

# Исследование параметров биогазовой установки для переработки отходов животноводства

**В.В. Васенев**, аспирант, **С.К. Шерьязов**, д.т.н., профессор, ФГБОУ ВО Южно-Уральский ГАУ

Развитие сельского хозяйства потребует больше энергии для производства качественной продукции, даже в условиях энергосбережения и повышения энергоэффективности технологических процессов. Для энергообеспечения потребителей традиционно используются энергетические ресурсы на основе органических видов топлива, из-за роста цен на которые требуется поиск путей по снижению затрат на энергоснабжение. Для замещения органических видов топлива широко используются нетрадиционные и возобновляемые источники энергии солнца, ветра, земли, воды и биологической массы. При этом отходы животноводства, как биологическая масса, могут конвертироваться в технически удобные источники энергии. При биологической конверсии конечными продуктами являются биогаз и органические удобрения [1–3].

Переработка навоза животных является важным процессом в сельскохозяйственном производстве. Для этого требуется разработка технологии и устройства с оптимальными параметрами [4, 5].

Для утилизации отходов животноводства на основе биогазовых установок необходимы большие затраты, поскольку сам процесс переработки биомассы – энергоёмкий. Недостаточные исследования по снижению затрат путём оптимизации параметров и режимов работы биогазовой установки сдерживают развитие биогазовых технологий. В связи с этим изучение методов эффективной переработки биомассы на основе биогазовой установки является актуальной задачей [6–9].

**Материал и методы исследования.** Биогазовые установки представляют из себя комплекс оборудования по переработке органической массы в анаэробных условиях с получением биогаза и органического удобрения. Основным элементом, где происходит непосредственно переработка органической массы, является метантек (реактор), представляющий из себя в основном цилиндрическую ёмкость горизонтального или вертикального расположения. Внутри реактора поддерживается заданная температура, соответствующая заданному режиму работы. Например, для мезофильного режима рекомендуется температура 32–35°C. Важно поддерживать заданную температуру в течение всего периода брожения биомассы [3].

Таким образом, для переработки отходов животноводства в биогазовых установках требуется тепловая энергия для поддержания заданной температуры. Потребная энергия для поддержания заданного режима работы биогазовой установки зависит от многих факторов, и важно снизить за-

траты на компенсацию тепловых потерь в реакторе путём обоснования его конструктивных параметров.

Обоснование параметров реактора необходимо с целью снижения тепловых потерь. В тепловом балансе реактора можно выделить его теплопередающую поверхность, через которую ожидаются тепловые потери [10]:

$$Q = k \cdot S \cdot \Delta t, \quad (1)$$

где  $k$  – коэффициент теплопередачи;

$S$  – площадь теплопередающей поверхности;

$\Delta t$  – разность температур внутри реактора и наружного воздуха.

В ходе эксплуатации реактор не полностью заполняется и в его объёме можно выделить две среды: жидкостную (сбраживаемый субстрат) и биогазовую, образующиеся в процессе разложения субстрата. В этом случае уравнение теплового баланса для незаполненного реактора можно записать как:

$$Q = k_1 \cdot S_1 \cdot \Delta t + k_2 \cdot S_2 \cdot \Delta t, \quad (2)$$

где  $k_1$  – коэффициент теплопередачи от субстрата,

$$\frac{Bm}{m^2 \cdot K};$$

$S_1$  – площадь теплопередающей поверхности от субстрата,  $m^2$ ;

$k_2$  – коэффициент теплопередачи от биогаза,

$$\frac{Bm}{m^2 \cdot K};$$

$S_2$  – площадь теплопередающей поверхности от биогаза,  $m^2$ .

В данном уравнении первое слагаемое представляет теплотери от субстрата, а второе – от газовой части. Разность температур  $\Delta t$  для органической массы и биогаза принимается одинаковой. При этом коэффициент теплопередачи через стенку реактора можно представить как [11]:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}}. \quad (3)$$

Коэффициент теплопередачи для заполненной субстратом части реактора –  $\alpha_1 \approx 350$  (Вт/[ $m^2K$ ]), для газовой части –  $\alpha_1 = 8,7$  (Вт/[ $m^2K$ ]), а коэффициент  $\alpha_2 = 23$  (Вт/[ $m^2K$ ]) принимается одинаковым для рассматриваемых сред [12, 13].

Для анализа в качестве примера рассмотрим метантек из стеклопластика с коэффициентом  $\lambda = 0,23$  Вт/( $m \cdot K$ ) и изоляцию из шлаковой ваты –  $\lambda = 0,05$  Вт/( $m \cdot K$ ) [14]. В ходе исследования можно варьировать толщину изоляции. На рисунке 1 представлена зависимость коэффициентов теплопередачи газовой и жидкостной среды от толщины изоляции реактора.

Анализ приведённых данных показывает, что при толщине изоляции до 70 мм коэффициенты теплопередачи в газовой и жидкостной части ре-

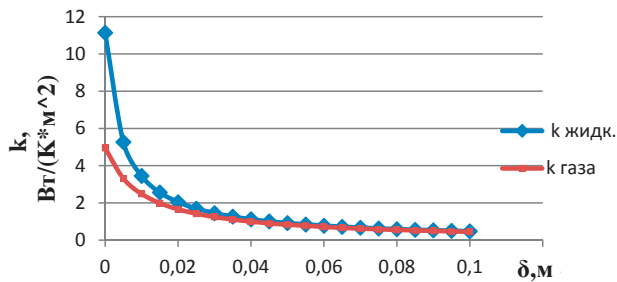


Рис. 1 – Зависимость коэффициентов теплопередачи газовой и жидкостной составляющих заполнения реактора

актора отличаются и могут повлиять на тепловые потери реактора. В этих условиях необходимо учитывать занимаемый объём той или иной среды. Для снижения тепловых потерь важно учитывать не только изоляцию теплопроводящей поверхности, но и её площадь, поскольку сама изоляция поверхности также требует определённых затрат. Тогда необходимо исследовать площадь теплопроводящей поверхности для её оптимизации.

**Результаты исследования.** Для оптимизации площади теплопроводящей поверхности рассмотрим реактор цилиндрической формы с теплообменником внутри, когда сама поверхность выступает как теплопередающая. При этом оптимизируем радиус реактора с тепловой изоляцией, вертикального или горизонтального его расположения.

1. Метантек вертикального исполнения.

На рисунке 2 приведена схема расположения вертикального метантека.

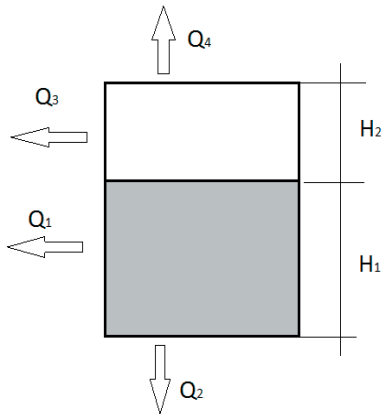


Рис. 2 – Схема вертикального метантека:  
 $Q_1, Q_2$  – теплотери от жидкой среды через боковые стены и основания реактора соответственно;  
 $Q_3, Q_4$  – теплотери от газовой среды через боковую стенку и через основание реактора

Тепловой баланс вертикального реактора можно представить как:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4. \quad (4)$$

Распишем уравнение теплового баланса через параметры реактора:

$$Q = k_1 \cdot (\pi R^2 + 2\pi R H_1) \cdot \Delta t + k_2 \cdot (\pi R^2 + 2\pi R H_2) \cdot \Delta t, \quad (5)$$

при высоте жидкостной и газовой части в метантеке соответственно:

$$H_1 = \frac{V_1}{\pi R^2}; H_2 = \frac{V_2}{\pi R^2}. \quad (6)$$

Получим:

$$Q = k_1 \cdot \left( \pi R^2 + \frac{2V_1}{R} \right) \cdot \Delta t + k_2 \cdot \left( \pi R^2 + \frac{2V_2}{R} \right) \cdot \Delta t. \quad (7)$$

Для нахождения оптимального радиуса при минимуме тепловых потерь функцию исследуем на экстремум

$$\frac{dQ}{dR} = k_1 \cdot \left( 2\pi R - \frac{2V_1}{R^2} \right) \cdot \Delta t + k_2 \cdot \left( 2\pi R - \frac{2V_2}{R^2} \right) \cdot \Delta t = 0. \quad (8)$$

Тогда расчётный оптимальный радиус вертикального метантека примет вид:

$$R_{opt} = \sqrt[3]{\frac{(k_1 V_1 + k_2 V_2)}{(\pi k_1 + \pi k_2)}}. \quad (9)$$

Оптимальный радиус вертикального метантека зависит от объёмов, занимаемых субстратом и биогазом, а также толщины изоляции. При меньшей изоляции потери существенно зависят от объёма заполнения субстратом.

При толщине изоляции более 70 мм  $k_1 = k_2$ , и радиус вертикального реактора зависит только от его объёма:

$$R_{opt} = \sqrt[3]{\frac{V}{2\pi}}. \quad (10)$$

Таким образом, для вертикального метантека цилиндрической формы существует оптимальный радиус по основанию. По заданному объёму метантека можно определить оптимальный радиус и предложить толщину изоляции с учётом затрат на неё.

2. Метантек горизонтального исполнения.

На рисунке 3 приведена схема горизонтального расположения метантека.

Теплопередающую поверхность от жидкостной части реактора можно представить как:

$$S_1 = 2S_{сегм.1} + S_{бок1}. \quad (11)$$

Площадь торцевой части на уровне субстрата представим в виде сегмента:

$$S_{сегм.1} = \frac{1}{2}(\infty - \sin \infty) R^2. \quad (12)$$

Площадь боковой поверхности на уровне субстрата представим как:

$$S_{бок1} = \infty RL, \quad (13)$$

а угол:

$$\gamma = 2\pi - \infty. \quad (14)$$

Тогда выражение теплового баланса через параметры реактора примет вид:

$$Q = k_1 [(\infty - \sin \infty) R^2 + \infty RL] \Delta t + k_2 [(\gamma - \sin \gamma) R^2 + \gamma RL] \Delta t. \quad (15)$$

При заданном объёме, заполненном субстратом, и длине реактора:

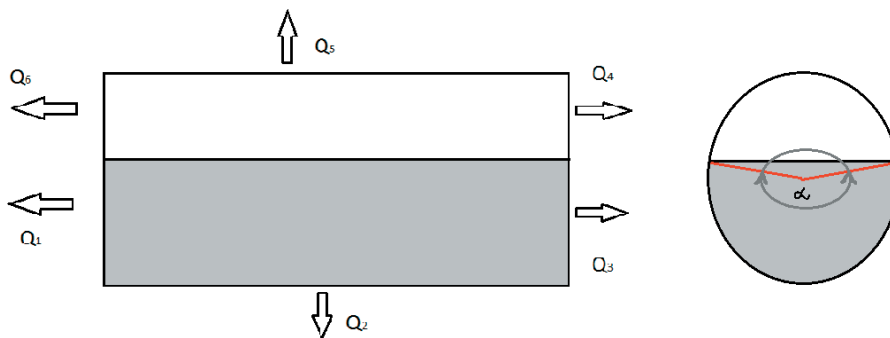


Рис. 3 – Схема горизонтального метантека с видом с торца:

$Q_1, Q_3$  – теплопотери от жидкой среды через сегментные части реактора;  $Q_2$  – теплопотери от жидкой среды через боковую стенку;  $Q_4, Q_6$  – теплопотери от газовой среды через сегментные части реактора;  $Q_5$  – теплопотери от газовой среды через боковую сторону бака

$$V_1 = L \cdot S_{сезм.1} = \frac{1}{2}(\infty - \sin \infty) R^2 \cdot L; \quad (16)$$

$$(\infty - \sin \infty) = \frac{2V_1}{R^2 \cdot L}; \quad (17)$$

$$L = \frac{V}{\pi R^2}, \quad (18)$$

получим

$$Q = k_1 \left[ \frac{2\pi V_1}{V} R^2 + \infty \frac{V}{\pi R} \right] \Delta t + k_2 \left[ \frac{2\pi V_2}{V} R^2 + \gamma \frac{V}{\pi R} \right] \Delta t. \quad (19)$$

Для нахождения оптимального радиуса исследуем данную функцию на экстремум:

$$\frac{dQ}{dR} = k_1 \left[ \frac{4\pi V_1}{V} R - \infty \frac{V}{\pi R^2} \right] \Delta t + k_2 \left[ \frac{4\pi V_2}{V} R - \gamma \frac{V}{\pi R^2} \right] \Delta t = 0. \quad (20)$$

После несложных преобразований получим:

$$R_1 \neq 0; R_2 = \sqrt[3]{\frac{k_1 \Delta t \infty \frac{V}{\pi} + k_2 \Delta t \gamma \frac{V}{\pi}}{\frac{4\pi V_1}{V} k_1 \Delta t + \frac{4\pi V_2}{V} k_2 \Delta t}}. \quad (21)$$

Тогда выражение оптимального радиуса горизонтального биореактора примет вид:

$$R_{opt.z} = \sqrt[3]{\frac{(k_1 \infty + k_2 \gamma) V^2}{(V_1 k_1 + V_2 k_2) 4\pi^2}}. \quad (22)$$

Как видим, для горизонтального метантека цилиндрической формы также существует оптимальной формы, который зависит от объёмов жидкой и газовой среды в реакторе. При толщине изоляции более 70 мм можно получить частный случай как в выражении (10), когда радиус реактора зависит от его полного объёма.

3. Радиус реактора по уровню заполнения субстрата.

Как показало исследование, оптимальный радиус горизонтального или вертикального реактора зависит от доли заполнения субстратом ( $\omega$ ) и толщины изоляции:  $R = f(\delta, \omega)$ .

Исследование проводили по уравнениям (9) и (12), на примере реактора с объёмом 100 м<sup>3</sup> и при заполнении его на 70–90%, т.е.  $\omega = 0,7–0,9$  [2]. Результаты исследования представлены на рисунке 4.

Анализ данных показывает, что оптимальные радиусы для горизонтального или вертикального реактора различные в зависимости от толщины изоляции. При увеличении толщины изоляции до 70 мм наблюдается снижение оптимального радиуса для вертикального реактора, тогда как для горизонтального – повышение.

Уровень заполнения также влияет на радиус реактора, особенно при толщине изоляции менее 70 см. Чем больше уровень заполнения реактора

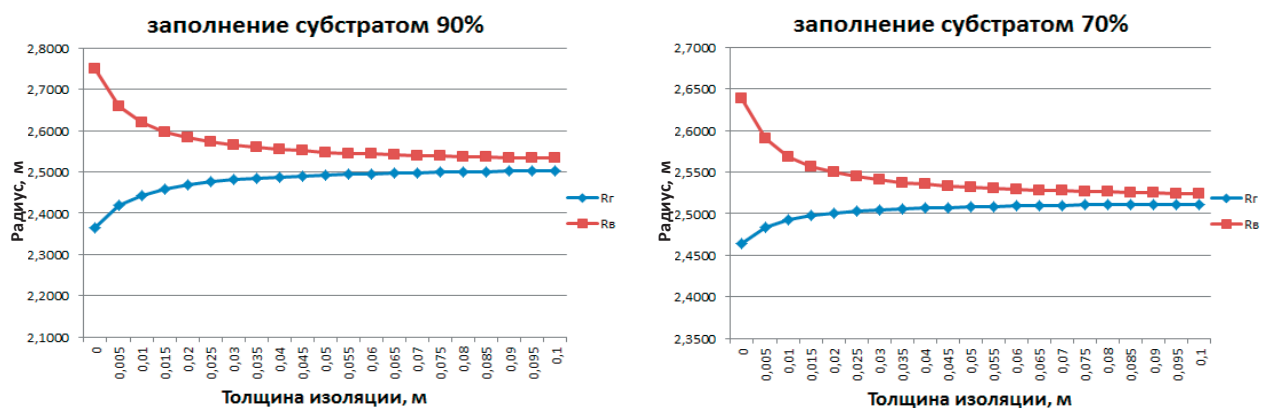


Рис. 4 – Оптимальные радиусы горизонтального и вертикального реакторов объёмом в 100 м<sup>3</sup> при разном уровне заполнения:

$R_g, R_v$  – радиус горизонтального и вертикального реактора соответственно

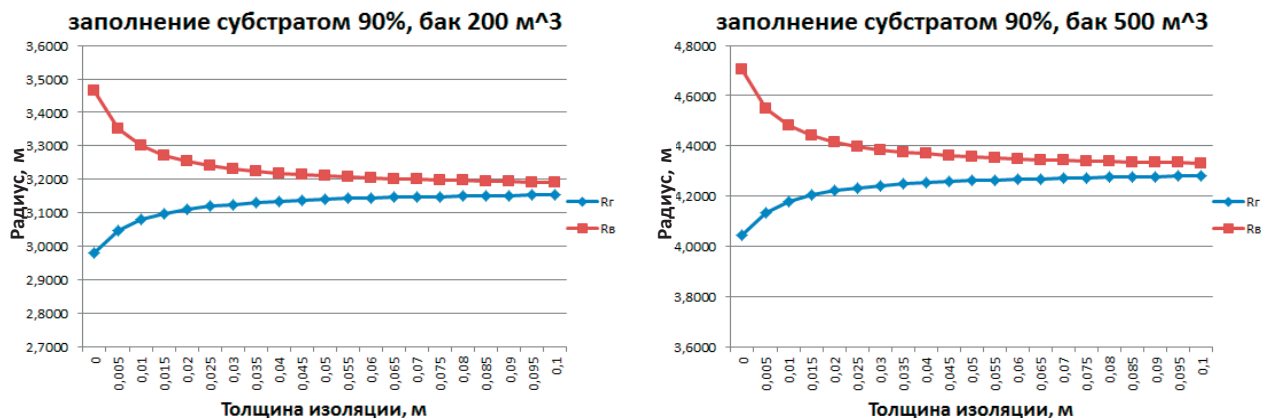


Рис. 5 – Оптимальный радиус горизонтального и вертикального реакторов объёмом в 200 и 500 м³ при уровне заполнения 90%:  
 Rг, Rв – радиус горизонтального и вертикального реактора соответственно

субстратом, тем больше становится оптимальный радиус для эффективного использования заданного объёма реактора.

Оптимальный радиус реакторов при различных заданных объёмах и толщине изоляции также отличается в зависимости от типов их исполнения. Результаты исследования приведены на рисунке 5.

Приведённые зависимости показывают, что при уровне заполнения 90% оптимальные радиусы горизонтального и вертикального реакторов также зависят по-разному от толщины изоляции. При проектировании необходимо учитывать эти зависимости для повышения эффективности переработки биомассы.

**Выводы.**

1. Для повышения эффективности переработки биомассы необходимо снижать энергозатраты на основе оптимизации конструктивных и режимных параметров биогазовой установки. При этом необходимо учитывать уровень загрузки реактора, занимаемые объёмы субстратом и биогазом, отличающиеся теплопередачей среды.

2. Для снижения теплопотерь необходимо оптимизировать площадь теплопроводящей поверхности на основе радиуса реактора. Существует оптимальный радиус для горизонтального и вертикального реакторов, обеспечивающий минимальные теплопотери в зависимости от толщины теплоизоляции.

3. По установленным зависимостям можно определить необходимую толщину изоляции для снижения тепловых потерь от реактора с заданным объёмом. При этом выбор оптимального радиуса и толщины изоляции следует производить с учётом необходимых затрат, что является задачей дальнейших исследований.

5. Предложенные методы определения оптимального радиуса реактора позволяют спроектировать эффективную биогазовую установку с учётом её режимных параметров (объём и уровень загрузки реактора).

**Литература**

- Sheryazov S.K., Ptashkina-Girina O.S. Increasing power supply efficiency by using renewable sources // 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing. ICIEAM. 2016. С. 7910986. DOI:10.1109/ICIEAM.2016.7910986.
- Шерьязов С.К. Возобновляемые источники в системе энергоснабжения сельскохозяйственных потребителей: монография. Челябинск: ЧГАУ, 2008. 300 с.
- Шерьязов С.К., Пташкина-Гирина О.С. Использование возобновляемых источников энергии в сельском хозяйстве: учеб. пособ. Челябинск: ЧГАА, 2013. 184 с.
- Баадер В., Доне Е., Бренндорфер М. Биогаз: теория и практика / Пер. с нем. М. И. Серебряного. М., 1982. 148 с.
- Шерьязов С.К., Пташкина-Гирина О.С., Телюбаев Ж.Б. Переработка отходов животноводства для использования их в качестве удобрения // Вестник ИрГАУ. 2017. Вып. 80. С. 184–189.
- Шерьязов С.К., Васенев В.В., Телюбаев Ж.Б. Методы повышения эффективности переработки биомассы в биогазовой установке // Достижения науки – агропромышленному производству: матер. LV междунар. науч.-технич. конф. Челябинск: ЮУрГАУ, 2016. С. 230–235.
- Шерьязов С.К., Васенев В. В. Анализ параметров биогазовых установок // Научно-техническое обеспечение АПК Сибири: матер. Междунар. науч.-технич. конф. СибИМЭ СФНЦА РАН. Новосибирск, 2017. Т. 2. С. 137–141.
- Виестур У.Э., Шмите И.А., Жилевич А.В. Биотехнология. Рига, 1987. 264 с.
- Панцхава Е.С., Кошкин Н.Л. Биоэнергетические установки по конверсии органических отходов в топливо и органические удобрения // Теплоэнергетика. 1993. № 4. С. 20–23.
- Друзьянова В.П. Энергосберегающая технология переработки навоза крупного рогатого скота: дисс. ... докт. техн. наук. Улан-Удэ, 2015. 273 с.
- Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача: учеб. для вузов, Изд. 3-е, М.: Энергия, 1975. 488 с.
- Ковалев А.А. Повышение энергетической эффективности биогазовых установок: дисс. ... канд. техн. наук. М., 2014. 114 с.
- СП 50.13330.2012 Свод правил. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003.
- Теплопроводность строительных материалов, их плотность и теплоёмкость: [Электронный ресурс]. URL: // http://thermalinfo.ru/svoystva-materialov/strojmateriary/teploprovodnost-stroitelnyh-materialov-ih-plotnost-i-teploemkost.