на линии 2-3-4), коэффициент использования объема реактора  $k_{и.о} = 0,8$ .

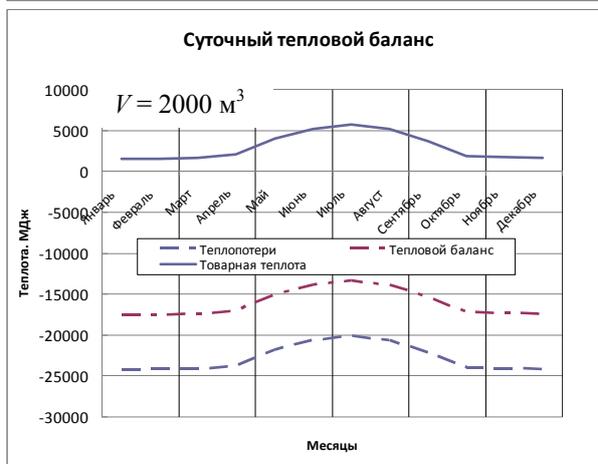
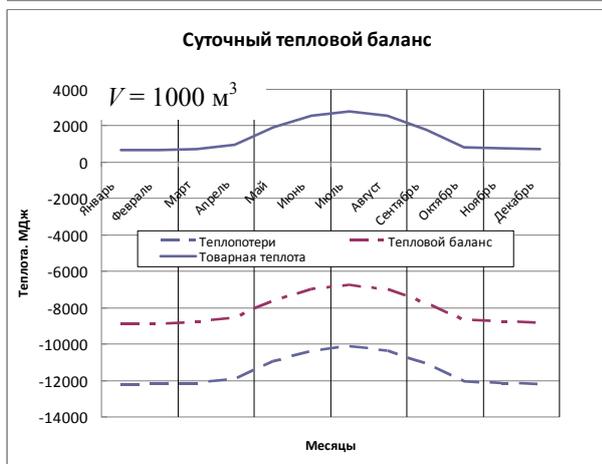
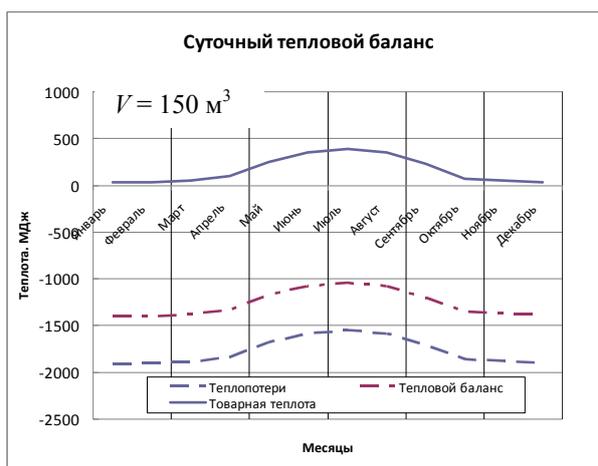
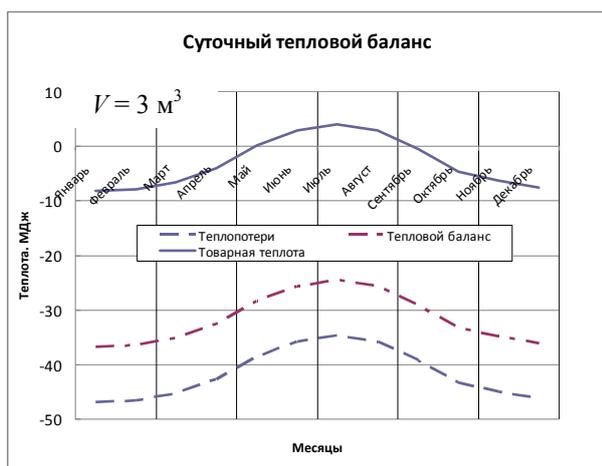


Рис. 3. Зависимость теплоты сгорания товарного биогаза от объема метантенка и времени года (осадки СВ, наземная установка метантенка,  $R_0 = 3,0 \text{ м}^2\text{°C/Вт}$ )

### Анализ результатов

Из рис. 3–7 видно, что работа биогазовой установки в полностью автономном режиме в условиях сурового климата возможна круглый год только при объеме метантенка больше некоторого критического объема, определяемого как климатическими условиями, так и видом используемого субстрата, конструкцией установки и теплоизоляции. Так, при использовании в качестве сырья относительно неэффективного

осадка сточных вод ( $B_{уд} = 29$  г/кг) минимальный необходимый объем биореактора составил порядка  $85 \text{ м}^3$  при наземной установке реактора и порядка  $115 \text{ м}^3$  при полузаглубленной. Для птичьего помета ( $B_{уд} = 60$  г/кг) критический объем составляет только  $2,5 \text{ м}^3$  как при наземной установке, так и при полузаглубленной. При объеме меньше критического автономная работа биореактора возможна только в теплое время года (см. рис. 3–4).

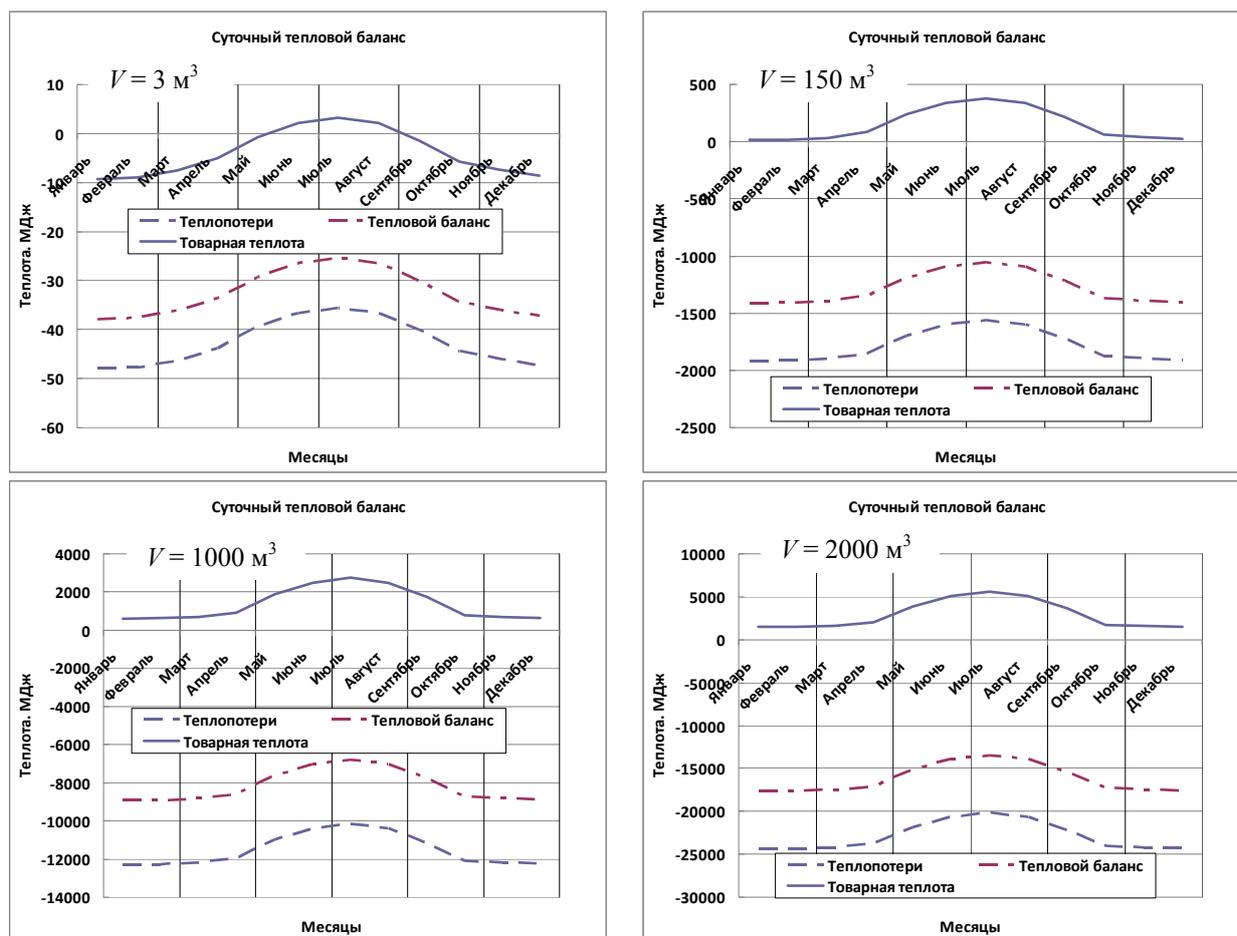
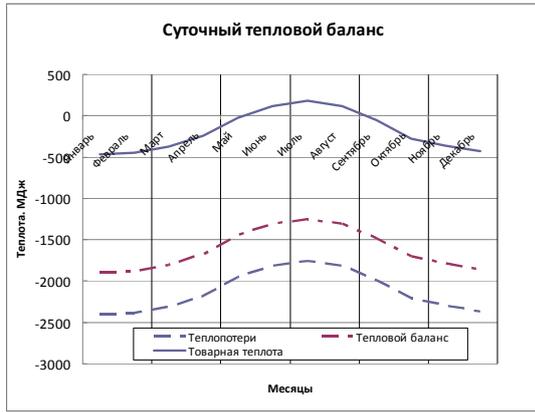


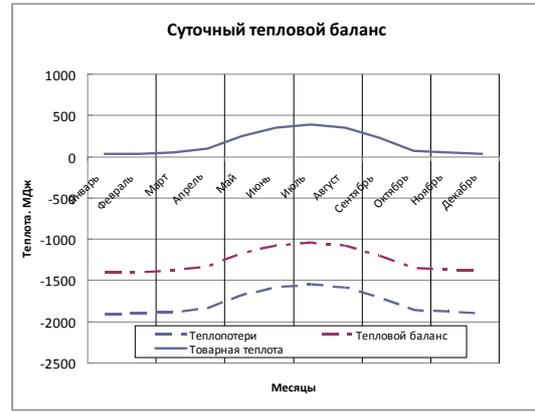
Рис. 4. Зависимость теплоты сгорания товарного биогаза от объема метантенка и времени года (осадки СВ, полузаглубленная установка метантенка,  $R_0 = 3,0 \text{ м}^2\text{°C/Вт}$ )

При заглубленном реакторе в зимние месяцы теплопотери меньше, чем при наземном реакторе. В летние же месяцы наземный реактор выгоднее, так как теплопотери будут меньше, чем в заглубленном. Однако суммарный годовой выход товарного биогаза от этого практически не меняется (разница менее 1%), что находится в пределах погрешности математической модели. Возможно, при полностью подземном расположении метантенка, особенно для реактора малого объема, разница будет более существенной.

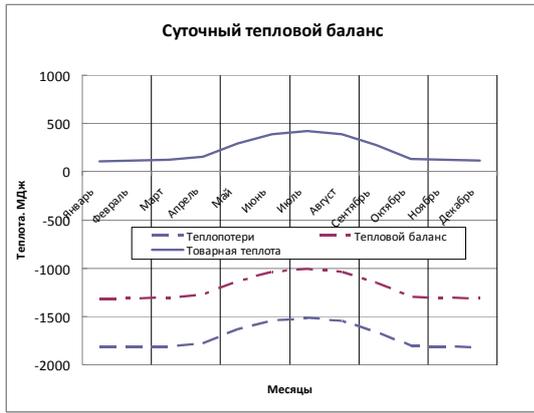
Увеличение величины теплоизоляции биореактора резко увеличивает энергетическую эффективность биореактора в холодное время только при очень больших значениях  $R_0$  ( $R_0 = 10,0 \text{ м}^2 \text{°C /Вт}$  соответствует слою пенопласта толщиной 0,5 м), однако при  $R_0 < 1 \text{ м}^2 \text{°C /Вт}$  добиться полностью автономной круглогодичной работы биогазовой установки подобной схемы в условиях Удмуртской Республики практически невозможно для реакторов малых и средних объемов, работающих на сырье с низким выходом биогаза.



a

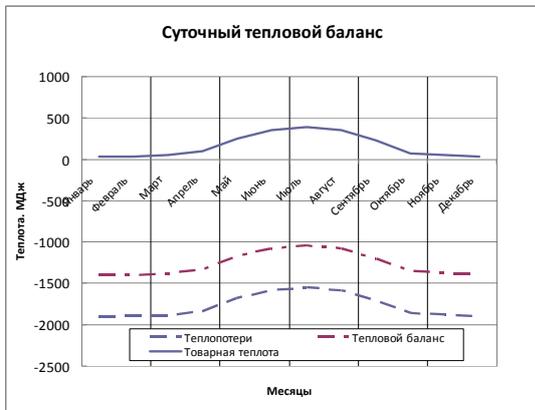


б

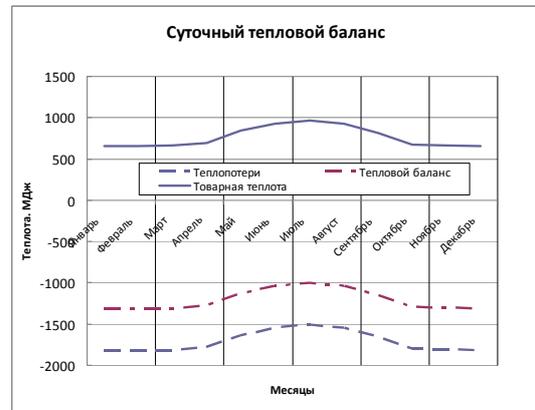


в

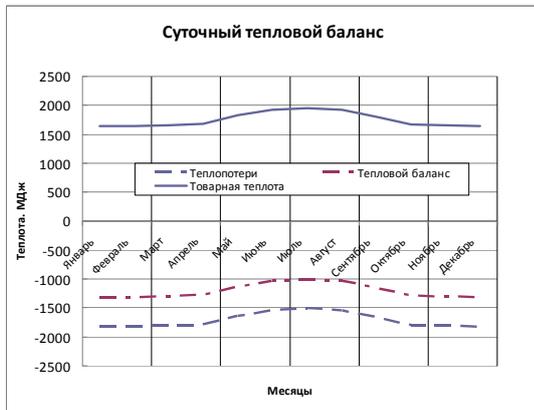
Рис. 5. Зависимость теплоты сгорания товарного биогаза от термического сопротивления теплоизоляции (осадки СВ, наземная установка метантенка,  $R_0 = 3,0 \text{ м}^2 \text{ °C /Вт}$ ,  $V=150 \text{ м}^3$ ): а –  $R_0 = 0,8 \text{ м}^2 \text{ °C /Вт}$ ; б –  $R_0 = 3,0 \text{ м}^2 \text{ °C /Вт}$ ; в –  $R_0 = 10,0 \text{ м}^2 \text{ °C /Вт}$



a

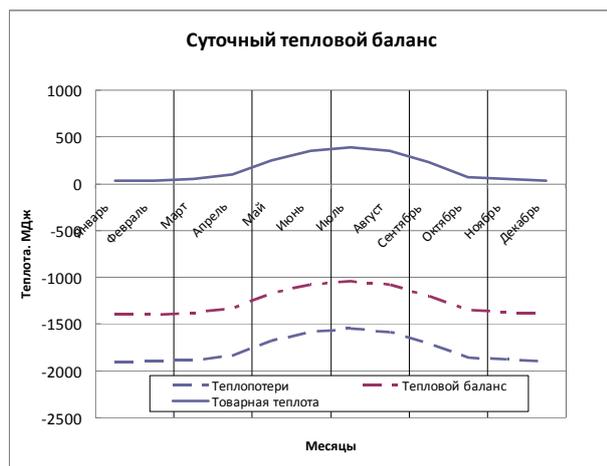


б

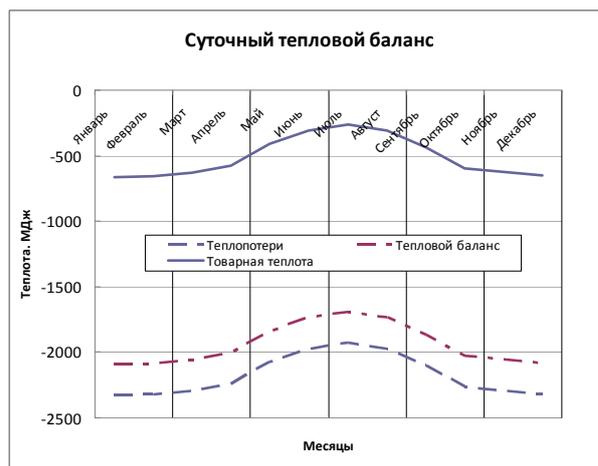


в

Рис. 6. Зависимость теплоты сгорания товарного биогаза от вида субстрата (наземная установка метантенка,  $V=150 \text{ м}^3$ ): а – осадок СВ; б – свиной навоз; в – птичий помет



а



б

Рис. 7. Зависимость теплоты сгорания товарного биогаза от температурного режима сбраживания (осадки СВ, наземная установка метантенка,  $V=150 \text{ м}^3$ ): а – мезофильный режим; б – термофильный режим

В летнее время термическое сопротивление теплоизоляционного слоя мало влияет на выход товарного биогаза, так как основные затраты тепла в данной схеме биореактора идут на подогрев субстрата в приемнике с целью его обеззараживания и дегельментизации.

Видимо, мезофильный режим более рационален в климатических условиях Удмуртии, если ориентирован на получение биогаза как основного продукта сбраживания и его энергетическое использование. Но при наличии сырья с высоким выходом газа не исключается возможность применения термофильного режима или двухфазного термофильно-мезофильного сбраживания, сочетающего преимущества этих двух режимов.

**Выводы**

1. Анализ мирового и российского опыта применения биогазовых технологий, существующих биоэнергетических установок и конструкций биореакторов показал, что большая часть результатов получена для районов с положительными температурами, и неясно, применимы ли они для климатических условий Удмуртской Республики. Для ответа на этот вопрос была составлена тепловая модель биогазовой установки и проведено численное исследование влияния климатических условий, режимов сбраживания, конструктивных особенностей метантенка, видов используемого субстрата на получение товарного биогаза.

2. Круглогодичная работа биогазовой установки в полностью автономном режиме в условиях сурового климата возможна только при объеме метантенка больше некоторого критического объема, определяемого как климатическими условиями, так и видом используемого

субстрата, конструкцией установки и теплоизоляции. При объеме меньше критического автономная работа биореактора возможна только в теплое время года.

3. Суммарный годовой выход товарного биогаза практически не зависит от конструкции реактора – наземный или полузаглубленный, что объясняется перераспределением тепловых потерь по временам года при постоянном режиме работы метантенка.

4. При термическом сопротивлении теплоизоляции реактора  $R_0 < 1 \text{ м}^2 \text{ °C /Вт}$  добиться полностью автономной круглогодичной работы рассматриваемой биогазовой установки в условиях Удмуртской Республики практически невозможно для реакторов малых и средних объемов, работающих на сырье с низким выходом биогаза.

5. Мезофильный режим более рационален в климатических условиях Удмуртии, если ориентирован на получение биогаза как основного продукта сбраживания и его энергетическое использование. При наличии сырья с высоким выходом газа не исключается возможность применения термофильного или двухфазного термофильно-мезофильного сбраживания.

**Библиографические ссылки**

1. Возможность внедрения на птицефабрике инновационной технологии получения энергии и тепла. Биогазовая установка. [Электронный ресурс]. URL: [https://studbooks.net/1233496/agropromyshlennost/biogazovaya\\_ustanovka](https://studbooks.net/1233496/agropromyshlennost/biogazovaya_ustanovka) (дата обращения: 14.09.2018).
2. Теплотехника : учеб. для вузов / В. Н. Луканин, М. Г. Шатров, Г. М. Камфер [и др.] ; под ред. В. Н. Луканина. 3-е изд., испр. М. : Высш. шк., 2002.
3. Северилов П. Биогаз для чайников [Электронный ресурс] // ООО «Стройкомфортсервис 2000».

URL: [http://www.betontrans.ru/construction/biogas\\_1.htm](http://www.betontrans.ru/construction/biogas_1.htm) (дата обращения 12.10.2018).

4. *Травников Г. Б.* Производство биогаза из отходов лесной и перерабатывающей промышленности [Электронный ресурс]. URL: [http://www.invest.kirovreg.ru/invest/innov\\_politic/innov\\_projects/biogas.php](http://www.invest.kirovreg.ru/invest/innov_politic/innov_projects/biogas.php) (дата обращения 20.09.2018).

5. *Баадер В.* Биогаз: теория и практика / В. Баадер, Е. Доне, Бренндерфер ; пер. с нем. и предисловие М. И. Серебряного. М. : Колос, 1982. 148 с. : ил.

6. *Игнатов Д. В.* Математическое моделирование периодического процесса анаэробного сбраживания субстратов : дис. ... канд. техн. наук. Воронеж, 2002.

### References

1. *Vozmozhnost' vnedreniya na pitsefabrike innovatsionnoi tekhnologii polucheniya energii i tepla. Biogazovaya ustanovka* [The possibility of introducing at the poultry farm an innovative technology for producing energy and heat. Biogas plant] (in Russ.). Available at:

[https://studbooks.net/1233496/agropromyshlennost/biogazovaya\\_ustanovka](https://studbooks.net/1233496/agropromyshlennost/biogazovaya_ustanovka) (accessed 14.09.2018) (in Russ.).

3. *Lukanin V.N., Shatrov M.G., Kamfer G.M. Teplotekhnika* [Heat engineering]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2002 (in Russ.).

3. *Severilov P. Biogaz dlya chainikov* [Biogas for tea-pots] (in Russ.). Available at: [http://www.betontrans.ru/construction/biogas\\_1.htm](http://www.betontrans.ru/construction/biogas_1.htm) (accessed 12.10.2018).

4. *Travnikov G.B. Proizvodstvo biogaza iz otkhodov lesnoi i pererabatyvayushchei promyshlennosti* [Production of biogas from waste of the forest and processing industries] (in Russ.). Available at [http://www.invest.kirovreg.ru/invest/innov\\_politic/innov\\_projects/biogas.php](http://www.invest.kirovreg.ru/invest/innov_politic/innov_projects/biogas.php) (accessed 20.09.2018).

5. *Baader V. Biogaz: teoriya i praktika* [Biogas: Theory and Practice]. Moscow, Kolos Publ., 1982, 148 p. (in Russ.).

6. *Ignatov D.V. Matematicheskoe modelirovanie periodicheskogo protsessa anaerobnogo sbrzhivaniya substratov* [Mathematical modeling of the periodic process of anaerobic digestion of substrates]. PhD thesis. Voronezh, 2002 (in Russ.).

\*\*\*

### Heat Balance and Energy Efficiency of Bioreactor in Severe Climate Conditions

*V. G. Isakov*, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

*M. V. Svalova*, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

*A. A. Abramova*, PhD in Engineering, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

*A. M. Nepogodin*, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

*On the basis of mathematical modeling of the thermal conditions of a biogas plant, a study was made of the influence of climatic conditions, fermentation regimes, design features of the bioreactor, and the types of substrate used to produce commercial biogas. It has been established that year-round operation of a biogas plant in a fully autonomous mode in severe climate conditions is possible only when the volume of the digester is greater than a certain critical volume, determined by climatic conditions, and the type of substrate used, the plant design and thermal insulation. With a volume less than critical, autonomous operation of a bioreactor is possible only in the warm season. The value of thermal resistance of the reactor thermal insulation is determined, at which autonomous year-round operation of the reactor is possible. At the same time, the mesophilic mode of operation of the reactor is preferable in climatic conditions of the Udmurt Republic, if it is focused on obtaining biogas, as the main product of fermentation, and its energy use.*

**Keywords:** biogas plant, bioreactor, heat balance, climatic conditions, fermentation mode, analysis of factors.

Получено: 19.11.18