

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-4-355-364>

УДК 697.97

## Энергетическая эффективность малого биореактора в различных климатических зонах\*

В. Г. Исаков<sup>1)</sup>, А. А. Абрамова<sup>1)</sup>, М. Ю. Дягелев<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова  
(Ижевск, Российская Федерация)

© Белорусский национальный технический университет, 2020  
Belarusian National Technical University, 2020

**Реферат.** Предложенная модель оценки теплового баланса и энергоэффективности биореактора позволяет определить для реактора малого размера, работающего на относительно низкоэнергетическом субстрате, величину критического объема, при котором в данных климатических условиях возможна круглогодичная, полностью автономная работа метантенка, и оценить вероятную энергетическую эффективность подобного биореактора (выход товарной теплоты). Для численной характеристики климатической зоны предлагается использовать среднегодовую температуру и/или распространенный в строительной теплотехнике показатель градусо-суток отопительного периода (ГСОП), более полно характеризующего неравномерность среднемесячного распределения температур (степень континентальности климата). Величина критического объема биореактора, при котором возможна круглогодичная автономная работа метантенка на осадке городских сточных вод, изменяется от 7,5 (Владикавказ, ГСОП = 3410) до 17,0 м<sup>3</sup> (Томск, ГСОП = 6938), т. е. увеличивается практически пропорционально значению градусо-суток отопительного периода. Следует отметить, что при использовании субстрата с большим выходом биогаза, например свиного навоза (выход 40 г/кг), величина критического объема во всех случаях менее 1 м<sup>3</sup>. Такие результаты актуальны только для относительно низкоэнергетического сырья. Характер изменения выхода товарной теплоты в зависимости от объема биореактора и климатических условий вполне ожидаем – количество полезно используемой в интересах бизнеса теплоты тем выше, чем больше объем реактора и мягче климат. Однако при объеме реактора менее 5 м<sup>3</sup> нелинейность графиков намного выше. Поэтому для проектировщиков особо малых биореакторов проведение подобных расчетов обязательно. Полученные численные значения могут быть полезны как для проектировщика биореакторов, так и для заказчика проекта при оценке экономической эффективности планируемых нововведений.

**Ключевые слова:** биогазовая установка, метантенк, тепловой баланс, климатические условия, режим сбраживания, анализ факторов, субстрат, осадок очистных сооружений

**Для цитирования:** Исаков, В. Г. Энергетическая эффективность малого биореактора в различных климатических зонах / В. Г. Исаков, А. А. Абрамова, М. Ю. Дягелев // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2020. Т. 63, № 4. С. 355–364. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-4-355-364>

---

### Адрес для переписки

Исаков Виталий Германович  
Ижевский государственный технический университет  
имени М. Т. Калашникова  
ул. Студенческая, 7,  
426069, г. Ижевск, Российская Федерация  
Тел.: 8 3412 77-60-55  
vodosnab@istu.ru

### Address for correspondence

Isakov Vitaliy G.  
Kalashnikov Izhevsk  
State Technical University  
7, Studencheskaya str.,  
426069, Izhevsk, Russian Federation  
Tel.: 8 3412 77-60-55  
vodosnab@istu.ru

---

\* Статья написана в рамках гранта для ученых ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, шифр № 08.04.01/18ИВГ (приказ от 29.12.2018 № 1494 «О грантовой поддержке приоритетных исследований ученых ИжГТУ имени М. Т. Калашникова»).

## Energy Efficiency of a Small Bioreactor in Various Climatic Zones

V. G. Isakov<sup>1)</sup>, A. A. Abramova<sup>1)</sup>, M. Yu. Dyagelev<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Kalashnikov Izhevsk State Technical University (Izhevsk, Russian Federation)

**Abstract.** The authors proposed a model for estimating the heat balance and energy efficiency of a bioreactor that makes possible for a small-sized reactor operating on a relatively low-energy substrate to determine the critical volume, under which the existing climatic conditions allow year-round fully autonomous operation of the digester, as well as for evaluation of the potential energy efficiency of such a bioreactor (output commodity heat). For the numerical characteristics of the climatic zone, it is proposed to use the average annual temperature and/or the “degree-day of the heating period” (DDHP) indicator common in construction heat engineering; the DDHP value more adequately characterizing the unevenness of the average monthly temperature distribution, i.e. degree of climate continentality. At the same time, the value of the critical volume of the bioreactor, at which year-round autonomous operation of the digester operating on the municipal sewage sludge, is possible, varies from 7.5 (Vladikavkaz, DDHP = 3410) to 17.0 m<sup>3</sup> (Tomsk, DDHP = 6938), i. e. increases almost in proportion to the degree-day of the heating period. It should be noted that when using a substrate with a high biogas yield, e. g., pig manure (a biogas yield of 40 g/kg is adopted), the critical volume in all cases is less than 1 m<sup>3</sup>. Such results are relevant only for relatively low-energy raw materials. The nature of changes in the output of commodity heat, depending on the volume of the bioreactor and climatic conditions, is quite expectable, viz. the amount of heat that is useful for business interests is higher, the higher is the reactor volume and the milder is the climate. However, when the reactor volume is less than 5 m<sup>3</sup>, the non-linearity of the graphs is much higher, i. e. for a designer of especially small bioreactors, it seems mandatory to carry out such calculations. The obtained numerical values can be useful both for the designer of bioreactors and for the customer of the project when evaluating the economic efficiency of the planned new innovations.

**Keywords:** biogas plant, digester, heat balance, climatic conditions, fermentation mode, analysis of factors, substrate, sewage treatment plant sediment

**For citation:** Isakov V. G., Abramova A. A., Dyagelev M. Yu. (2020) Energy Efficiency of a Small Bioreactor in Various Climatic Zones. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 63 (4), 355–364. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-4-355-364> (in Russian)

### Введение

В России имеется значительное число малых очистных сооружений и предприятий (например, животноводческих), в результате деятельности которых образуются органические отходы, эффективная переработка которых не производится. Из-за масштаба использования это приводит к ряду неблагоприятных экологических последствий: неконтролируемому выбросу в атмосферу метана (парникового газа) и вредных продуктов сгорания; сбросу в окружающую среду загрязненных вод и твердых отходов; выводу из оборота плодородных почв и лесных участков, используемых для размещения отходов, и т. д. Одним из экономически оправданных способов использования органических отходов является их переработка в энергоресурсы и оптимизация процесса вторичного энергопотребления [1, 2]. В ряде случаев возможна переработка отходов путем метанового сбраживания в биореакторе, при этом одновременно решается проблема получения дополнительной тепловой и электрической энергии, а при условии эффективного обеззараживания биомассы – получения высококачественных удобрений.

Однако если энергетическая эффективность работы крупных биореакторов, работающих на сырье с высоким выходом газа (птичий помет, навоз

крупного рогатого скота (КРС), свиней, овечьих навоз) [3], не вызывает сомнений, то при использовании малого реактора с относительно низкоэффективным субстратом, например с осадком сточных вод очистных сооружений канализации (сырье, доступное всюду, где есть городские или локальные очистные сооружения малых сельскохозяйственных или пищевых предприятий), возможна проблема недостаточности количества выделяющегося биогаза для компенсации теплотеря в окружающую среду и на нагрев и обеззараживание субстрата только за счет собственной теплоты сгорания образовавшегося метана. То есть не обеспечивается круглогодичный, полностью автономный режим работы (рис. 1) [4, 5].

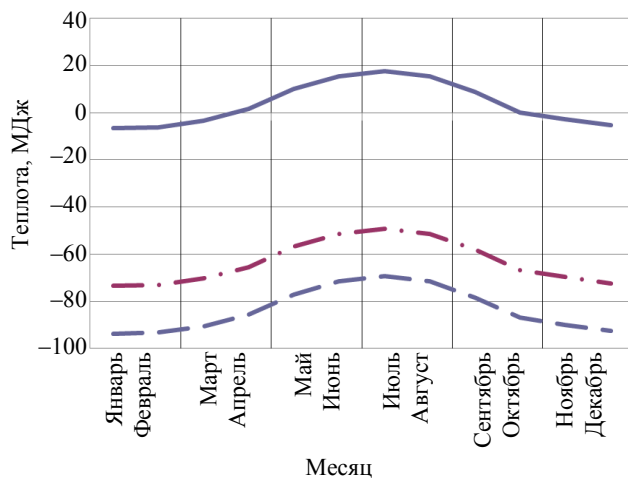


Рис. 1. Тепловой баланс биореактора объемом 5 м<sup>3</sup>, работающего на осадке сточных вод при наземной установке метантенка (Ижевск): — — — теплопотери; — · — · — тепловой баланс; — — — товарная теплота

Fig. 1. Daily heat balance of the bioreactor of the volume of 5 m<sup>3</sup> operating on sewage sludge when there is a ground installation of the digester (Izhevsk): — — — heat loss; — · — · — heat balance; — — — commodity heat

Для биореактора малого размера, работающего в условиях сурового климата, эти проблемы усугубляются:

- неблагоприятным соотношением «поверхность (определяющая теплотеря) – объем» (определяет внутреннее тепловыделение и объем биогаза);
- необходимостью мощной теплоизоляции биореактора для уменьшения потерь теплоты;
- повышенными затратами энергии на обеспечение рабочей температуры сбраживания субстрата и компенсацию тепловых потерь;
- необходимостью хранения сырья при положительных температурах для обеспечения возможности насосной подачи в технологическую линию.

В [4] предложена модель оценки теплового баланса биореактора в условиях сурового климата, учитывающая режим сбраживания (мезофильный или термофильный), форму, размеры (емкость) и конструктивное исполнение биореактора (полностью наземное или полуподземное, характеристики теплоизоляции), тип сырья, внутреннее тепловыделение, теплотворную способность биогаза и др. Результаты компьютерной реализации

данной модели и проведенного предварительного численного исследования показали, что круглогодичная работа биогазовой установки в полностью автономном режиме в условиях сурового климата возможна только при объеме метантенка более некоторого критического объема, определяемого как климатическими условиями, так и видом используемого субстрата, конструкцией установки и теплоизоляции. При объеме менее критического автономная работа биореактора возможна лишь в теплое время года. Суммарный годовой выход товарного биогаза<sup>1</sup> практически не зависит от конструкции реактора (наземный или полузаглубленный), что объясняется перераспределением тепловых потерь по временам года при постоянном режиме работы метантенка. Доказано, что мезофильный режим брожения (25–38 °С, оптимум 37 °С) более рационален в суровых климатических условиях (Удмуртская Республика), если ориентирован на получение биогаза как основного продукта сбраживания и его энергетическое использование. При этом при термическом сопротивлении теплоизоляции реактора  $R_0 < 1 \text{ м}^2 \cdot \text{°С/Вт}$  добиться полностью автономной круглогодичной работы рассматриваемой биогазовой установки в условиях Удмуртии практически невозможно для реакторов малых и средних объемов, работающих на сырье с низким выходом биогаза.

Цель исследований – уточнение критического размера биореактора для переработки осадка сточных вод, оценка энергетических возможностей метантенков всевозможных размеров (по теплоте сжигания товарного биогаза) в различных температурных и климатических зонах; определение взаимосвязи энергетических характеристик биореактора и степени континентальности климата.

### Расчетная схема

Расчет производили для биогазовой установки, изображенной на рис. 2 [6]. Исходный субстрат (осадок сточных вод, навоз крупного рогатого скота, птичий помет и т. д.) разбавляется водой для достижения 86–92 % влажности (обычное соотношение навоза и воды – от 1:3 до 2:1, т. е. количество загружаемого сырья – это сумма отходов и воды, которой они разбавляются), смешивается и измельчается до получения полужидкой однородной массы в приемнике. Далее масса нагревается до 70 °С в течение не менее 1 ч с целью уничтожения бактерий (предполагается, что нагрев будет проводиться за счет тепловой или электрической энергии от вырабатываемого биогаза, например с помощью электронагревателя, тепловых насосов на линии охлаждения субстрата 2–4 и в бункере, подачей горячей воды на разбавление от котла и т. д.). После охлаждения сырье из данной емкости с помощью насоса перекачивается в биореактор (ферментатор), где подогревается теплообменником до температуры анаэробного брожения в зависимости от режима сбраживания. Процесс получения биогаза длится обычно около месяца. Для интенсификации брожения добавляются катализаторы (глюкоза и целлюлоза). Биогаз под собственным давлением через газовый штуцер и конденсатор для удаления влаги идет в газгольдер, отку-

<sup>1</sup> Под товарным биогазом понимается количество биогаза, полученного при полной автономности биогазовой установки (часть теплоты сгорания метана расходуется на собственные нужды установки).

да подается либо для сжигания в отопительных приборах, либо для производства электрической и тепловой энергии в когенерационной энергоустановке. Твердый остаток накапливается в бункере-отстойнике и является хорошим обеззараженным удобрением (содержание азота – 3,5 кг/т, фосфора – 0,8 кг/т, калия – 1,4 кг/т). При оптимальном режиме сбраживания этот остаток не превышает 30 % от массы исходного сырья.

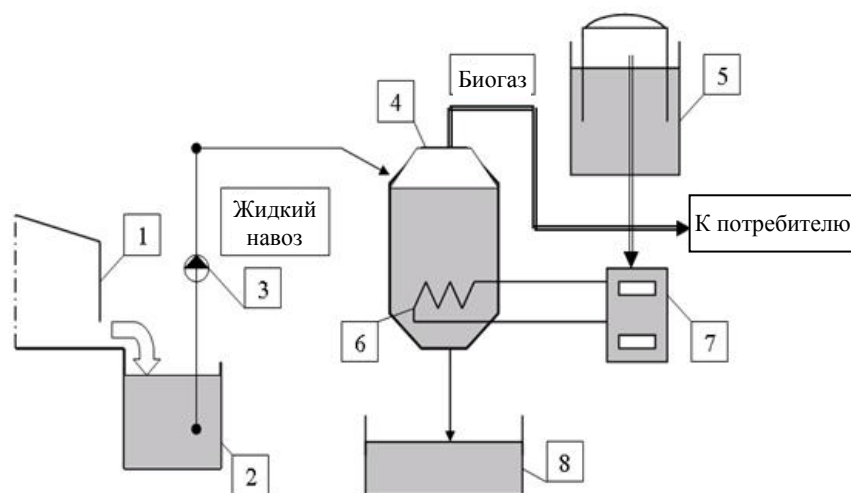


Рис. 2. Принципиальная схема биогазовой установки для переработки жидкого субстрата [6]:

- 1 – животноводческое помещение или бункер для хранения сырья;
- 2 – приемник субстрата; 3 – насос; 4 – биореактор-метантенк; 5 – газгольдер;
- 6 – теплообменник; 7 – котел; 8 – бункер-отстойник

Fig. 2. The basic scheme of a biogas plant for processing a liquid substrate [6]:

- 1 – stock building a hopper for storing raw materials; 2 – substrate receiver; 3 – pump;
- 4 – bioreactor-digester; 5 – gas holder; 6 – heat exchanger; 7 – boiler; 8 – settling tank

Полностью автономный энергонезависимый биореактор средней вместимости потребляет 10–25 % вырабатываемого газа для своих нужд (осуществления термостатирования и перемешивания субстрата). Применение такой схемы для дегельминтизации при мезофильном режиме энергетически более выгодно по сравнению с дающим аналогичный эффект термофильным режимом сбраживания (45–60 °С, оптимум 56 °С) при условии эффективной рекуперации теплоты нагрева в приемнике и ее возврата в биореактор-метантенк (рис. 2). Ориентировка процесса не только на выход товарного биогаза, но и на возможность сельскохозяйственного использования отработанного субстрата в виде экологически безопасного удобрения делает предлагаемую конструктивную схему биореактора наиболее привлекательной для малого бизнеса.

Биореактор работает по проточной схеме при непрерывном или квазинепрерывном процессе – субстрат загружают в реактор ежесуточно (как правило, для малых предприятий в количестве, равном суточному количеству вырабатываемых органических отходов, с учетом воды на разбавление), удаляя соответствующий объем шлама. Общий объем субстрата всегда постоянен и определяется в соответствии с заданным временем пребывания массы в реакторе (для мезофильного режима сбраживания время

оборота реактора составляет от 10 до 20 сут.). Такой вид производства позволяет получить максимальный выход газа при непрерывном процессе газообразования.

Подробное описание работы установки и реализации используемой математической модели приводилось в [4]. Отличительная особенность нового расчета – ориентировка на биореакторы объемом 2–20 м<sup>3</sup>, предназначенные для использования на малых и локальных очистных сооружениях.

Результаты уточненного расчета по рассматриваемой модели представлены на рис. 3–6. Климатические характеристики соответствовали пяти температурным зонам (табл. 1). Степень континентальности климата оценивалась как по распределению среднемесячных и среднегодовых температур, так и по показателю ГСОП, обычно используемому для оценки величины необходимой теплоизоляции здания:

$$\text{ГСОП} = (t_{\text{в}} - t_{\text{от}})z_{\text{от}},$$

где  $t_{\text{от}}$  – средняя температура наружного воздуха в отопительный период, °С;  $z_{\text{от}}$  – продолжительность отопительного периода, сут. [7];  $t_{\text{в}}$  – расчетная температура внутреннего воздуха, °С [8].

Таблица 1

## Климатические характеристики городов России [8]

## Climatic characteristics of Russian cities [8]

Город	Среднегодовая температура, °С	$t_{\text{в}}$ , °С	$t_{\text{от}}$ , °С	$z_{\text{от}}$ , сут./год	ГСОП, °С·сут.
Владикавказ	8,1	20	0,4	174	3410
Ижевск	2,3	21	-5,6	222	5905
Москва	4,1	20	-3,1	214	4943
Казань	3,1	21	-5,2	215	5633
Томск	-0,5	21	-8,4	236	6938

Температура хранения субстрата при температуре наружного воздуха ниже нуля принималась равной 2 °С, предполагая накопление и хранение субстрата в неотапливаемом помещении, обогреваемом за счет теплоты брожения субстрата (реализуемо для малых предприятий при небольшом суточном количестве образующегося субстрата). При температуре наружного воздуха выше нуля температура хранения субстрата принималась равной температуре наружного воздуха.

Диапазон варьирования факторов численного эксперимента выбирался согласно выводам из более раннего расчета [4].

Исходные данные для расчета:

– объем  $V$  метантенка – 2–20 м<sup>3</sup>;

– тип конструкции реактора – надземный, термическое сопротивление изоляции биореактора  $R_0 = 3,0 \text{ м}^2 \cdot \text{°С}/\text{Вт}$ ;

– тип субстрата (выход биогаза из осадка сточных вод  $B_{уд} = 29$  г/кг загружаемого сырья [3], свиного навоза  $B_{уд} = 40$  г/кг [9, 10], птичьего помета  $B_{уд} = 60$  г/кг [9, 10]);

– режим сбраживания – мезофильный,  $t_b = 38$  °С.

Теплотворная способность биогаза для всех случаев принималась одинаковой – 22000 кДж/м<sup>3</sup> (средняя из 18860–26400 кДж/м<sup>3</sup> [10]), поскольку содержание метана в биогазе для выбранных субстратов отличается сравнительно мало (60–65 %); тепловой эффект реакции брожения субстрата в реакторе – 10560 Дж/кг газа [11, 12]; коэффициент рекуперации тепла  $k_r = 0,95$  (5 % тепловых потерь на линии 2–3–4 и потерь на перемешивание субстрата в биореакторе (рис. 2); коэффициент использования объема реактора  $k_{ию} = 0,8$  [11].

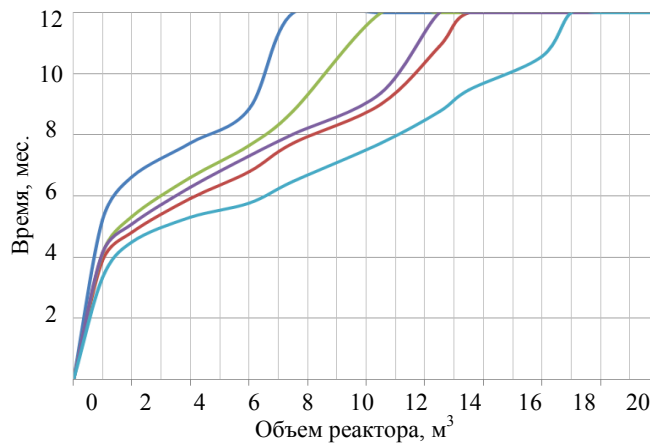


Рис. 3. Прогнозируемое время полностью автономной работы малогабаритного биореактора в разных температурных зонах: — Владикавказ; — Ижевск; — Москва; — Казань; — Томск

Fig. 3. The predicted time for fully autonomous operation of a compact bioreactor in different temperature zones: — Vladikavkaz; — Izhevsk; — Moscow; — Kazan; — Tomsk

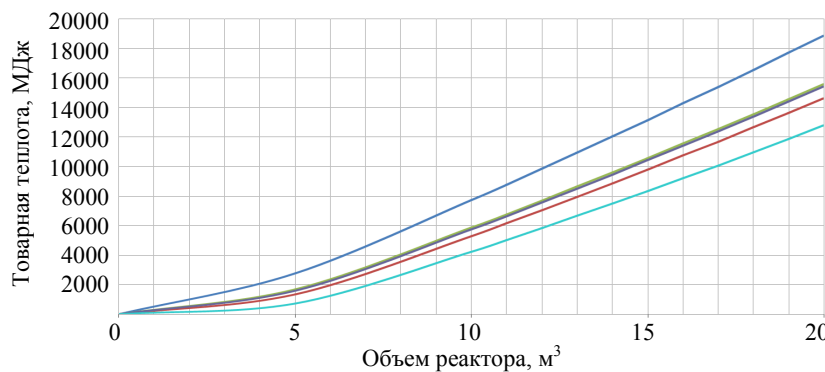


Рис. 4. Зависимость товарной теплоты от объема реактора в разных температурных зонах: — Владикавказ; — Ижевск; — Москва; — Казань; — Томск

Fig. 4. Dependence of product heat on the reactor volume in different temperature zones: — Vladikavkaz; — Izhevsk; — Moscow; — Kazan; — Tomsk

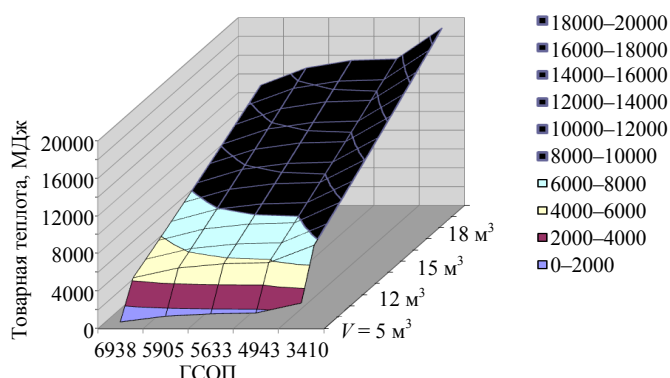


Рис. 5. Влияние степени континентальности климата на выход товарной теплоты при изменении объема биореактора

Fig. 5. The influence of the degree of continental climate on the output of commodity heat when the volume of the bioreactor changes

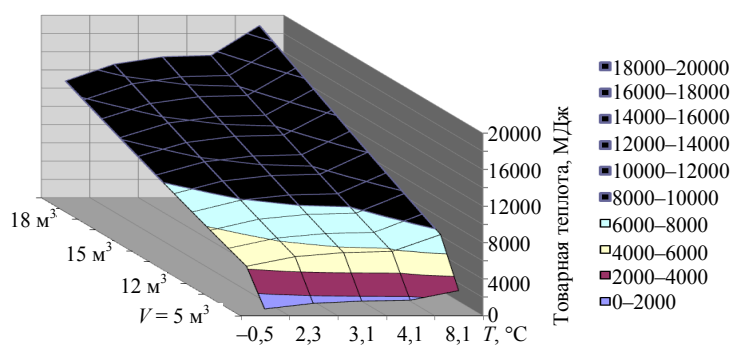


Рис. 6. Влияние среднегодовой температуры на выход товарной теплоты при изменении объема биореактора

Fig. 6. The effect of the average annual temperature on the output of the commodity heat when the volume of the bioreactor changes

### Анализ результатов

Из рис. 3–6 видно, что возможная продолжительность работы биогазовой установки в полностью автономном режиме определяется как объемом биореактора, так и климатическими условиями местности. При этом величина критического объема биореактора, при котором возможна круглогодичная автономная работа метантенки на осадке городских сточных вод, изменяется от 7,5 (Владикавказ, ГСОП = 3410) до 17,0 м<sup>3</sup> (Томск, ГСОП = 6938), т. е. увеличивается практически пропорционально величине градусо-суток отопительного периода. Результаты получены при коэффициенте рекуперации теплоты 0,95. При снижении эффективности рекуперации выводы будут менее оптимистичными (например, при  $k_r = 0,75$  величина критического объема биореактора 17,5 (Владикавказ, ГСОП = 3410) и 38,3 м<sup>3</sup> (Томск, ГСОП = 6938)). Следует отметить, что при использовании субстрата с большим выходом биогаза, например свиного навоза (выход биогаза 40 г/кг), величина критического объема во всех случаях менее 1,0 м<sup>3</sup>, т. е. полученные результаты актуальны только для относительно низкоэнергетического сырья.



Количество полезно используемой теплоты тем больше, чем больше объем реактора и мягче климат. Однако при объеме реактора менее 5 м<sup>3</sup> нелинейность графиков намного выше, т. е. для проектировщика особо малых биореакторов проведение подобных расчетов обязательно.

Для прогнозирования выхода товарной теплоты в зависимости от температурно-климатических характеристик местности в качестве численной характеристики климатической зоны можно использовать как среднегодовую температуру, так и распространенный в практике строительной теплотехники показатель ГСОП.

## ВЫВОДЫ

1. Предложенная в [4] модель оценки теплового баланса и энергоэффективности биореактора позволяет для реактора малого размера, работающего на относительно низкоэнергетическом субстрате, определить как величину критического объема, при котором в данных климатических условиях возможна круглогодичная, полностью автономная работа метантенка, так и оценить возможную энергетическую эффективность биореактора (выход товарной теплоты).

2. Полученные в расчете численные значения могут быть полезны и для проектировщика биореакторов, и для заказчика проекта при оценке экономической эффективности планируемых нововведений.

3. Для численной характеристики климатической зоны предлагается использовать среднегодовую температуру и/или распространенный в строительной теплотехнике показатель градусо-суток отопительного периода (ГСОП). При этом величина ГСОП более полно характеризует неравномерность среднемесячного распределения температур, т. е. степень континентальности климата.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Хрусталева, Б. М. Твердое топливо из углеводородсодержащих, древесных и сельскохозяйственных отходов для локальных систем теплоснабжения / Б. М. Хрусталева, А. Н. Пехота // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2017. Т. 60. № 2. С. 147–158. DOI:10.21122/1029-7448-2017-60-2-147-158.
2. Осипов, С. Н. Повышение эффективности получения тепловой энергии из бытовых стоков / С. Н. Осипов, А. В. Захаренко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 5. С. 482–498. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-5-482-498>.
3. Тыршу, М. Комплексная биоэнергетическая установка / М. Тыршу, Н. Константинов, М. Узун // Проблемы региональной энергетики. 2008. № 3. С. 78–85.
4. Тепловой баланс и энергоэффективность биореактора в условиях сурового климата / В. Г. Исаков [и др.] // Интеллектуальные системы в производстве. 2018. Т. 16, № 4. С. 154–162.
5. Кононова, Е. А. Математическое моделирование процесса перемешивания субстрата при анаэробном сбраживании в биореакторе / Е. А. Кононова, М. В. Свалова, А. М. Непогодин // Интеллектуальные системы в производстве. 2015. Т. 25, № 1. С. 15–18.
6. Возможность внедрения на птицефабрике инновационной технологии получения энергии и тепла. Биогазовая установка [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://studbooks.net/1233496/agropromyshlennost/biogazovaya\\_ustanovka](https://studbooks.net/1233496/agropromyshlennost/biogazovaya_ustanovka). Дата доступа: 14.09.2018.
7. Тепловая защита зданий: СНиП 23-02-2003. Введ. в действие 01.10.2003. М.: Госстрой России, ФГУП ЦПП, 2004. 31 с.

8. Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99\* (с Изменениями № 1, 2): СП 131.13330.2012. Введ. в действие 01.01.2013. М.: Минстрой, 2015. 124 с.
9. Северилов, П. Биогаз для чайников [Электронный ресурс] / П. Северилов // ООО «Стройкомфортсервис 2000». Режим доступа: [http://www.betontrans.ru/construction/biogas\\_1.htm](http://www.betontrans.ru/construction/biogas_1.htm). Дата доступа: 12.10.2018.
10. Производство биогаза из отходов лесной и перерабатывающей промышленности [Электронный ресурс] / Министерство экономического развития Кировской области. Режим доступа: <https://invest.kirovreg.ru/investments/innovatsionnaya-politika/innovatsionnye-proekty/proizvodstvo-biogaza.php?special=Y>. Дата доступа: 20.09.2018.
11. Баадер, В. Биогаз: теория и практика / В. Баадер, Е. Доне, М. Бренндерфер; пер. с нем. и предисловие М. И. Серебряного. М.: Колос, 1982. 148 с.
12. Игнатов, Д. В. Математическое моделирование периодического процесса анаэробного сбраживания субстратов: на примере спиртового брожения / Д. В. Игнатов. Воронеж: Воронеж. гос. технол. акад., 2002. 22 с.

Поступила 03.05.2019    Подписана в печать 08.10.2019    Опубликована онлайн 30.07.2020

#### REFERENCES

1. Khroustalev B. M., Pekhota A. N. (2017) Solid Fuel of Hydrocarbon, Wood and Agricultural Waste for Local Heat Supply Systems. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Association*, 60 (2), 147–158 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-2-147-158>.
2. Osipov S. N., Zakharenko A. V. (2019) Improving the Efficiency of Heat Power Generation from Household Drains. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Association*, 62 (5), 482–498 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-5-482-498>.
3. Tirshu M., Konstantinov N., Uzun M. (2008) Complex Biopower Installation. *Problemy Regional'noi Energetiki = Problems of the Regional Energetics*, (3), 78–85 (in Russian).
4. Isakov V. G., Svalova M. V., Abramova A. A., Nepogodin A. M. (2018) Heat Balance and Energy Efficiency of a Bioreactor in a Harsh Climate. *Intellektual'nye Sistemy v Proizvodstve = Intelligent Systems in Manufacturing*, 16 (4), 154–162 (in Russian).
5. Kononova E. A., Svalova M. V., Nepogodin A. M. Mathematical Modeling of the Process of Mixing the Substrate During Anaerobic Digestion in the Bioreactor. *Intellektual'nye Sistemy v Proizvodstve = Intelligent Systems in Manufacturing*, 25 (1), 15–18 (in Russian).
6. *The Possibility of Introducing at the Poultry Farm an Innovative Technology for Producing Energy and Heat. Biogas Plant*. Available at: [https://studbooks.net/1233496/agropromyshlennost/biogazovaya\\_ustanovka](https://studbooks.net/1233496/agropromyshlennost/biogazovaya_ustanovka). (Accessed 14.09.2018) (in Russian).
7. SNiP [Building Codes and Regulations] 23-02–2003. *Thermal Protection of Buildings*. Moscow, The State Construction Committee of Russia, 2004. 31 (in Russian).
8. Updated Version of SNiP [Building Codes and Regulations] 23-01–99\* (with Changes No 1, 2): SP 131.13330.2012. *Construction Climatology*. Moscow, Ministry of Construction, 2015. 124 (in Russian).
9. Severilov P. *Biogas for Dummies*. Available at: [http://www.betontrans.ru/construction/biogas\\_1.htm](http://www.betontrans.ru/construction/biogas_1.htm). (Accessed 12.10.2018) (in Russian).
10. Production of Biogas from Waste of the Forest and Processing Industry. *Ministry of Economic Development of the Kirov Region*. Available at: <https://invest.kirovreg.ru/investments/innovatsionnaya-politika/innovatsionnye-proekty/proizvodstvo-biogaza.php?special=Y> (Accessed 20.09.2018) (in Russian).
11. Baader W., Dohne E., Brenndorfer M. (1978) *Biogas in Theorie und Praxis* [Biogas: Theory and Practice]. Darmstadt, Kranichstein. (in German).
12. Ignatov D. V. (2002) *Mathematical Modeling of the Periodic Process of Anaerobic Fermenting of Substrates*. Voronezh, Voronezh State Technological Academy. 22 (in Russian).

Received: 3 May 2019

Accepted: 8 October 2019

Published online: 30 July 2020