



# **ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ** ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

## ТРУДЫ

*В О С Ъ М О Й  
МЕЖДУНАРОДНОЙ  
ШКОЛЫ-СЕМИНАРА  
МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ  
И СПЕЦИАЛИСТОВ*

10 - 13 октября 2016 г.  
Москва

Москва  
Издательский дом МЭИ  
2016

УДК 620.92.004.14 (063)  
ББК 31.15я5  
Э 653



**Мероприятие проводится при финансовой поддержке РФФИ  
грант № 16-38-10417/16**

**Э 653 Энергосбережение — теория и практика:** Труды Восьмой Международной школы-семинара молодых ученых и специалистов. (Москва, 10—13 октября 2016 г.) — М.: Издательский дом МЭИ, 2016. — XXX с.

Публикуемые доклады содержат результаты исследований молодых ученых и преподавателей из многих регионов России, а также из-за рубежа по вопросам теории и практики энергосбережения, касающихся оптимизации систем генерации энергии и систем потребления ТЭР различных видов в промышленности и ЖКХ, термодинамического анализа энергогенерирующих систем, использования нетрадиционных источников энергии, использования энергетического потенциала бытовых отходов и местных топлив, получения дизельного топлива, теплонасосных установок, интенсификации процессов тепло- и массообмена, совершенствования механизмов реализации энергосберегающего потенциала в промышленности и ЖКХ.

**УДК 620.92.004.14 (063)  
ББК 31.15я5**

© Национальный исследовательский университет «МЭИ», 2016

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕПЛОТЫ ВОДЫ ЧЕРНОГО МОРЯ ДЛЯ НУЖД ГВС ПРИ ПОМОЩИ ТЕПЛОВОГО НАСОСА

### АННОТАЦИЯ

В последние десятилетия нетрадиционные источники энергии все больше и больше привлекают внимание общества. Одним из таких источников является море и морская вода. В статье будет рассмотрен такой нетрадиционный источник энергии как теплота морской воды. В качестве примера будет рассмотрена утилизации низкопотенциальной энергии при помощи теплового насоса, работающего для нужд горячего водоснабжения с мая по октябрь включительно для пансионата, рассчитанного на 400 человек.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия нетрадиционные источники энергии все больше и больше привлекают внимание общества. Одним из таких источников является море и морская вода. В данной работе в качестве источника низкопотенциальной энергии рассмотрено Черное море. Замечено, даже в самые невероятные морозы море не только не замерзло (температура замерзания морской воды  $-1,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), но и сохраняло даже плюсовую температуру. Это явление не могло не остаться незамеченным энергетиками, и возможность использования данного источника энергии стала актуальным вопросом. Самым популярным и ныне практикуемым стало решение о схеме, состоящей из лежащих на дне труб, совершающих теплообмен с морской водой, теплового насоса для перекачки промежуточного теплоносителя и теплообменника для передачи теплоты в коммуникации для хозяйственно-бытовых нужд.

Тепловой насос — это устройство для переноса тепловой энергии от источника низкопотенциальной тепловой энергии (с низкой температурой) к потребителю (теплоносителю) с более высокой температурой. Водяные тепловые насосы в качестве теплообменной среды используют теплоноситель в жидком агрегатном состоянии. Источником энергии может служить жидкая среда, чья температура выше температуры окружающей среды, в которой аккумулирована энергия. Примерами подобных источников, помимо морской воды, могут служить незамерзающий водоем, грунтовые воды. Недостатком теплового насоса является то, что для его работы требуется закладка контуров подземных коллекторов, имеющих существенную протяженность. Поэтому установка теплового насоса обычно равна или дороже стоимости теплообменного аппарата и сопутствующего оборудования.

Теплообменные аппараты — это устройства, предназначенные для нагрева, охлаждения или изменения агрегатного состояния теплоносителя. В

теплообменнике высокотемпературный теплоноситель передает теплоту низкотемпературному теплоносителю. Если передача теплоты происходит при изменении агрегатного состояния какого-либо теплоносителя, то его температура в процессе теплопередачи может оставаться постоянной. В остальных случаях температуры теплоносителей в теплообменнике изменяются.

Все это дает в сумме самокупаемый проект, который не требует высоких затрат на обслуживание и который будет работать постоянно, независимо и без перебоев.

### 2. ЧЕРНОЕ МОРЕ

Черное море расположено между  $40^{\circ}55'$  и  $46^{\circ}32'$  северной широты и между  $27^{\circ}27'$  и  $41^{\circ}42'$  восточной долготы. На северо-востоке Черное море соединяется с Азовским морем Керченским проливом. На юге узким проливом Босфор оно соединяется с Мраморным морем. Площадь поверхности Черного моря равна 420 тыс. км<sup>2</sup>. Глубинная структура Черного моря весьма нетипична (рис. 1). Возле берега относительно неглубокое дно, чуть подальше идет резкое увеличение уровня дна и начинается глубоководная впадина.

Северное побережье Черного моря (исключая Крым) относительно мелководное. Поэтому при максимальной глубине моря 2212 м его средняя глубина весьма значительна и составляет около 1300 м. Дно Черноморской впадины достаточно ровное. Площадь бассейна Черного моря с глубинами более 2000 м превышает 30 % его общей площади. Площадь с глубинами менее 200 м занимает всего около 27 % общей площади поверхности Черного моря, причем большая часть мелководий приходится на его северо-западную часть.

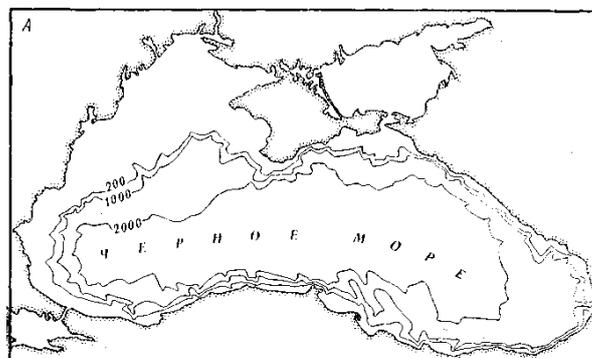


Рис. 1. Глубинная структура Черного моря

В табл. 1 представлены данные по температуре, солености и концентрации кислорода и сероводорода для разных глубин.

Таблица 1. Параметры воды в Черном море на разных глубинах

Глубина, м	Температура воды, °С		Соленость, ‰		Концентрация в воде, мг/л	
	Лето	Зима	Лето	Зима	Кислород	Сероводород
0	22,1	7,1	18,2	17,4	5,6	0
10	21,2	6,8	18,3	17,6	6,7	0
20	15,7	6,7	18,4	17,8	7,4	0
30	9,3	7,6	18,9	18,1	5,8	0
50	7,7	8,1	19,8	18,4	5,4	0
100	8,1	8,5	20,6	20,2	0,8	0
150	8,4	—	21,0	20,9	0,2	0,15
200	8,6	—	21,3	—	0,05	0,75
500	8,9	—	22,0	—	0	5,15

Таблица показывает, что в районе побережья, где глубина не превышает 10—15 м температура воды летом особенно высокая по сравнению с большими глубинами. Мы можем получить и использовать эту энергию путем установки одного из самых лучших преобразователей низкопотенциальной энергии — теплового насоса.

### 3. ТЕПЛОВЫЕ НАСОСЫ

#### 3.1. Термодинамический цикл теплового насоса

Тепловой насос по принципу действия представляет собой холодильную машину, в которой процесс идет наоборот. Как и в холодильной машине, тепловой насос содержит испаритель, конденсатор и контур, где идет термодинамический цикл. Основные типы термодинамических циклов — абсорбционный и пароконденсационный. Если в холодильной машине основной целью является производство холода путем отбора теплоты из какого-либо объема испарителем, а конденсатор осуществляет сброс теплоты в окружающую среду, то в тепловом насосе картина обратная. Конденсатор является теплообменным аппаратом, выделяющим теплоту для потребителя, а испаритель — теплообменным аппаратом, утилизирующим низкопотенциальную теплоту. Термодинамический цикл теплового насоса в  $T-S$ -диаграмме представлен на рис. 2.

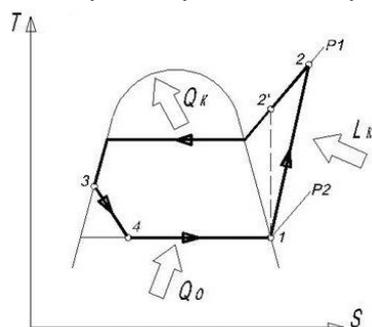


Рис. 2. Термодинамический цикл идеального теплового насоса в  $T-S$ -диаграмме

Точка 1 на схеме соответствует состоянию сухого насыщенного пара, образовавшегося в результате полного испарения жидкой фазы хладагента в испарителе теплового насоса. Далее происходит сжатие хладагента в компрессоре (процесс 1—2), при этом давление и температура хладагента резко повышаются. В идеальном случае процесс сжатия проходит изотермически, однако в реальности это невозможно, и реальный процесс пойдет по наклонной до точки 2'. Перегретый пар в состоянии 2' с достаточно высокой температурой подается в конденсатор, где сначала охлаждается по изобаре до сухого насыщенного состояния и затем конденсируется до жидкого состояния и проходит по кривой насыщения (точка 3). При этом он отдает суммарную тепловую энергию, величина которой равна сумме, полученной при кипении хладагента в испарителе энергии и энергии на работу по сжатию хладагента в реальном компрессоре. Затем жидкий хладагент проходит через дросселирующий клапан, при этом снижается давление и, соответственно, температура хладагента (процесс 3—4). Процесс дросселирования проходит практически адиабатно, поэтому процесс 3—4 считают изэнтропическим. При этом хладагент частично испаряется. Далее хладагент (с температурой ниже, чем у низкопотенциального источника) поступает в испаритель, где кипит, отбирая теплоту от низкопотенциального источника (процесс 4—1).

#### 3.2. Достоинства и недостатки теплового насоса

Основными достоинствами теплового насоса являются:

1. Экономичность. Тепловой насос использует введенную в него энергию эффективнее, чем аналогичный ему по мощности котельный агрегат. Величина КПД у него весьма высока, однако в случае теплового насоса его истинным КПД будет являться эксергетический КПД. Между собой тепловые насосы сравнивают по коэффициенту трансформации тепла, показывающему отношение получаемого тепла к затраченной энергии. К примеру, коэффициент трансформации, равный 3,5, означает, что, подведя к машине 1 кВт, на выходе мы получим 3,5 кВт тепловой мощности, т.е. 2,5 кВт мы получаем из природного источника.

2. Повсеместность применения. Источник рассеянного тепла можно обнаружить в любом регионе, в котором проживают люди.

3. Экологичность. Агрегат не сжигает топливо, значит, не образуются вредные окислы, поэтому в области вокруг него на почве нет следов вредных примесей и их взаимодействия с окружающей средой. Применяемые в тепловых насосах фреоны по ГОСТу не содержат разрушающих озоновый слой веществ.

4. Универсальность. Преимуществом тепловых насосов является возможность переключения с режима отопления зимой на режим кондиционирования летом, так как конструктивных отличий у

теплого насоса и холодильной машины практически нет.

5. Безопасность. В насосе отсутствует пожароопасное топливо, нет взрывоопасных смесей, опасных газов, нет нагрева до температур, способных вызвать воспламенение горючих материалов. Остановки агрегата не приводят к его поломкам или замерзанию жидкостей. По сути, тепловой насос опасен не более, чем холодильник. А утечки являются универсальной для всех приборов, работающих с жидкостью и газами, опасностью.

К недостаткам тепловых насосов следует отнести большую стоимость установленного оборудования, необходимость сложного и дорогого монта-

жа внешних подземных или подводных теплообменных контуров. Недостатком воздушных тепловых насосов является более низкий коэффициент преобразования тепла, связанный с низкой температурой кипения хладагента во внешнем «воздушном» испарителе. Общим недостатком тепловых насосов является относительно низкий диапазон рабочих температур.

#### 4. РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ УСТАНОВКИ

Подбор исходных данных основывается на принципиальной схеме системы, представленной на рис. 3.

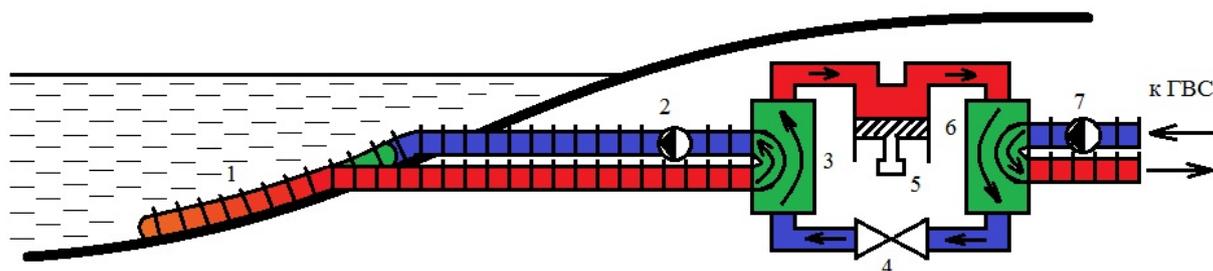


Рис. 3. Принципиальная схема системы

На схеме цифрой 1 обозначена труба, которая идет по дну и отбирает тепло из морской воды. Теплоносителем в этом контуре является вода. Цифрами 2 и 7 обозначены насосы, поддерживающие скорость воды в соответствующих контурах. Цифрами 3 и 6 обозначены испаритель и конденсатор соответственно, а 4 и 5 — дроссель и компрессор. Через эти четыре элемента проходит промежуточный теплоноситель фреон, отдающий в конденсаторе тепло конечному потребителю, а именно воде в системе ГВС.

*Данные по потребителю.* Учитывая изменение температуры моря по месяцам в течение года, в качестве потребителя будет выступать система ГВС, покрывающая потребности пансионата для отдыха в период с мая по октябрь, рассчитанного на 400 человек.

Параметры системы ГВС: требуемые температуры: горячей воды: 65 °С, холодной воды: 15 °С. На основании СП 2.04.01-85 принимаем среднесуточные расходы горячей воды и общий расход воды 140 и 230 л в сутки.

Расстояние от побережья до моря принимаем 85 м, так как слишком близкое расположение к морю приводит к обдуванию пансионата холодным утренним приморским ветром, а слишком далекое расположение будет неудобно для отдыхающих.

*Данные по Черному морю.* Также в ходе расчета и подбора данных стоит учесть, как прогревается море дном в летний период. В основном солнцем нагреваются приблизительно лишь первые 10—15 м глубины моря, а с 50 м и глубже температурный фон примерно равномерен для всех глубин. Поэто-

му в качестве рабочей глубины пролегания труб берем интервал от 5 до 12 м (рис. 4).



Рис. 4. Подробная карта Феодосии

Исходя из карты видно, что требуемый интервал глубин находится в области от 200—400 до 800—1000 м от побережья. Если принимать среднее значение для залива, равное примерно 315 м, так как пансионат может быть расположен в пригороде, то суммарная длина коммуникационного трубопровода, соединяющего подвал пансионата, в котором будет расположен тепловой насос, составляет 400 м. Причем длина подземного участка должна быть как минимум до уровня глубины не меньше 2 м, так как если коммуникационные трубы расположить на земле, то это приведет к возможному закрытию пляжа, неэстетичному виду, обдуву холодным морским ветром утром и более быстрому износу изоляции.

*Данные по тепловому насосу.* В качестве хладагента выбираем фреон R-42b, так как он имеет относительно высокую температуру кипения и не представляет высокой опасности для окружающей среды. Рабочие температуры: 70 °С в конденсаторе и 0 °С в испарителе.

## 5. ЭКОНОМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ

Для начала рассчитаем прибыль с системы, зная количество и стоимость затраченной для работы системы и полученной в ее результате энергии. Для этого нам необходимо знать количество потребляемой электроэнергии с ее стоимостью, количество выработанной тепловой энергии и ее стоимость.

Электроэнергия: 1,74 руб/(кВт·ч) по тарифу с 01.07.2016 как исполнителю коммунальных услуг, которые рассчитываются с ресурсоснабжающей организацией по общему расчетному средству учета и приобретают электрическую энергию для предоставления коммунальных услуг собственникам и пользователям жилых помещений.

Тепловая энергия: 1817,66 руб/ГКал для Феодосии.

Расходы, предполагаемые на этапах монтажа и ввода в эксплуатацию системы:

### 1. Подготовительные мероприятия:

1.1. Анализ и расчистка необходимого участка морского дна: 600 000 руб.

1.2. Реконструкция и расчистка подвала пансионата под тепловой насос и выделение под него площади: 250 000 руб.

2. Заказ инвентаря системы (вместе с доставкой):

2.1. Испаритель и конденсатор — 90 000 и 70 000 руб. соответственно.

2.2. Компрессор, дроссель и соединяющие тепловой насос трубы — 90 000 руб.

2.3. Суммарная стоимость стальных труб 114x3,5 — 450 000 руб.

2.4. Бетонные плиты вместе с установкой на них держателей трубы — 1 450 000 руб.

### 3. Монтажные мероприятия:

3.1. Бурение горизонтальной скважины длиной 315 м — 550 000 руб.

3.2. Закладка бетонных плит (вместе с арендой корабля и рабочих) — 150 000 руб.

3.3. Монтаж донных труб — 700 000 руб.

3.4. Подготовка к вводу системы в работу (проверка работоспособности и другие мероприятия) — 25 000 руб.

Суммарная стоимость всех базовых мероприятий равна 4 425 000 руб. Также к каждому году работы системы прибавляем 2 % стоимости всех базовых мероприятий на обслуживание и возможный ремонт системы.

Суммарные затраты электроэнергии на работу насосов и компрессора равны 4150 Вт. Таким образом, можно посчитать окупаемость системы, учитывая, что период ее работы с мая по октябрь включительно, составляет 184 дня:

$$D = 136000 \cdot 1816,33 \frac{3600}{4,187 \cdot 10^9} = 212,38;$$

$$P_{\text{обс}} = 4,15 \cdot 1 \cdot 1,74 = 7,22;$$

$$n = \frac{4\,425\,000 (1 + 0,02n)}{(D - P_{\text{обс}}) 24 \cdot 184};$$

$$n = \frac{4\,425\,000 (1 + 0,02n)}{((D - P_{\text{обс}}) 24 \cdot 184 - 4\,425\,000 \cdot 0,02)}$$

$n = 5,44$  года работы системы.

График окупаемости и перспективы получения прибыли в будущем времени показаны на рис. 5.

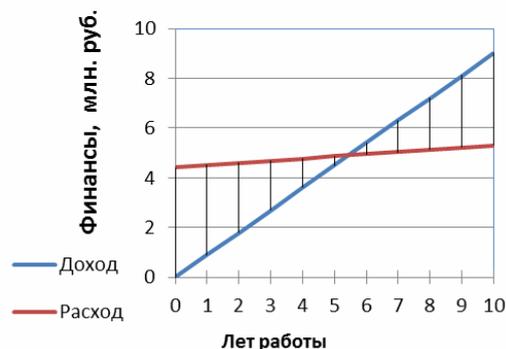


Рис. 5. Сопоставление суммарного дохода и расхода системы

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведен расчет системы отбора низкопотенциальной энергии из вод Черного моря для нужд горячего водоснабжения пансионата в теплый период года, когда температура моря выше 15 градусов. Проведен расчет основных параметров главных элементов системы: испарителя, конденсатора, донных труб, работа которых напрямую зависит от местных особенностей. Расчет окупаемости системы показал, что система самоокупаемая, однако 5 лет — это большой срок, что обусловлено спецификой работы. Оребренный кожухотрубный теплообменник оказался прекрасным выбором для таких элементов как испаритель и конденсатор. Испаритель оказался больше конденсатора, что обусловлено рабочими температурами каждого теплообмен-

ника и разными фазовыми переходами. Гидравлические потери не оказывают сильного влияния, так как из-за относительно малого расхода воды в контуре ГВС и в контуре донных труб у нас невысокие мощность и высота подъема жидкостей. Экономический расчет показывает, что наибольшие затраты будут на донные трубы, так как это работа под водой над большим участком дна.

### СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

Д — почасовой доход системы, руб/ч;

$R_{обс}$  — почасовой расход на обслуживание системы, руб/ч.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Пластинчатые** теплообменники: методические указания / С.С. Амирова, А.С. Приданцев, А.Т. Тухватова, А.А. Спгдеев. Нижнекамск: Нижнекамский химико-технический институт (филиал) КГТУ, 2010.
2. **Бакластов А.М., Горбенко В.А., Удыма П.Г.** Проектирование, монтаж и эксплуатация теплообменных установок: учебное пособие для вузов; под редакцией А.М. Бакластова. М.: Энергоиздат, 1981.
3. **Сорокин Ю.И.** Черное море: Природа, ресурсы. М.: Наука, 1982.
4. **Теплообменные** аппараты: учебное пособие / Б.Е. Байгалиев, А.В. Щелчков, А.Б. Яковлев, П.Ю. Гортышов. Казань: Из-во Казанского государственного университета, 2012. — 180 с.
5. **Ширяев Ю.Н., Гусев К.В., Арсеньев И.А.** Расчет горизонтального кожухотрубного конденсатора холодильной установки. СПб.: СПбГУНиПТ, 2009.
6. **Кухлинг Х.** Справочник по физике: пер. с нем. М.: Мир, 1982.
7. **Быков А.В., Калнинь И.М., Крузе А.С.** Холодильные машины и тепловые насосы. М.: Агропромиздат, 1988.

## ОЦЕНКА ПРИРОДООХРАННОГО ЭФФЕКТА ПРИ УТИЛИЗАЦИИ БИОГАЗА ОТ ОРГАНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ ЖИВОТНОВОДСТВА

### АННОТАЦИЯ

Целью данной работы является оценка природоохранного эффекта при утилизации биогаза от органических отходов животноводства. Расчет и анализ выбросов биогаза для разных климатических зон от незадействованных отходов животноводства. Расчет и подбор утилизирующего оборудования и оценка экономических показателей.

В данной работе представлены расчеты максимального выхода биогаза от единицы отходов животноводства. Годичный выход от незадействованных отходов для пяти климатических зон. Также представлен эквивалент тепловой энергии, которая будет утеряна при отсутствии утилизации отходов в биогазовых реакторах, и выброс газа, влияющих на парниковый эффект. Рассчитано и подобрано оборудование для утилизации объема биогаза на основе ГПУ. Оценен срок окупаемости внедренной технологии.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Биогазовые установки относятся к источникам экологически чистой и возобновляемой энергии. Получаемый на выходе биометан имеет практически одинаковый состав, что и природный газ, добываемый из недр Земли. Содержание метана после освобождения от оксида углерода составляет 90—50 %. Помимо источника тепловой и электроэнергии биогазовые установки также способны производить высококачественные удобрения.

В последние годы на Западе значительно возросла заинтересованность к процессам производства биогаза — это проявляется не только в возрастающем количестве планирующихся и строящихся биогазовых установок, но и в заинтересованности все большего числа фермеров, коммунальных хозяйств, предприятий, политиков и частных хозяйств, которые внимательно наблюдают за развитием этого сектора. Энергетическая отрасль уже также не относится с такой осторожностью к децентрализации производства благодаря строительству биогазовых установок.

### 2. АНАЛИЗ ОБЩИХ СВЕДЕНИЙ

#### 2.1. Механизм образования биогаза

Биогаз возникает вследствие разложения органической субстанции бактериями. Разные группы бактерий разлагают органические субстраты, состоящие преимущественно из воды, белка, жира, углеводов и минеральных веществ на их первичные составляющие — углекислый газ, минералы и воду. Как продукт обмена веществ при этом образовывается смесь газов, получившая название биогаз. Горючий метан составляет от 5 до 85 % и является основным компонентом биогаза, точнее, основным энергосодержащим компонентом.

Такой естественный процесс возможен лишь в анаэробных условиях, т.е. только при отсутствии кислорода. Если в такой среде присутствует кислород, то органику разлагают другие бактерии; в таком случае процесс будет называться компостированием.

По большому счету из любой органики в условиях отсутствия кислорода можно добыть биогаз. Бактерии должны лишь иметь достаточное количество времени, чтобы справиться с материалом, который сложно разлагается, каковым могут являться, например одревесневшие растения. Этот процесс целенаправленно используют при очистке сточных вод, чтобы разложить органические соединения вредных веществ. Однако некоторые субстраты оказались наиболее подходящими для такого процесса. Текучие, кашеобразные и вообще субстраты, задерживающие значительное количество воды, наилучшим образом подходят для процесса брожения, поскольку в них можно легко выдержать анаэробные условия, в то время как материал из больших цельных кусков древесины лучше разлагать компостированием либо иным путем.

#### 2.2. Благоприятная среда обитания бактерий

**Влажная среда.** Метановые бактерии могут жить и размножаться, когда субстраты в достаточной мере растворены в воде (в составе минимум 50 % воды). В отличие от аэробных бактерий, дрожжей и грибов они не могут существовать в твердой фазе. Поэтому для так называемых технологий твердых процессов есть необходимость в увлажнении материала, хотя вначале несущественно, является ли субстрат изначально влажным или стал таковым путем орошения либо смешивания.

**Исключение проникновения воздуха.** В анаэробном процессе расщепления органических субстратов принимает участие целый ряд микроорганизмов. Около 50 % участвующих бактерий являются аэробными или факультативно аэробными и требуют либо хорошо переносят кислород. Только метановые бактерии являются исключительно анаэробными. Если в субстрате еще присутствует кислород, как например, в свежем навозе, то аэробные бактерии в первую очередь используют его. Это происходит на первом этапе процесса образования биогаза. Поэтому небольшое количество кислорода, который проникает при целенаправленном нагнетании воздуха для очистки от серы или же при открытии смотровых отверстий, не является вредным.

Намного значительнее окислительно-восстановительный потенциал. Он представляет собой сте-

пень готовности ионов принимать электроны. Для роста анаэробных бактерий этот потенциал должен находиться на очень низком уровне ( $-0,1V$ ). Поскольку кислород имеет высокий окислительно-восстановительный потенциал ( $+1,78$ ), то это вначале вредит анаэробным бактериям. Однако, если имеется достаточно веществ с низким окислительно-восстановительным потенциалом, то анаэробный процесс может происходить и в присутствии кислорода.

**Исключение попадания света.** Хотя свет и не является для бактерий смертельным, он замедляет процесс. Исключить влияние света на процесс на практике можно с помощью светонепроницаемой крышки.

**Равномерная температура.** Метановые бактерии проявляют свою жизнедеятельность в пределах температуры  $0—70$  °С. Если температура выше, они начинают гибнуть за исключением нескольких штаммов, которые могут жить при температуре среды до  $90$  °С. При минусовой температуре они выживают, но прекращают свою жизнедеятельность. В литературе как нижнюю границу температуры указывают  $3—4$  °С.

Скорость процесса брожения очень зависит от температуры (рис. 1). Принципиально важно: чем выше температура, тем быстрее происходит разложение и тем выше производство газа. Таким образом, сокращается время разложения.

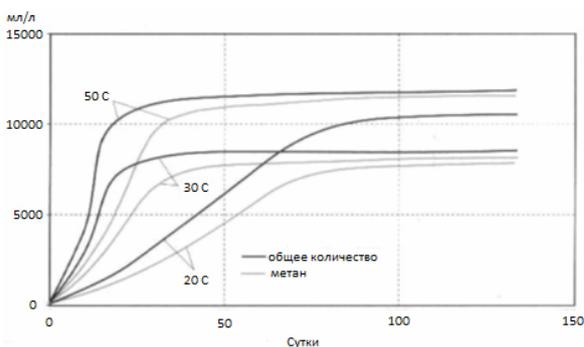


Рис. 1. Зависимость выхода биогаза, мл, от режима с течением времени в сутках

При возрастании температуры снижается содержание метана в биогазе. Это связано с тем, что при высоких температурах растворенная в субстрате двуокись углерода интенсивнее переходит в газообразную фазу (в биогаз), таким образом, что относительное содержание метана сокращается. Количество газа, которое можно добыть, будет одинаковым при достаточном количестве времени брожения. Существует три типичных температурных режима, в которых себя хорошо чувствуют соответствующие штаммы бактерий:

- психрофильные штаммы при температуре ниже  $25$  °С;
- сезонфильные штаммы при температуре  $25—45$  °С;
- мермофильные штаммы при температуре свыше  $45$  °С.

### 2.3. Природоохранный эффект

Энергия, полученная из биогаза, принадлежит к возобновляемой, поскольку происходит из органического возобновляемого субстрата. Фактом является то, что ископаемые энергоносители на Земле заканчиваются, и существует насущная потребность в альтернативных источниках, что придает еще большее значение производству биогаза на биогазовых установках. Кроме того, энергетическое использование биогаза по сравнению со сжиганием природного газа, сжиженного газа, нефти и угля является нейтральным по отношению к  $CO_2$ , поскольку выделяемый  $CO_2$  пребывает в пределах естественного круговорота углерода и потребляется растениями на протяжении вегетационного периода. Таким образом, концентрация  $CO_2$  в атмосфере по сравнению с использованием твердого топлива не увеличивается.

Однако метан тоже имеет свои недостатки: при попадании в воздух он очень медленно окисляется на двуокись углерода и воду под воздействием солнечных лучей, озона и свободных радикалов (молекулы  $HO\cdot$ , быстро вступающие в реакцию). Метан после двуокиси углерода (на  $50\%$  вызывает парниковый эффект) является наиболее распространенным загрязнителем воздуха и на  $20\%$  вызывает явление парникового эффекта. Кроме того, при окислении он потребляет озон и вносит свой вклад в увеличение озоновой дыры в стратосфере. Газовый факел, при помощи которого в аварийных случаях сжигают газ до неопасной двуокиси углерода, имеет большое значение также по этой причине. До периода индустриализации производство метана и его расщепление пребывали в равновесии. Сегодня этот баланс в значительной мере нарушен: при добыче угля, нефти и природного газа выделяется огромное количество несожженного метана в атмосферу. К этому добавляется еще большее количество газа, которое возникает во всем мире от выращивания риса и животноводства. За последние десятилетия это привело к постоянному возрастанию метана в атмосфере Земли. По этой же причине потребление биогаза в технических целях имеет особое значение, поскольку таким образом уменьшается эмиссия метана.

## 3. АНАЛИЗ ПОЛУЧЕНИЯ БИОГАЗА НА ПРИМЕРЕ КУРИНОГО ПОМЕТА

### 3.1. Расчет предельного теоретического объема биогаза с 1 тонны куриного помета

За основу расчета взят куриный помет несущек с влажностью  $75\%$ . Расход сырья составляет  $24$  т/сут. Климатическая зона — Московская область.

Содержание метана в биогазе варьируется в пределах  $50—87\%$ , но может быть увеличено за счет дополнительной очистки, тогда продуктом будет биометан — аналог природного газа (углекислый газ  $13—50\%$  и малые доли водорода и сероводорода).

Из данных, приведенных в табл. 1, можно рассчитать количество биогаза, выделенного с 1 т куриного помета.

Количество помета следует принимать в килограммах сухого вещества. Имея 1000 кг куриного помета с влажностью 75 %, т.е. 250 кг сухого вещества, на выходе получим предельный объем биогаза, равный:

$$V_{\max} = \frac{mw}{100} \cdot 0,62 = \frac{1000 \cdot 75 \cdot 0,62}{100} = 155 \text{ м}^3, \quad (1)$$

где  $m$  — масса влажного сырья, кг;  $w$  — влажность сырья, %.

Максимальный объем за сутки составит 3720 м<sup>3</sup>. Предельный объем будет одним и тем же, но на него оказывают влияние температура ферментации и период брожения. Количество газа будет одинаковым при достаточном времени разложения. В определенный момент выход биогаза будет настолько мал, что дальнейшее нахождение отходов в реакторе будет экономически не целесообразным, т.е. на практике никогда не бывает полного расщепления.

Из представленных данных можно рассчитать примерную степень ферментации сырья, используя максимальный выход из формулы (1):

$$\frac{V_{\text{real}}}{V_{\max}} = \frac{2448}{3720} 100 \% = 65,8 \%, \quad (2)$$

где  $V_{\text{real}}$  — действительный теоретический выход биогаза, м<sup>3</sup>,  $V_{\max}$  — максимальный теоретический выход биогаза, м<sup>3</sup>.

Таблица 2. Основные характеристики газов

Основные характеристики горючести биогаза и других газов						
Газ		Биогаз	Природный газ	Пропан	Метан	Водород
Теплота сгорания	кВт·ч/м <sup>3</sup>	6	10	26	10	3
Плотность	кг/м <sup>3</sup>	1,2	0,7	2,0	0,7	0.1
Теоретическая потребность в воздухе	м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	5,7	9,5	23,9	9,5	2,4

Из этого следует, что остальные 38 % составляет диоксид углерода. Итого из выхода газа в 102 м<sup>3</sup>/ч, выход метана составит всего 63,24 м<sup>3</sup>/ч и 38,76 м<sup>3</sup>/ч диоксида углерода.

### 3.3 Зависимость объема выброса биогаза от климатических зон

Вне реактора оценить полный период разложения довольно сложно, но имея график зависимости выхода биогаза в термофильном режиме от температуры (рис. 2), а также график активности бактерий (рис. 3) можно приблизительно рассчитать месячный выход биогаза для пяти климатических зон. Примем, что процесс хоть и протекает вне реактора, но все-таки несет анаэробный характер на глубине захоронений отходов животноводства без доступа кислорода.

Таблица 1. Выход биогаза в зависимости от типа сырья

Тип сырья	Выход газа (м <sup>3</sup> на килограмм сухого вещества)	Содержание метана (%)
Навоз КРС	0,250—0,340	65
Свиной навоз	0,340—0,580	65—70
Птичий помет	0,310—0,620	60
Конский навоз	0,200—0,300	56-60
Овечий навоз	0,300—0,620	70

### 3.2. Расчет содержания чистого метана и эквивалент тепловой мощности.

**Содержание метана.** Из табл. 2 можно рассчитать количество тепловой энергии, которую можно получить при сжигании единицы объема метана. Из КП от РосБиогаз следует, что при сжигании 2448 м<sup>3</sup>/сут (102 м<sup>3</sup>/ч), что соответствует объему вырабатываемого биогаза из реактора производительностью 1 т/ч куриного помета, получаемая тепловая мощность составит 632 кВт. При таком же объеме чистого метана получим мощность:

$$Q_{\text{CH}_4} = V Q_{\text{т.с CH}_4} = 102 \cdot 10 = 1020 \text{ кВт}, \quad (3)$$

где  $V$  — объемный расход газа, м<sup>3</sup>/ч;  $Q_{\text{т.с CH}_4}$  — теплота сгорания метана, кВт·ч/м<sup>3</sup>.

Таким образом, рассчитаем содержание метана в биогазе:

$$\text{CH}_4(\%) = \frac{Q_{\text{CH}_4}}{Q_{\text{био}}} = \frac{632}{1020} = 62 \%, \quad (4)$$

где  $Q_{\text{CH}_4}$  — тепловая мощность при сжигании чистого метана, кВт;  $Q_{\text{био}}$  — тепловая мощность при сжигании биогаза, кВт.

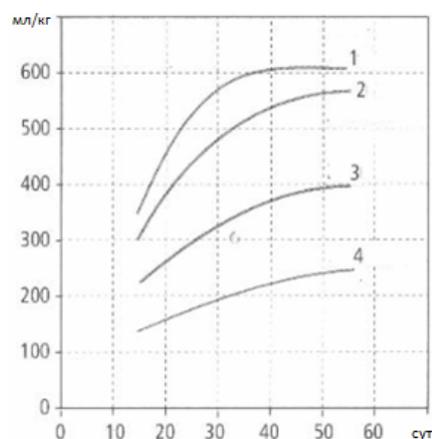


Рис. 2. Зависимость выхода биогаза, мл/кг, при термофильном режиме с течением времени, сут.: 1 — куры; 2 — свиный; 3 — КРС; 4 — твердый навоз

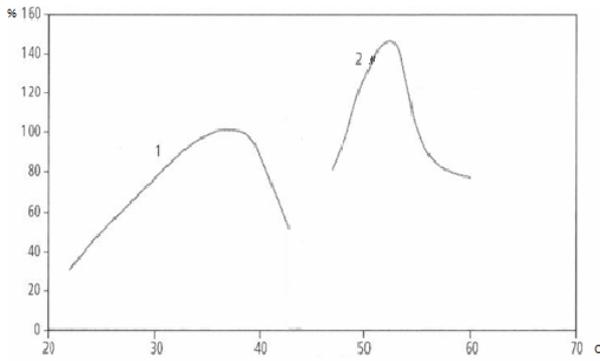


Рис. 3. Зависимость относительной активности бактерий (%) от температуры (°C): 1 — мезофильный; 2 — термофильный режимы

Еще одно существенное допущение заключается в принятии активности бактерий термофильного режима за среднюю по графику в 130 %. Связано это с широким диапазоном температур (45—60 °C), а следовательно, и варьированием активности в пределах от 80 до 150 %.

Также учитывается нижний температурный порог, при котором бактерии прекращают свою активность в 3 °C. Оценим периоды выхода биогаза и интенсивности в зависимости от времени для Московского, Краснодарского, Астраханского, Вологодского и Ростовского регионов.

Выделение биогаза будет происходить только в месяцах со средней температурой более 3 °C. Средняя температура за эти месяцы для московской области  $t_{\text{ср}} = 12,3$  °C.

При такой температуре средняя активность бактерий составит примерно 10 %. Отсюда можно рассчитать период полного разложения, так как при активности в 130 % период составляет 45 дней, то при активности в 10 % он будет равен

$$P_{\text{разл}} = \frac{130}{10} \cdot 45 = 585 \text{ суток.} \quad (5)$$

Разложение будет проходить только в семи месяцах из 12, поэтому для учета полного периода, включая месяца с температурой менее 3 °C, приведем:

$$P_{\text{меск}} = 585 \cdot \frac{12}{7} = 1002 \text{ суток.} \quad (6)$$

Активное время разложения за один год составит семь месяцев, а именно

$$P_{\text{год}} = 585 \cdot \frac{365}{1002} = 213 \text{ суток,} \quad (7)$$

что составляет определенную часть от полного разложения:

$$a = \frac{213}{585} = 0,36. \quad (8)$$

Зная это значение, определим границы графика (см. рис. 2), которые будут характеризовать этот период:

$$P_{\text{гр}} = 45 \cdot 0,36 = 16 \text{ суток.} \quad (9)$$

Данная область графика имеет линейный характер, поэтому выход газа (термофильный) будет одинаков. Для первого года любой климатической зоны обусловим линейную зависимость выхода биогаза.

Полный объем биогаза, выделившийся в течении года составит 380 литров на килограмм сухого вещества.

Определим помесечную активность бактерий. Принимаем, что продолжение графика активности (см. рис. 3) за пределами 20 °C несет гиперболический характер:

- Апрель: 5 %;
- Июнь: 15 %;
- Август: 14 %;
- Октябрь: 1 %;
- Май: 10 %;
- Июль: 19 %;
- Сентябрь: 9 %.

Определим долю участия каждого месяца в выходе биогаза по сравнению с термофильном режимом, для этого приведем процентные активности к активности термофильного режима.

$$\text{Коэффициент перевода: } d = \frac{130 \%}{73 \%} = 1,78. \quad (10)$$

- Апрель: 8,9 %;
- Июнь: 26,7 %;
- Август: 24,92 %;
- Октябрь: 1,78 %;
- Май: 17,8 %;
- Июль: 33,82 %;
- Сентябрь: 16,02 %.

В сумме получим 130 %.

$$\text{Коэффициент пересчета } d' = \frac{\text{Акт \%}}{130 \%}. \quad (11)$$

- Апрель: 0,068;
- Июнь: 0,205;
- Август: 0,192;
- Октябрь: 0,014;
- Май: 0,137;
- Июль: 0,261;
- Сентябрь: 0,123.

В сумме получим 1.

Итого имеем долю участия каждого месяца в выработке биогаза. Определим выход с 1000 кг:

$$V = d' \cdot 380 \text{ м}^3. \quad (12)$$

- $V_{\text{апр}} = 25,84 \text{ м}^3$ ;
- $V_{\text{июнь}} = 77,9 \text{ м}^3$ ;
- $V_{\text{авг}} = 72,96 \text{ м}^3$ ;
- $V_{\text{окт}} = 5,32 \text{ м}^3$ ;
- $V_{\text{май}} = 52,06 \text{ м}^3$ ;
- $V_{\text{июль}} = 99,18 \text{ м}^3$ ;
- $V_{\text{сент}} = 46,74 \text{ м}^3$ .

$$V_{\text{сумм}} = 380 \text{ м}^3.$$

$$V_{\text{полн}} = 0,62 \cdot 1000 = 620 \text{ м}^3.$$

Выход за первый год от возможного составит:  
 $\frac{380}{620} \cdot 100 = 61,3\%$ . Полный период разложения со-  
 ставит: 1002 сут.

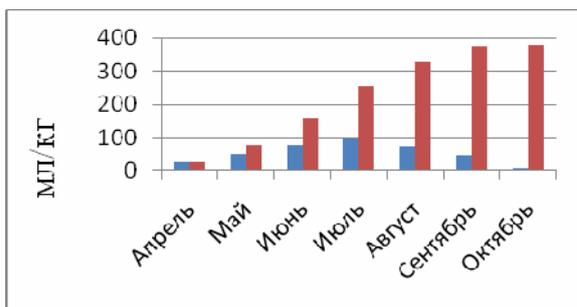


Рис. 4. Выход биогаза с течением времени для региона Московской области: синий — помесечный выход биогаза, красный — суммарный

Проведя расчеты (5)—(15) для остальных климатических регионов, получим следующие зависимости, представленные на рис. 4—8.

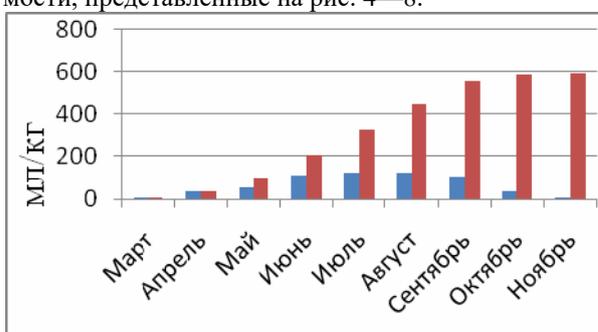


Рис. 5. Выход биогаза (мл/кг) с течением времени для Краснодарского края: синий — помесечный выход биогаза, красный — суммарный

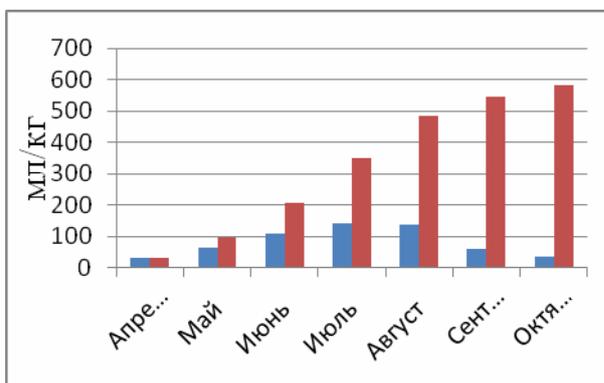


Рис. 6. Выход биогаза (мл/кг) с течением времени для Астраханского края: синий — помесечный выход биогаза, красный — суммарный

## Вывод

Проанализировав образование биогаза в различных условиях для нескольких климатических зон, можно сделать вывод о непосредственной зависимости периода разложения единицы отходов животноводства от климатических условий. Чем выше температура окружающей среды, тем быстрее происходит разложение сырья и тем большее количество парниковых газов попадает в атмосферу за год.

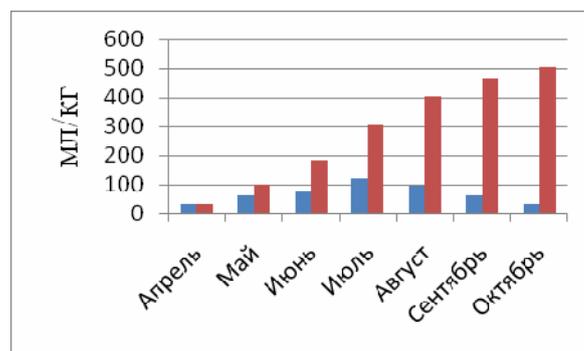


Рис. 7. Выход биогаза (мл/кг) с течением времени для Ростовской области: синий — помесечный выход биогаза, красный — суммарный

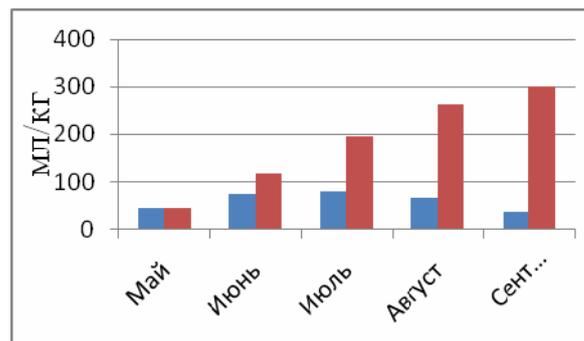


Рис. 8. Выход биогаза (мл/кг) с течением времени для Вологодской области: синий — помесечный выход биогаза, красный — суммарный

## 4. УТИЛИЗАЦИЯ БИОГАЗА И ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ

### 4.1. Подбор схемы утилизации

Исходя из вырабатываемой электроэнергии мощностью в 245 кВт подобран вариант ГПУ на базе корейского двигателя Daewoo Doosan 300 кВт.

Параллельно с выработкой электроэнергии когенерационная станция на базе ГПУ вырабатывает тепловую энергию в виде горячей воды. Для охлаждения двигателя используется замкнутый контур с охлаждающей жидкостью, которая, отобрав тепло у двигателя, подается в теплообменник, где передает тепловую мощность теплоносителю. Управление потоком охлаждающей жидкости осуществляют механический термостат и трехходовой клапан, которые в зависимости от температуры ОЖ, направляют ее либо в рубашку охлаждения двигателя, либо в теплообменник, либо в радиатор воздушного охлаждения. Таким образом, теплообменник является первой ступенью утилизации тепла.

Далее теплоноситель направляется в теплообменник-утилизатор, где догревается за счет теплоты выхлопных газов. В случае, когда температура выхлопных газов низкая (двигатель только запущен), они направляются по байпасному газоходу в дымовую трубу.

### 4.2. Теплообменное оборудования

Соединение теплообменников является последовательным с температурным режимом в сети 115/70. Это характеризует одинаковый расход теплоносителя в каждом теплообменнике, а также не-

кую промежуточную температуру перед догревом теплоносителя выхлопными газами.

Теплообменником-утилизатором первой ступени является водоводяной ТА рубашки охлаждения двигателя тепловой мощностью 237,7 кВт. Температуры сетевой воды на входе и выходе из ТА равны 70 и 106,3 °С соответственно.

Теплообменником-утилизатором второй ступени является рекуперативный ТА выхлопных газов двигателя с оребренными трубами, его тепловая мощность составляет 48 кВт. Температура сетевой воды на выходе 115 °С. Температуры выхлопных газов на входе и выходе из ТА равны 450 и 180 °С соответственно.

#### 4.3. Срок окупаемости внедренной технологии утилизации биогаза

При данном объеме утилизации отходов животноводства в 1 т/ч, что составляет 8760 т/год, прибыль, получаемая от продажи тепло- и электроэнергии составляет 12 264 162 руб/год. Затраты капиталовложения на строительство и пусконаладку биогазовой установки с учетом строительства когенерационной станции составляет 27 735 960,5 руб. Сумма денежных средств, на ежегодное обслуживание равна 1 414 173 руб/год

Исходя из расчетов срок окупаемости (рис. 9) составит:

$$CO = \frac{P_{\text{сумм}}}{V_{\text{сумм}} - S_{\text{сумм}}} = \frac{27\,735\,960,5}{12\,264\,162 - 1\,414\,173} = 2,55 \text{ года.} \quad (13)$$

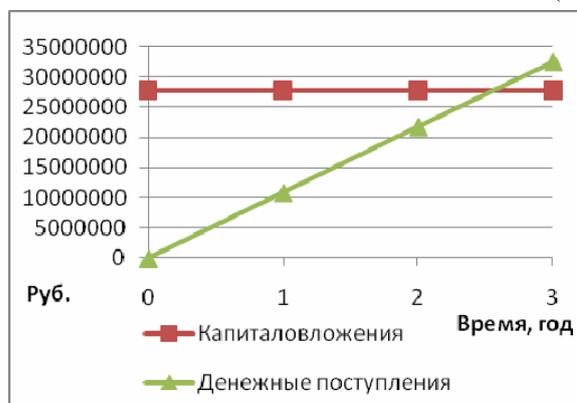


Рис. 9. Срок окупаемости внедрения биогазовой установки с когенерацией

#### Вывод

По данным расчета срок окупаемости при полной продаже тепло- и электроэнергии по рыночной стоимости составляет 2,55 года. За счет использования экологически чистого вида топлива существует вероятность продажи квот на выбросы парниковых газов — 39 888 тыс. м<sup>3</sup> CO<sub>2</sub> экв в год.

При плановых отключениях электрогенератора или переизбытка тепловой энергии, которая будет выброшена в окружающую среду через контур радиатора ГПУ, срок окупаемости будет выше. Также

через продажи квот срок окупаемости можно уменьшить.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы проведен анализ выброса биогаза от реактора, в который ежедневно поступает 1 тонна куриного помета. Расход биогаза с содержанием метана 62 % составляет 102 м<sup>3</sup>/ч, расход биометана на сжигание в ГПУ равен 63,24 м<sup>3</sup>/ч. Подобрана схема когенерации с использованием ГПУ и двумя последовательно включенными теплообменниками-утилизаторами тепловой мощности. Вырабатываемая электрическая мощность — 245 кВт, тепловая — 286 кВт.

В районах с более теплым климатом полное разложение неутраченных отходов животноводства может произойти в течение года. С учетом средоточенности секторов сельского хозяйства и короткого периода разложения южные районы прекрасно подходят для внедрения биогазовых реакторов для получения экологически чистого топлива, тепловой и электроэнергии, высококачественных удобрений для поддержания развития сельскохозяйственных угодий и получения дополнительной прибыли.

В больших масштабах неутраченные отходы животноводства наносят серьезный ущерб экологии и прямым образом влияют на парниковый эффект. Влияние усугубляется наличием в выходе из отходов метана, содержание которого может превышать содержание углекислого газа. При полном разложении неутрачиваемого сырья (куриный помет, 1 т/ч) в атмосферу попадет более 554 тыс. м<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>. Учитывая, что в первые 20 лет потенциал глобального потепления у метана в 72 раза выше, чем у диоксида углерода, то это эквивалентно выделению в атмосферу более 39 888 тыс. м<sup>3</sup> CO<sub>2</sub>.

#### СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

- КП — коммерческое предложение;
- ГПУ — газопоршневая установка;
- ТА — теплообменный аппарат;
- ОЖ — охлаждающая жидкость;
- CO — срок окупаемости.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Эдер Б., Шульц Х. Биогазовые установки: практическое пособие. М., 1996.
2. Сазанов Б.В., Ситас В.И. Промышленные теплоэнергетические установки и системы. М.: Издательский дом МЭИ, 2014. — 275 с.: ил.
3. Бакластов М.А., Горбенко В.А., Удыма П.Г. Проектирование, монтаж и эксплуатация тепломассообменных установок. М.: Энергоиздат, 1981. — 336 с.
4. Промышленные тепломассообменные процессы и установки / М.А. Бакластов, В.А. Горбенко, О.Л. Данилов и др.; под ред. М.А. Бакластова. М.: Энергоатомиздат, 1986. — 328 с.: ил.