



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
УПРАВЛЕНИЕ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ  
КВАЛИФИКАЦИИ

Кафедра «Теплогазоснабжение и вентиляция»

## **Методические указания**

к практическим занятиям  
«Возобновляемые источники энергии»  
по дисциплине

# **«Вопросы теории и инновационных решений при использовании возобновляемых источников энергии»**

Авторы  
Галкина Н. И.

Ростов-на-Дону, 2019

## Аннотация

Приведена методика расчета и состав биогазовой установки. Представлено теоретическое пояснение, сформулированы условия задач и приведены примеры их решения. Приведены варианты задач.

Предназначены для магистров направления 08.04.01 «Строительство», профиль «Теплогазоснабжение и вентиляция» очной и заочной формы обучения

## Авторы

к.т.н., доцент кафедры «Теплогазоснабжение  
и вентиляция»  
Галкина Н.И.



## Оглавление

<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>4</b>
<b>1. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ БИОМАССЫ .....</b>	<b>4</b>
<b>2. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ БИОГАЗОВОЙ УСТАНОВКИ (БГУ) ..</b>	<b>5</b>
<b>ЗАДАЧА 1 .....</b>	<b>7</b>
<b>ЗАДАЧА 2.....</b>	<b>15</b>
<b>ЗАДАЧА 3.....</b>	<b>21</b>
<b>ЗАДАЧА 4.....</b>	<b>25</b>
<b>ЛИТЕРАТУРА.....</b>	<b>32</b>

## ВВЕДЕНИЕ

Энергия является основой для жизнедеятельности человечества: обеспечивает тепло для обогрева, производство и приготовление пищи, создание товаров. Поскольку человечество развивается, растет спрос людей на услуги, следовательно, продолжается рост потребности в энергии.

Популярные в XX веке источники энергии (нефть, газ, уголь) потребляются эффективно, а возобновляются очень медленно и, следовательно, следует ожидать их истощения в обозримом будущем. Возрастающая потребность в энергии из-за роста производственных мощностей и увеличения населения приведет к тому, что дополнительно требуется установленная мощность примерно в 2 раза больше современного уровня [1].

Этот фактор стимулирует переход к крупномасштабному использованию возобновляемых источников энергии (ВИЭ), а также интенсивное применение новых современных технологий эффективного использования энергоресурсов.

Таким образом, технологии использования ВИЭ, в частности энергии биомассы, должны быть интересны современным специалистам в энергетической и смежных областях

Интерес к широкому использованию биомассы определен следующими основными обстоятельствами:

- экологическими, связанными с необходимостью решения, в том числе, глобальных климатологических задач;
- необходимостью снижения потребления невозобновляемых источников энергии (газ, нефть, уголь), активно истощаемых в обозримом будущем, и заменой их возобновляемыми источниками.

### 1. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ БИОМАССЫ

Биомасса – один из наиболее популярных и универсальных ресурсов на Земле. Под термином «биомасса» понимается органическое вещество растительного или животного происхождения, которое может быть использовано для получения энергии или технически удобных видов топлива путем термохимической (прямое сжигание, пиролиз, газификация) или биологической конверсии.

Биомасса делится на:

– первичную (растения, животные, микроорганизмы и т.д.);

– вторичную (отходы при переработке первичной биомассы и продукты жизнедеятельности человека и животных [1]).

Тепловая способность сухой биомассы составляет около 14МДж/кг.

В момент образования биомасса содержит большое количество воды, от 8 до 20% в пшеничной соломе, 30 – 60% в древесине, до 75 – 90% в навозе сельскохозяйственных животных и 95% в водном гиацинте.

В процессе переработки биомассы за счет брожения выделяется биогаз.

Выход биогаза зависит от содержания сухого вещества и вида используемого сырья. Из тонны навоза крупного рогатого скота получается 40 – 50м<sup>3</sup> биогаза с содержанием метана 60%.

Энергия, заключенная в 1 м<sup>3</sup> биогаза эквивалентна:

– 0,6 м<sup>3</sup> природного газа;

– 0,74 м<sup>3</sup> нефти;

– 0,66 л дизельного топлива.

В расчетах используется понятие сухого вещества (СВ) и сухого органического вещества (СОВ). Вода, содержащаяся в биомассе, не дает газа.

## **2. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ БИОГАЗОВОЙ УСТАНОВКИ (БГУ)**

Производство биогаза происходит с помощью специально-

го устройства – биогазовой установки (БГУ). Схема БГУ представлена на рис.1.

Основными компонентами БГУ являются: отстойник, теплообменник, метантенк, газгольдер, котел.

Сырье, содержащее 2–10% органических веществ, из отстойника через теплообменник, где оно подогревается до температуры ферментации, подается в метантенк. Образующиеся газы удаляются через газовый колпак, расположенный в верхней части метантенка. Газ по газопроводу поступает в котел или в газохранилище – газгольдер. Из каждой тонны навоза выделяется в среднем 50м<sup>3</sup> биогаза [2].

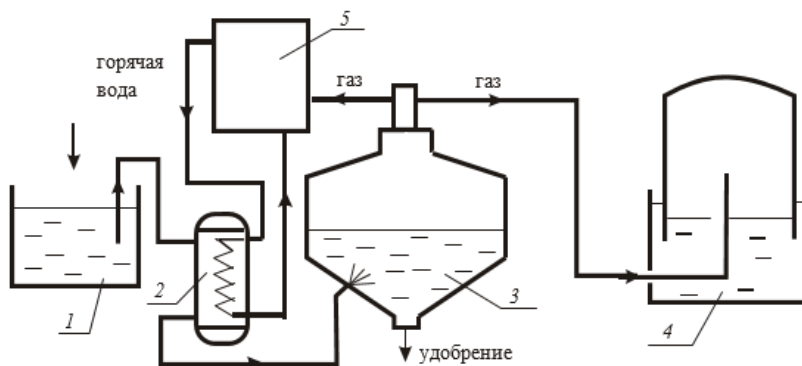


Рис. 1. Схема биогазовой установки:

- 1- отстойник, 2- теплообменник, 3- метантенк, 4- газгольдер,  
5- котел.

**Метановое брожение** – процесс эндотермический, требует постоянного подогрева для поддержания необходимой температуры ферментации. Как правило, метантенки и сырье подогре-

ваются за счет сжигания образующегося биогаза.

В среднем на поддержание требуемой температуры ферментации расходуется от 15–20% (**мезофильный** процесс) до 30–50% (**термофильный** процесс) биогаза. Поэтому одним из важных моментов эксплуатации метантенков является их хорошая теплоизоляция [1].

Различают 3 уровня брожения:

- низкий (до 20°C) – психрофильное брожение;
- средний (32 - 34°C) – мезофильное брожение;
- высокий (52-55°C) – термофильное брожение. Однако

при этом значительно возрастают затраты на подогрев.

Процесс брожения биомассы в метантенке идет достаточно долго. Сначала распадаются легкоразлагающиеся органические вещества с наибольшим выходом биогаза, а затем начинают распадаться трудноразлагающиеся органические вещества с заметно меньшей скоростью выхода биогаза [3].

Поэтому, исходя из экономических соображений, на практике время продолжительности процесса брожения выбирают равное времени разложения до 40–50% органических веществ (от 8 до 20 сут).

### ЗАДАЧА 1

Рассчитать объем биогазовой установки для фермерского хозяйства и выход биогаза при сбраживании навоза от животных.

#### Методика расчета

1. Выход навоза от каждого вида животных с учетом подстилки [4]:

$$K_{ni} = 1,5 \cdot M_{сутi} \cdot n, \text{ кг/сут,}$$

где 1,5 – коэффициент, учитывающий наличие подстилки;

$M_{сутi}$  – суточный выход навоза в зависимости от вида животных, кг/сут.;

$n$  – количество голов.

2. Суммарная доля СВ в навозе для каждого вида животных:

$$M_{сви} = K_{ni} \cdot (1-W), \text{ кг/сут,}$$

где  $W$  – влажность навоза.

3. Объем метантенка БГУ при использовании навоза от соответствующего вида животного в сутки:

$$V_M = \frac{M_{свг}}{m_p}, \text{ м}^3/\text{сут,}$$

где  $m_p$  – рекомендуемый объем загрузки СВ на  $\text{м}^3$  метантенка,  $\text{кг}/\text{м}^3$  (принимается большее значение для заданного вида животного).

4. Доля сухого органического вещества (СОВ) в навозе для каждого вида животного:

$$M_{совi} = M_{сви} \cdot P, \text{ кг/сут,}$$

где  $P$  – доля СОВ в сухом веществе навоза.

5.

Выход биогаза при полном разложении СОВ:

$$V_{ni} = m_H \cdot M_{совi}, \text{ м}^3,$$

где  $m_H$  – выход биогаза из 1 кг СОВ в навозе, принимает-



ся равным 0,315– 0,415 м<sup>3</sup>/кг.

6.

Суммарный выход биогаза при сбраживании биомассы для данного объема метантенка:

$$V_{\text{б}} = \sum (V_{\text{п}i} \cdot m_{\text{б}i}), \text{ м}^3,$$

где  $m_{\text{б}i}$  – доля выхода биогаза от исходного материала при данной продолжительности метанового брожения.

7.

бъем метантенка при полной загрузке:

$$V_{\text{п.з}} = \frac{K_{\text{плз}} \cdot T}{\rho_{\text{н}}}, \text{ м}^3,$$

где  $K_{\text{плз}}$  – суммарное значение для всех видов животных;

$T$  – продолжительность брожения, сут (наибольшее из рассматриваемых видов животных);

$\rho_{\text{н}}$  – удельная плотность сбраживаемой массы. Т.к., влажность навоза обычно близка к 90%,  $\rho_{\text{н}}$  принимают равной  $\rho_{\text{воды}} = 1000 \text{ кг/м}^3$ .

8.

Проверяется соответствие объема метантенка его полной загрузке:

- если  $V_{\text{п.з}} < V_{\text{м}}$ , значит часть метантенка использоваться не будет, что экономически не выгодно.

- если  $V_{\text{п.з}} = V_{\text{м}}$  может возникнуть проблема из-за забивания канала сбора биогаза пеной.

Рекомендуемое соотношение  $\frac{V_{\text{п.з}}}{V_{\text{м}}} = 0,7...0,9$ .

9.

Потенциальный запас энергии биогаза, вырабатываемого в течение суток:

$$P_{\text{э}} = V_{\text{б}} \cdot C_{\text{б}}, \text{ МДж},$$

где  $C_{\text{б}} = 22 \text{ МДж/ м}^3$  – теплотворная способность биогаза.

10.

Количество теплоты для поддержания режима брожения биомассы:

$$Q = K_{\text{пз}} \cdot C \cdot (t_{\text{б}} - t_{\text{з}}) \cdot \frac{1}{\eta}, \text{ МДж/сут},$$

где  $K_{\text{п}}$  – суммарный выход навоза от всех видов животных, кг/сут.;

$C$  – средняя теплоемкость загружаемой биомассы, принимается равной  $4,18 \times 10^{-3} \text{ МДж/кг} \cdot \text{°К}$ ;

$t_{\text{б}}$  – температура процесса брожения, °К;

$t_{\text{з}}$  – температура загружаемой массы, принимается равной температуре окружающей среды, °К;

$\eta$  – КПД процесса, принимается равным 0,7.

11. Определить, какой объем природного газа, нефти и дизельного топлива может заменить полученный объем биогаза:

1 м<sup>3</sup> биогаза  $\equiv$  0,6 м<sup>3</sup> природного газа;

1 м<sup>3</sup> биогаза  $\equiv$  0,74 м<sup>3</sup> нефти;

1 м<sup>3</sup> биогаза  $\equiv$  0,66 л дизельного топлива.

Исходные данные для расчета задачи 1 по вариантам представлены в табл. 1.

### **Пример расчета**

#### ***Исходные данные:***

– количество и вид животного: гуси –  $n_1=50$ ; свиньи –  $n_2=50$ ;

– суточный выход навоза в сутки на 1 голову:  $M_{\text{сут1}}=0,58$

кг/сут,  $M_{сут2} = 2,0$  кг/сут;

– влажность навоза,  $W_1 = 0,735$ ,  $W_2 = 0,9$ ;

– рекомендуемый объем загрузки СВ на  $m^3$  метантенка:

$m_{р1} = 2 \text{ кг/м}^3$ ,  $m_{р2} = 3 \text{ кг/м}^3$ ;

– доля выхода биогаза:  $m_{б1} = 0,56$ ,  $m_{б2} = 0,5$ ;

– доля СОВ в сух. веществе навоза:  $P_1 = 0,76$ ,  $P_2 = 0,81$ ;

– продолжительность брожения  $T = 40$  сут.

**Определить:**

– потенциальный запас энергии биогаза  $\Pi_э$ ;

– количество теплоты для поддержания процесса брожения биомассы в метантенке  $Q$ ;

– какой объем природного газа, нефти и дизельного топлива может заменить полученный объем биогаза.

**Решение:**

1.

Выход навоза от каждого вида животных с учетом подстилки:

– для гусей:

$$K_{п1} = 1,5 \cdot M_{сут1} \cdot n = 1,5 \cdot 0,58 \cdot 50 = 43,5 \text{ кг/сут}$$

– для свиней:

$$K_{п2} = 1,5 \cdot M_{сут2} \cdot n = 1,5 \cdot 2,0 \cdot 50 = 150 \text{ кг/сут}$$

2.

Суммарная доля СВ в навозе:

– в навозе гусей:

$$M_{св1} = K_{п1} \cdot (1 - W) = 43,5 (1 - 0,735) = 11,5 \text{ кг/сут}$$

– в навозе свиней:

$$M_{\text{св2}} = K_{\text{п2}} \cdot (1-W) = 150 (1-0,9) = 15 \text{ кг/сут}$$

3.

Объем метантенка БГУ для двух видов животных в сутки:

$$V_{\text{м}} = \frac{M_{\text{св2}}}{\rho_{\text{г}}} = \frac{26,5}{3} = 8,8 \text{ м}^3/\text{сут}$$

Таблица 1

## Исходные данные для расчета

№ вар.	Вид животного	Кол-во голов, n	Сут. вых. навоза в сут. на 1 гол., M <sub>сут</sub> , кг/сут	Прод.-сть брожения, T, сут	Доля СОВ в сух. веществе навоза, P	Влажность навоза, W, о.е	Доля выхода биогаза, тб	Рекоменд. объем загрузки тр. кг/м <sup>3</sup>
1	свиньи	20	2.0	12	0.805	0.9	0.5	3.0
	коровы	25	40	17	0.81	0.875	0.4	6.0
2	коровы	15	40	17	0.81	0.875	0.4	6.0
	телята	30	10	16	0.785	0.88	0.48	5.0
3	быки	20	40	18	0.81	0.875	0.4	4.5
	телята	30	10	16	0.785	0.88	0.48	5.0
4	телята	35	10	16	0.785	0.88	0.48	5.0
	свиньи	40	2.0	12	0.805	0.9	0.5	3.0
5	коровы	20	40	17	0.81	0.875	0.4	6.0
	быки	15	40	18	0.81	0.875	0.4	4.5
6	куры	150	0.2	30	0.765	0.745	0.55	1.5
	быки	20	40	18	0.81	0.875	0.4	4.5
7	гуси	40	0.58	40	0.76	0.735	0.56	2.0
	свиньи	35	2.0	12	0.805	0.9	0.5	3.0
8	быки	30	40	18	0.81	0.875	0.4	4.5
	свиньи	20	2.0	12	0.805	0.9	0.5	3.0
9	куры	200	0.2	30	0.765	0.745	0.55	1.5
	свиньи	30	2.0	12	0.805	0.9	0.5	3.0
10	быки	10	40	18	0.81	0.875	0.4	4.5
	коровы	40	40	17	0.81	0.875	0.4	6.0
11	телята	20	10	16	0.785	0.88	0.48	5.0
	коровы	35	40	17	0.81	0.875	0.4	6.0
12	свиньи	15	2.0	12	0.805	0.9	0.5	3.0
	быки	25	40	18	0.81	0.875	0.4	4.5
13	куры	250	0.2	30	0.765	0.745	0.55	1.5
	коровы	10	40	17	0.81	0.875	0.4	6.0
14	гуси	100	0.58	40	0.76	0.735	0.56	2.0
	свиньи	25	2.0	12	0.805	0.9	0.5	3.0
15	быки	20	40	18	0.81	0.875	0.4	4.5
	гуси	50	0.58	40	0.76	0.735	0.56	2.0

## Вопросы теории и инновационных решений при использовании возобновляемых источников энергии

4.

Доля СОВ в навозе:

– для гусей:

$$M_{\text{сов1}} = M_{\text{св1}} \cdot P = 11,5 \cdot 0,76 = 8,74 \text{ кг/сут}$$

– для свиней:

$$M_{\text{сов2}} = M_{\text{св2}} \cdot P = 15 \cdot 0,81 = 12,15 \text{ кг/сут}$$

5.

Выход биогаза при полном разложении СОВ:

– для гусей:

$$V_1 = m_H \cdot M_{\text{сов1}} = 0,365 \cdot 8,74 = 3,2 \text{ м}^3$$

– для свиней:

$$V_2 = m_H \cdot M_{\text{сов2}} = 0,365 \cdot 12,15 = 4,4 \text{ м}^3$$

6.

Суммарный выход биогаза при сбраживании:

$$V_B = \Sigma (V_{\text{пi}} \cdot m_{\text{Би}}) = (3,2 \cdot 0,56 + 4,4 \cdot 0,5) = 4 \text{ м}^3$$

7.

Объем метантенка при полной загрузке:

$$V_{\text{ПЗ}} = \frac{K_{\text{ПЗ}} \cdot T}{P_H} = \frac{(43,5 + 150) \cdot 40}{1000} = 7,7 \text{ м}^3$$

8.

Проверяется соответствие объема метантенка его полной загрузке:

$$\frac{V_{\text{ПЗ}}}{V_M} = \frac{7,7}{8,8} = 0,9, \text{ что соответствует рекомендуемой загрузке ме-}$$

тантенка.

9.

Потенциальный запас энергии биогаза, вырабатываемого в течение суток:

$$P_{\text{э}} = V_{\text{б}} \cdot C_{\text{б}} = 4 \cdot 22 = 88 \text{ МДж}$$

10.

Количество теплоты для поддержания режима брожения биомассы:

$$Q = K_{\text{ПС}} \cdot C \cdot (t_{\text{б}} - t_3) \cdot \frac{1}{\eta} = 193,5 \cdot 4,18 \cdot 10^{-3} \cdot (305-288) \cdot 1,4 =$$

19,25 МДж/сут

11.

Эквивалент полученного объема биогаза другим видам топлива:

$V_{\text{б}} = 4 \text{ м}^3 \equiv 2,4 \text{ м}^3$  природного газа;  $\equiv 2,9 \text{ м}^3$  нефти;  $\equiv 2,6$  л дизельного топлива.

## ЗАДАЧА 2.

Оценить эффективность установки биогазогенератора и двигатель-генераторной установки для утилизации навоза на свиноферме.

### Методика расчета

1. Объем жидкой массы, проходящей через биогазогенератор ежедневно [4]:

$$V_j = \frac{m}{\rho}, \text{ м}^3$$

где  $m$  – масса сухого материала в навозе животных за сутки, кг/сут;

$\rho = 50 \text{ кг/м}^3$  – содержание сухого материала в  $1 \text{ м}^3$  жижи.

2. Объем биогазогенератора:

$$V_G = V_J \cdot t, \text{ м}^3$$

где  $t$  – время цикла сбраживания, сут.

3. Масса сухого материала в полном биогазогенераторе:

$$G_C = m \cdot t \cdot 1000, \text{ кг}$$

4. Объем биогаза, выделяемого биогазогенератором за сутки:

$$V_B = G_C \cdot c, \text{ м}^3/\text{сут}$$

где  $c$  – выход биогаза из 1 кг сухого материала в сутки.

5. Годовая выработка электроэнергии при использовании биогаза в двигатель – генераторной установке:

$$W = \eta \cdot V_B \cdot C_B \cdot 365, \text{ тыс. кВт} \cdot \text{ч}$$

где  $\eta$  – КПД установки, %;

$C_B$  – выход биогаза из 1 кг сухого материала в сутки,  $\text{м}^3 \text{ кг}/\text{сут}$ .

6. Номинальная мощность двигатель – генератора:

$$P_H = \frac{K_3 \cdot W}{365 \cdot 24}, \text{ кВт}$$

где  $K_3 = 1$  – коэффициент запаса.

7. Расход электроэнергии на подогрев массы в биогазогенераторе в холодное время года (365/2 суток):

$$W_1 = m \cdot C \cdot \Delta T = \frac{\rho \cdot V_J \cdot C \cdot \Delta T \cdot 365}{860 \cdot 2}, \text{ тыс. кВт} \cdot \text{ч}$$

где  $\rho$  – плотность массы  $900 \text{ кг}/\text{м}^3$ ;

$C$  – теплоемкость массы  $1 \text{ ккал}/\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}$ ;

$\Delta T$  – подогрев массы в от  $5$  до  $20^\circ\text{C}$ ;  $1 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 1 \text{ ккал}/860$ .



Вопросы теории и инновационных решений при использовании возобновляемых источников энергии

8. Расход электроэнергии в год двигателями насосов и мешалок биогазогенератора:

$$W_2 = P_{уст} \cdot K_{исп} \cdot 8760, \text{ тыс. кВт}\cdot\text{ч}$$

где  $P_{уст}$  – установленная мощность оборудования, кВт;

$K_{исп}$  – коэффициент использования, 0,1.

9. Годовая экономия электроэнергии:

$$\Delta W = W - W_1 - W_2, \text{ тыс. кВт}\cdot\text{ч}$$

10. Капитальные затраты на установку:

$$K = P_H \cdot Z_{уд}, \text{ млн. руб}$$

где  $Z_{уд}$  – удельные затраты, млн. руб.

11. Годовой экономический эффект без учета дополнительных эксплуатационных расходов:

$$\mathcal{E} = \Delta W \cdot b, \text{ млн. руб}$$

где  $b$  – тариф на электроэнергию для производственных потребителей.

12. Срок окупаемости без учета дополнительных эксплуатационных расходов:

$$T_0 = \frac{K}{\mathcal{E}}, \text{ лет}$$

Исходные данные для расчета задачи № 2 по вариантам представлены в табл. 2.

**Пример расчета:**

**Исходные данные:**

- количество голов:  $n=1000$ ;
- масса сухого сбраживаемого материала в навозе одного животного за сутки,  $m=0,2$  кг;
- время цикла сбраживания при температуре  $20^{\circ}\text{C}$ ,  $t = 14$  суток;
- выход биогаза из 1 кг сухого мат-ла в сутки:  $C_{\text{в}}=0,5$  м<sup>3</sup> кг/сут
- КПД двигатель-генераторной установки,  $\eta = 30\%$ .

**Определить:**

- объем биогазогенератора  $V_G$ ;
- годовую экономию электроэнергии  $\Delta W$ ;
- срок окупаемости установки  $T_0$ .

**Решение:**

1. Объем жидкой массы, проходящей через биогазогенератор ежедневно:

$$V_j = \frac{0,2 \cdot 1000}{50} = 4 \text{ м}^3$$

2. Объем биогазогенератора:

$$V_G = 4 \cdot 14 = 56 \text{ м}^3$$

3. Масса сухого материала в полном биогазогенераторе:

$$G_G = 0,2 \cdot 14 \cdot 1000 = 2800 \text{ кг}$$

Таблица 2

Исходные данные для расчета

№ вар.	Кол-во голов, п	Время цикла сбраживания t, сут	Выход биогаза из 1 кг сухого мат-ла в сутки, $C_{в.}, м^3$ кг/сут	КПД, $\eta$ , %
1	500	12	0,2	50
2	550	15	0,5	45
3	600	13	0,4	40
4	650	14	0,3	35
5	700	13	0,2	30
6	750	12	0,3	35
7	800	15	0,4	45
8	850	14	0,5	50
9	900	12	0,5	30
10	950	13	0,4	40
11	1000	14	0,2	35
12	550	15	0,3	45
13	750	15	0,4	50
14	600	12	0,5	32
15	1000	13	0,2	30

Вопросы теории и инновационных решений при использовании возобновляемых источников энергии

4. Объем биогаза, выделяемого биогазогенератором за сутки:

$$V_B = 2800 \cdot 0,3 = 840 \frac{\text{м}^3}{\text{сут}}$$

5. Годовая выработка электроэнергии (тыс. кВт·ч) при использовании биогаза в двигатель – генераторной установке:

$$W = 0,3 \cdot 840 \cdot 5,55 \cdot 365 = 510,5 \text{ тыс. кВт} \cdot \text{ч}$$

6. Номинальная мощность двигатель – генератора:

$$P_H = \frac{1 \cdot 510,5}{365 \cdot 24} = 58,27 \text{ кВт}$$

7. Расход электроэнергии на подогрев массы в биогазогенераторе в холодное время года:

$$W_1 = \frac{900 \cdot 4 \cdot 1 \cdot 15 \cdot 365}{860 \cdot 2} = 11,5 \text{ тыс. кВт} \cdot \text{ч}$$

8. Расход электроэнергии в год двигателями насосов и мешалок биогазогенератора при их установленной мощности 20 кВт:

$$W_2 = 20 \cdot 0,1 \cdot 8760 = 17,52 \text{ тыс. кВт} \cdot \text{ч}$$

9. Годовая экономия электроэнергии:

$$\Delta W = 510,5 - 11,5 - 17,52 = 481,5 \text{ тыс. кВт} \cdot \text{ч}$$

10. Капитальные затраты на установку при удельных затратах:

$Z_{уд} = 2$  млн. руб за 1 кВт установленной мощности

$$K = 58,27 \cdot 2 = 116,54 \text{ млн. руб}$$

11. Годовой экономический эффект без учета дополнительных эксплуатационных расходов при тарифе на электроэнергию для производственных потребителей  $b = 50$  руб/кВт·ч:

$$Э = 481,5 \cdot 50 = 24,08 \text{ млн. руб.}$$

12. Срок окупаемости без учета дополнительных эксплуатационных расходов:

$$T_0 = \frac{116,54}{24,08} = 4,84 \text{ лет}$$

### ЗАДАЧА 3.

Определить объём биогаза, получаемого с помощью биогазогенератора, утилизирующего навоз коров, и обеспечиваемую им мощность.

#### Методика расчета

1. Возможный энергетический выход установки на биогаз (тепловая мощность) [3]:

$$N = \eta \cdot H_6 \cdot V_6, \text{ МДж/сут}$$

где  $\eta$  - КПД горелочного устройства = 0,6;

$H_6$  - удельная объёмная теплота сгорания биогаза, 20 МДж/м<sup>3</sup> (при парциальном давлении 101000 Па);

$V_6$  - объём получаемого биогаза, м<sup>3</sup>/сут.

2. Объём биогаза:

$$V_6 = c \cdot m_0, \text{ м}^3/\text{сут}$$

где  $c$  – выход биогаза из сухой массы (0,2-0,4), м<sup>3</sup>/кг;

$m_0$  - масса сухого сбраживаемого материала, получаемого со всего стада, кг/сут;

3. Объём жидкой массы, заполняющей биогазогенератор:

$$V_ж = m_0 / \rho_м, \text{ м}^3/\text{сут}$$

где  $\rho_м$  - плотность сухого материала, распределённого в массе, 50 кг/м<sup>3</sup>.

4. Объём биогазогенератора:

$$V_г = V_ж \cdot t_г, \text{ м}^3$$

где  $V_ж$  - скорость подачи сбраживаемой массы в генератор,

м<sup>3</sup>/сут;

$t_r$  - время пребывания очередной порции в генераторе, сут.

5. Энергетический выход установки для чистого метана, входящего в биогаз:

$$N = \eta \cdot H_6 \cdot V_6 \cdot f_m, \text{ МДж/сут}$$

где  $H_6$  - удельная теплота сгорания метана при нормальных условиях (28МДж/м<sup>3</sup>);

$f_m$  - доля метана в биогазе (0,7).

Данные для расчета задачи № 3 по вариантам приведены в табл.

3.

**Пример расчета:**

**Исходные данные:**

- количество голов  $n = 20$ ;
- время пребывания очередной порции в генераторе  $t_r = 16$  суток;  $t = 25$  °С;
- скорость подачи сухого сбраживаемого материала от одного животного  $V_m = 3$  кг/сутки;
- выход биогаза из сухой массы  $C = 0,24$  м<sup>3</sup>/кг;
- КПД горелочного устройства  $\eta = 0,68$ ;
- доля метана в биогазе  $f = 0,75$ ;
- плотность сухого материала, распределённого в массе  $\rho = 50$  кг/м<sup>3</sup>;
- удельная теплота сгорания метана при нормальных условиях  $H_6 = 28$  МДж/м<sup>3</sup>.

**Определить:**

- суточный выход биогаза  $V_6$ ;
- объём биогазогенератора  $V_r$ ;
- тепловую мощность  $N$ , Вт.

Таблица 3

Исходные данные для расчета

№ вар.	Кол-во голов, n	Скорость подачи, $V_m$ , кг/сут	Выход биогаза, $C$ , м <sup>3</sup> /кг	Содержание ме- тана в биогазе, f	Время преб-я порции, сутки, $t_r$
1	6	3	0,24	0,8	18
2	12	2	0,3	0,75	16
3	16	2,5	0,2	0,7	20
4	21	3	0,24	0,75	12
5	27	2,5	0,3	0,8	14
6	32	2	0,35	0,75	8
7	40	2	0,4	0,7	10
8	45	2,5	0,2	0,75	12
9	55	3	0,24	0,8	16
10	58	2	0,3	0,75	18
11	60	2,5	0,35	0,7	12
12	65	3	0,4	0,75	14



13	70	2	0,2	0,8	18
14	75	2,5	0,24	0,75	13
15	90	3	0,3	0,7	15



**Решение:**

1. Масса сухого сбраживаемого материала, получаемого со всего стада:

$$m_0 = 3 \cdot 20 = 60 \text{ кг/сутки};$$

2. Суточный объём жидкой массы составляет:

$$V_{\text{ж}} = 60/50 = 1,2 \text{ м}^3/\text{сут.}$$

3. Объём биогазогенератора:

$$V_{\text{г}} = 16 \cdot 1,2 = 19,2 \text{ м}^3$$

4. Суточный выход биогаза

$$V_{\text{б}} = 0,24 \cdot 60 = 14,4 \text{ м}^3/\text{сут}$$

5. Тепловая мощность  $N$ , Вт:

$$N = 0,68 \cdot 28 \cdot 14,4 \cdot 0,75 = 205 \text{ МДж/сут.} = 56,94 \text{ кВт} \cdot \text{ч/сут}$$

### ЗАДАЧА 4

В метантеке осуществляется сбраживание навоза из коровника [2].

**Методика расчета**

1. Объем навозоприемника:

$$V_{\text{н}} = k \cdot m_{\text{сут}} \cdot t_{\text{сб}} / \rho_{\text{н}}, \text{ м}^3$$

где  $k$  – коэффициент, учитывающий изменение плотности навоза, в зависимости от исходной влажности ( $k = 1,5$ );

$m_{\text{сут}}$  – суточный выход навоза с начальной влажностью  $\omega$  (около 92%), кг/сут;

$$\omega = m_{\text{в}} / m_{\text{сут}} = (m_{\text{сут}} - m_{0\text{сут}}) / m_{\text{сут}},$$

$m_{0\text{сут}} = m_{\text{сут}} (1 - \omega)$  – суточный выход сухого сбраживаемого материала, кг/сут;

$\rho_{\text{н}}$  – плотность навоза, кг/м<sup>3</sup> ( $\rho_{\text{н}} = 1020 \text{ кг/м}^3$ );

$t_{\text{сб}}$  – время накопления навоза, продолжительность сбраживания в метантеке (8-20), сут.

2. Объем метантен- ка:

$$V_M = m_{0\text{сут}} \cdot t_{\text{об}} \cdot \nu, \text{ м}^3$$

где  $\nu$  – удельный вес жидкой массы на 1 кг сухого сбраживаемого материала (0,02 м<sup>3</sup>/кг).

3. Суточный выход биогаза:

$$B_6 = m_{0\text{сут}} \cdot b, \text{ м}^3/\text{сут},$$

где  $b$  – удельный выход биогаза, приходящийся на 1 кг переработанного навоза (0,2-0,4), м<sup>3</sup>/кг.

4. Общая тепловая энергия получаемого биогаза:

$$Q_{\text{общ}} = B_6 \cdot Q_6, \text{ МДж/сут},$$

где  $Q_6 = 20\text{--}25$  МДж/м<sup>3</sup> – теплота сгорания биогаза.

5. Расход теплоты на нагрев жидкой массы в метантенке с  $t_1 = 15^\circ\text{C}$  до  $t_2 = 35^\circ\text{C}$  (мезофильный режим).

$$Q_n = c_n \cdot m_{0\text{сут}} \cdot \nu \cdot \rho_n \cdot (t_2 - t_1) / \eta, \text{ МДж/сут},$$

где  $c_n$  – теплоемкость жидкой массы (0,00406 МДж/(кг·°C));

$\eta$  – КПД нагревательного устройства (0,7).

6. Расход теплоты на собственные нужды:

$$Q_{\text{с.н}} = 1,06 Q_n, \text{ МДж/сут},$$

где 1,06 – коэффициент, учитывающий тепловые потери.

7. Общее количество биогаза, идущего на собственные нужды:

$$B_{\text{с.н}} = Q_{\text{с.н}} / Q_6, \text{ м}^3/\text{сут}.$$

8. Выход товарного биогаза:

$$B_{\text{б.т}} = B_6 - B_{\text{с.н}}, \text{ м}^3/\text{сут}.$$

9. Коэффициент расхода биогаза на собственные нужды (0,15–0,50):

$$\phi_{\text{б}} = V_{\text{с.п.}} / V_{\text{б}}$$

10. Объем газгольдера:

$$V_{\Gamma} = t_{\text{н.б}} V_{\text{б.т.}}, \text{ м}^3,$$

где  $t_{\text{н.б}}$  – время накопления биогаза, сут.

Мокрые газгольдеры низкого давления имеют вместимость 500–3000 м<sup>3</sup> (рис.2).

Недостаток: опасность замораживания зимой, это вызывает необходимость в их обогреве или применение незамерзающей жидкости.

Достоинства:

– поддерживают постоянное давление, обусловленное весом колпака;

– простота и надежность.

11. Давление в газгольдере низкого давления определяется весом колокола или груза:

$$p = (mg)/S, \text{ Па}$$

где  $m$ ,  $S$  – масса и площадь горизонтальной проекции колокола или груза соответственно.

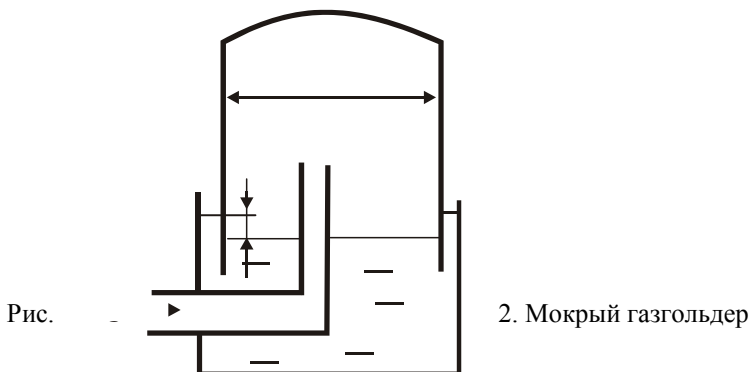
12. Объем газгольдера:

$$V_2 = mRT / p, \text{ м}^3$$

где  $m$  – масса биогаза, кг;

$R$  – газовая постоянная биогаза, 245 Дж/(кг·°C);

$T$  – температура биогаза, °C.



13. Перепад жидкости снаружи и под колоколом в мокром газгольдере:

$$h = p/(\rho g), \text{ м}$$

Исходные данные для расчета задачи № 4 по вариантам приведены в табл. 4.

**Пример расчета:**

**Исходные данные:**

- влажностью  $\omega = 92\%$ ;
- расход  $m_{\text{сут}} = 45 \text{ кг/сут}$ ;
- время накопления навоза, продолжительность сбраживания в метантенке  $t_{\text{сб}} = 10 \text{ сут}$ ;
- удельный вес жидкой массы на 1 кг сухого сбраживаемого материала  $\nu = 0,02 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;
- удельный выход биогаза  $b_{\text{уд}} = 0,4 \text{ м}^3/\text{кг}$  из сухой биомассы;
- теплота сгорания биогаза  $Q_6 = 24 \text{ МДж/м}^3$ ;
- температура нагрева жидкой массы в метантенке от  $t_1 = 12,5^\circ\text{C}$  до  $t_2 = 35^\circ\text{C}$ .
- теплоемкость жидкой массы  $c_{\text{н}} = 0,00406 \text{ МДж/кг}\cdot^\circ\text{C}$ ;
- КПД нагревательного устройства ( $\eta = 0,7$ ).

Вопросы теории и инновационных решений при использовании  
 возобновляемых источников энергии

Таблица 4

Исходные данные для расчета

№ вар.	Сут. выход навоза с нач. влажностью $\omega$ , $m_{\text{сут}}$ , кг/сут	Нач. темп-ра нагрева жидк. массы в метантенке, $t_1$ , °C	Удельный выход биогаза, $b_{\text{уд}}$ , м <sup>3</sup> /кг	Время накопления навоза, $t_{\text{сб}}$ , сут.	Теплота сгорания биогаза $Q_b$ , МДж/м <sup>3</sup>
1	40,5	10,5	0.2	8	25
2	41	11	0.25	9	20
3	41,5	11,5	0.3	10	21,5
4	42	12	0.35	11	23,5
5	42,5	12,5	0.4	12	20,5
6	43	13	0.2	13	22,5



Вопросы теории и инновационных решений при использовании  
возобновляемых источников энергии

7	43,5	13,5	0.3	15	24
8	44	14	0.35	14	22
9	44,5	14,5	0.25	16	21
10	45	15	0.4	17	23
11	45,5	10,5	0.2	18	20
12	46	11	0.3	19	21
13	46,5	10	0.25	20	20,5
14	47	12	0.3	12	23
15	47,5	13	0.35	15	22

**Определить:**

- требуемый рабочий объем метантенка,  $Им$ ;
- выход товарного биогаза,  $В_{б.т.}$ .

**Решение:**

1. Объем навозоприемника:

$$И_n = 1,5 \cdot 45 \cdot 10 / 1020 = 0,66 \text{ м}^3$$

2. Суточный выход сухого сбраживаемого материала:

$$m_{\text{сут}} = 45 \cdot (1 - 0,92) = 3,6 \text{ кг/сут}$$

3. Объем метантенка:

$$И_m = 3,6 \cdot 10 \cdot 0,02 = 0,72 \text{ м}^3$$

4. Суточный выход биогаза:

$$В_b = 3,6 \cdot 0,4 = 1,44 \text{ м}^3/\text{сут}$$

5. Общая тепловая энергия получаемого биогаза:

$$Q_{\text{общ}} = В_b \cdot Q_b = 1,44 \cdot 24 = 34,56 \text{ МДж/сут}$$

6. Расход теплоты на нагрев жидкой массы в метантенке:

$$Q_n = 0,00406 \cdot 3,6 \cdot 0,02 \cdot 1020 \cdot 22,5 / 0,7 = 9,58$$

$$\text{МДж/сут}$$

7. Расход теплоты на собственные нужды:

$$Q_{с.н} = 1,06 \cdot 9,58 = 10,16 \text{ МДж/сут}$$

8. Общее количество биогаза, идущего на собственные нужды:

$$B_{с.н} = 10,16 / 24 = 0,42 \text{ м}^3/\text{сут}$$

9. Выход товарного биогаза:

$$B_{б.т} = 1,44 - 0,42 = 1,02 \text{ м}^3/\text{сут}.$$

## ЛИТЕРАТУРА

1. Галкина Н.И. Энергосбережение в системах климатизации. Возобновляемые источники энергии: учеб. пособие /Н.И. Галкина; Донской гос. техн. ун-т. –Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2017. - 98с.
2. Горяев А.А. Возобновляемые источники энергии: учеб. пособие /А.А. Горяев, Г.А. Шепель. – Архангельск: САФУ, 2015. – 93 с;
3. Олешкевич, М.М. Нетрадиционные источники энергии: учебно-методическое пособие для студентов высших учебных заведений в 2 частях /М.М. Олешкевич (Часть 2). – Минск: БНТУ, 2007. – 45 с.
4. Е.Е. Новгородский [и др.]. Оптимизация систем использования вторичных тепловых ресурсов // Газовая промышленность. – 1996. – № 6. – С. 34-36.