

## РАЗРАБОТКА И СРАВНЕНИЕ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ СХЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ БИОГАЗОВОГО РЕАКТОРА

Яковлева О.В., магистр ТГВ, Боровский Б.И., д. т. н, профессор  
*Национальная академия природоохранного и курортного строительства*

Приведены результаты исследований с целью обоснования рациональных схем поддержания постоянного температурного режима в биогазовом реакторе. С целью интенсификации процесса метанового брожения а также уменьшения затрат на подогрев сырья предложены две энергосберегающие схемы подогрева субстрата. В рассматриваемых схемах подогрев сырья перед подачей в биогазовый реактор осуществляется за счет тепла отработанного шлама и низкопотенциальных источников энергии с применением тепловых насосов. Проводится сравнение рассматриваемых схем подогрева сырья по эффективности и по экономическим показателям. Выявлена наиболее эффективная схема подогрева субстрата.

**Биогаз, рекуперативный теплообменник, тепловой насос, коэффициент преобразования энергии, коэффициент первичной энергии, приведенные затраты.**

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в Украине использование биогаза, полученного методом анаэробного сбраживания биомассы, очень ограничено. Главной причиной этого является недостаточная разработка энергетических вопросов: большие потери на термостабилизацию и подогрев субстрата, нерациональное использование биогаза. Существующие экспериментальные и теоретические исследования процессов утилизации органических отходов в полной мере не отвечают практическим задачам производства биогаза [1]. Поэтому разработка энергосберегающих систем для интенсификации процесса анаэробного брожения в биореакторах для производства биогаза на сегодняшний день является актуальной.

Получение биогаза из органических отходов основано на свойстве последних выделять горючий газ в результате так называемого «метанового сбраживания» в анаэробных условиях. Процесс производства биогаза происходит при разложении органических веществ в результате жизнедеятельности двух основных групп микроорганизмов. На первом этапе при участии кислотообразующих бактерий происходит разложение высокомолекулярных соединений (углеводов, жиров, белковых веществ) на низкомолекулярные органические соединения с образованием органических кислот и их солей, а также спиртов,  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2$ , а затем  $\text{H}_2\text{S}$  и  $\text{NH}_3$ . Окончательное бактериальное преобразование органических веществ в  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  осуществляется метановыми бактериями на втором этапе процесса (метановое брожение)[2].

Биогаз, образующийся при метановом сбраживании, представляет собой смесь, состоящую из 50...80 % метана, 20...50 % углекислого газа, примерно

1 % сероводорода, а также включающую в себя незначительное количество некоторых других газов (азота, кислорода, водорода, аммиака и др.). Низшая объемная теплота сгорания биогаза составляет 21-23 МДж/м<sup>3</sup> [1].

### АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

В работе даны ссылки на публикации зарубежных и украинских авторов, посвященные вопросам проектирования и эксплуатации биогазовых установок, а также расчету тепловых насосов. В книге немецких авторов В.Баадера, Е.Доне, М.Бренндерфера «Биогаз теория и практика» кроме основ теории метанового брожения, технологических приемов получения биогаза и его использования в сельском хозяйстве, рассмотрен экономический анализ производства биогаза и эксплуатации биогазовых установок.

В монографии украинских авторов Г.С.Ратушняка и В.В.Джеджулы обоснованы новые конструкции реакторов, технологии, аппараты и реагенты для очистки биогаза. Рассмотрены рациональные технологические схемы работы биогазовых реакторов с рекуперацией теплоты шлама и с тепловым насосом.

Расчет показателей эффективности тепловых насосов производится согласно рекомендациям, изложенным в книге Д.Рея и Д.Макмайкла «Тепловые насосы».

### ЦЕЛЬ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Процесс метанового брожения, протекающий в биогазовом реакторе очень чувствителен к колебаниям температуры. Поэтому предлагаемая схема подогрева сырья должна отвечать требованиям поддержания постоянного температурного режима в реакторе.

Учитывая особенности процесса производства биогаза (загрузка и выгрузка субстрата осуществляется ежедневно, количество свежего субстрата равно количеству удаляемого шлама), в работе рассматриваются две энергосберегающие схемы обогрева реактора с использованием тепловых насосов (ТН) и теплоты отработанного шлама.

Для системной оценки рассматриваемых схем подогрева сырья необходимо выполнить следующие задачи: провести сравнение схем по эффективности

(сравнить тепловые насосы по коэффициенту преобразования энергии и коэффициенту первичной энергии), а также по экономическим показателям - затратам на строительство и эксплуатацию систем, приведенных к одному году эксплуатации.

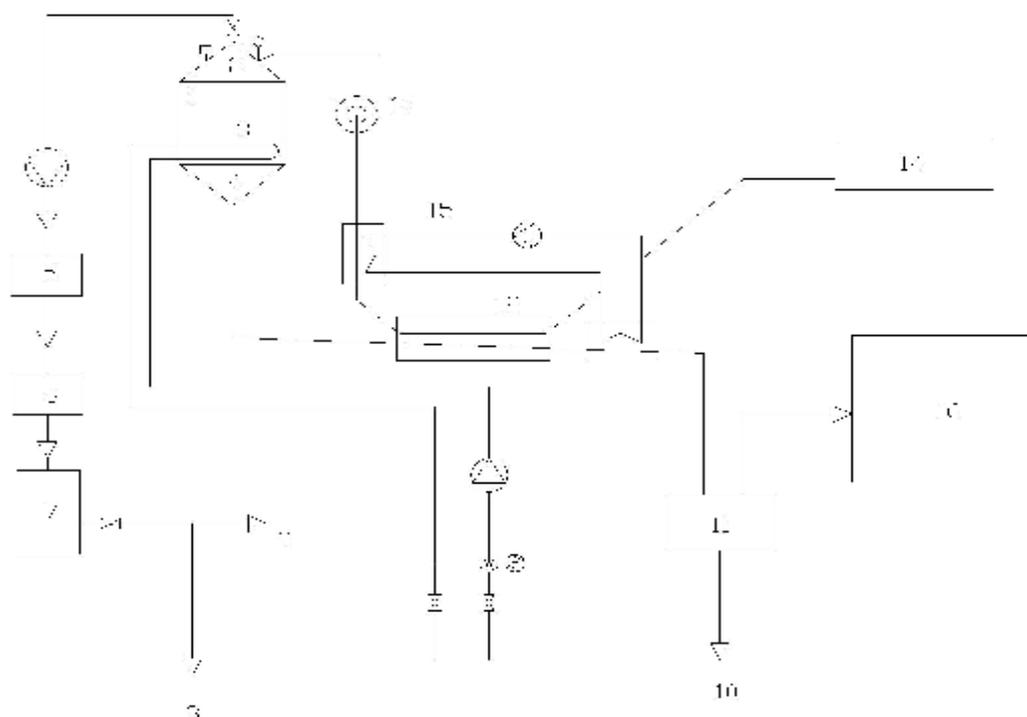
Цель исследований: выбор наиболее оптимальной по всем параметрам схемы подогрева подаваемого в биогазовый реактор сырья.

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В работе предложены две схемы подогрева сырья перед подачей в биогазовый реактор с использованием рекуперативного теплообменника и теплового насоса. В первом случае применяется тепловой насос типа «вода-

вода», во втором – «воздух-вода». Проводится их сравнение по коэффициенту преобразования энергии, коэффициенту первичной энергии и по приведенным затратам.

1. Схема с тепловым насосом типа «вода-вода» и рекуперативным теплообменником типа «труба в трубе» показана на рис. 1.



**Рис. 1. Схема подогрева сырья в биогазовой установке с применением теплового насоса типа «вода-вода» и рекуперативного теплообменника типа «труба в трубе»**

По мере накопления в резервуаре 14 органических отходов они фекальным насосом 13 откачиваются в трубопровод и подаются в верхнюю часть реактора 1. В реакторе 1 смесь перемешивается и увлажняется до необходимой концентрации сухого вещества. Компенсация тепловых потерь через стенки реактора осуществляется с помощью теплообменника 3. Температура биогаза и его давление контролируются манометром и термометром, которые размещены в крышке реактора. По мере накопления биогаз выпускают в устройство удаления сероводорода 5, при необходимости - удаления углекислого газа - 6 и собирают в газгольдере 7. Из газгольдера 7 газ направляют трубопроводом 9 на нужды самой биогазовой установки, а трубопроводом 8 - на нужды хозяйства.

Отработанный субстрат, проходя через разделитель фаз 11, отправляется на полив 10 и на производство минеральных удобрений 16.

Среднегодовая температура бесподстилочного навоза крупного рогатого скота (КРС), используемого в биогазовой установке в качестве сырья, составляет  $10^{\circ}\text{C}$  [3].

Подогрев свежего субстрата, подаваемого в реактор, осуществляется двухступенчато. Первая ступень нагрева – рекуперативный теплообменник 12

типа «труба в трубе» (подобран теплообменник стальной эмалированный типа «труба в трубе» Сэт 1.0-12-01  $F=1.0 \text{ м}^2$ ), в котором осуществляется подогрев поступающего в реактор субстрата за счет тепла отработанного шлама от температуры  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  до температуры  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Второй ступенью является подогрев массы тепловым насосом 15 типа «вода-вода».

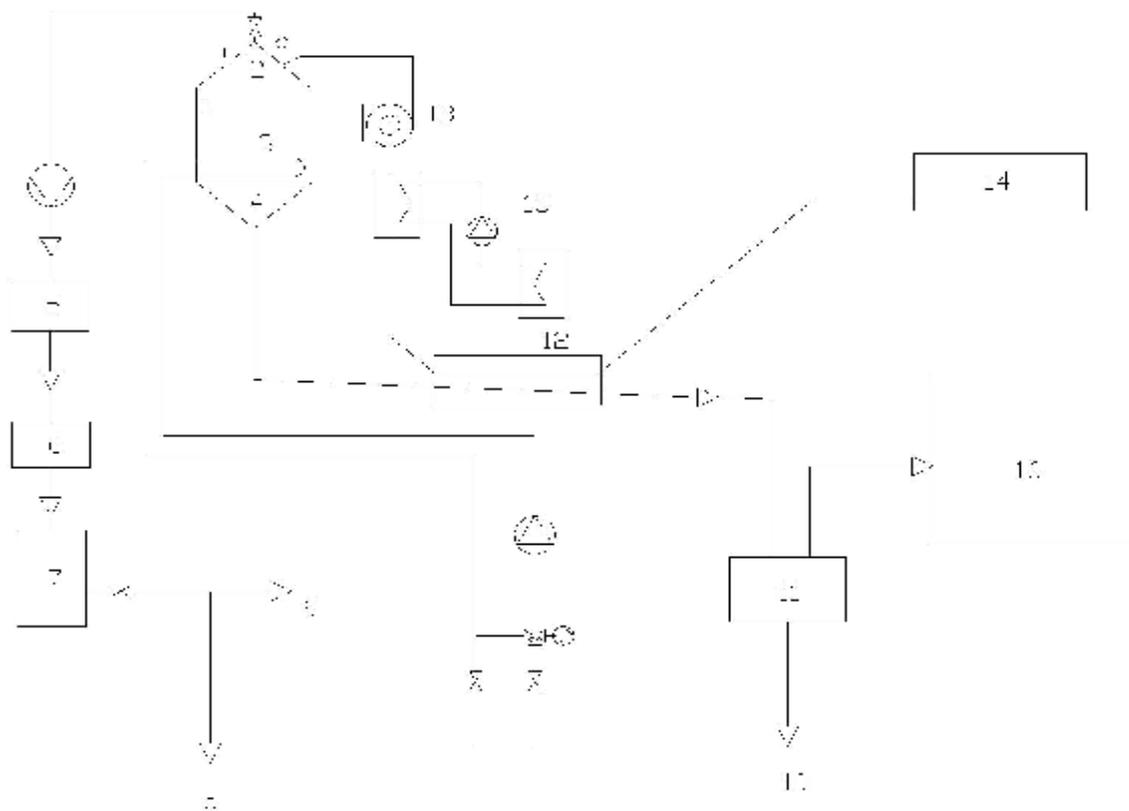
#### 1.1. Расчет теплового насоса типа «вода-вода».

Температура низкопотенциального источника теплоты (отработанного шлама на выходе из рекуперативного теплообменника) составляет  $23 \text{ }^\circ\text{C}$ . Теплота отработанного шлама используется для подогрева поступающего в реактор свежего субстрата от  $20$  до  $35 \text{ }^\circ\text{C}$ .

В результате расчета парокompрессионного цикла теплового насоса в  $\lg P-h$  диаграмме фреона R407C получим коэффициент преобразования энергии (КОП) теплового насоса (отношение полезной тепловой мощности к мощности, затрачиваемой на привод компрессора) 5,13.

Т.к. разность температур источника и приемника тепла постоянна в течение года, то коэффициент преобразования теплового насоса не изменяется в зависимости от температур наружного воздуха.

1. Схема с тепловым насосом типа «воздух-вода» и рекуперативным теплообменником типа «труба в трубе» приведена на рис.2.



**Рис. 2. Схема подогрева сырья в биогазовой установке с применением теплового насоса типа «воздух-вода» и рекуперативного теплообменника типа «труба в трубе»**

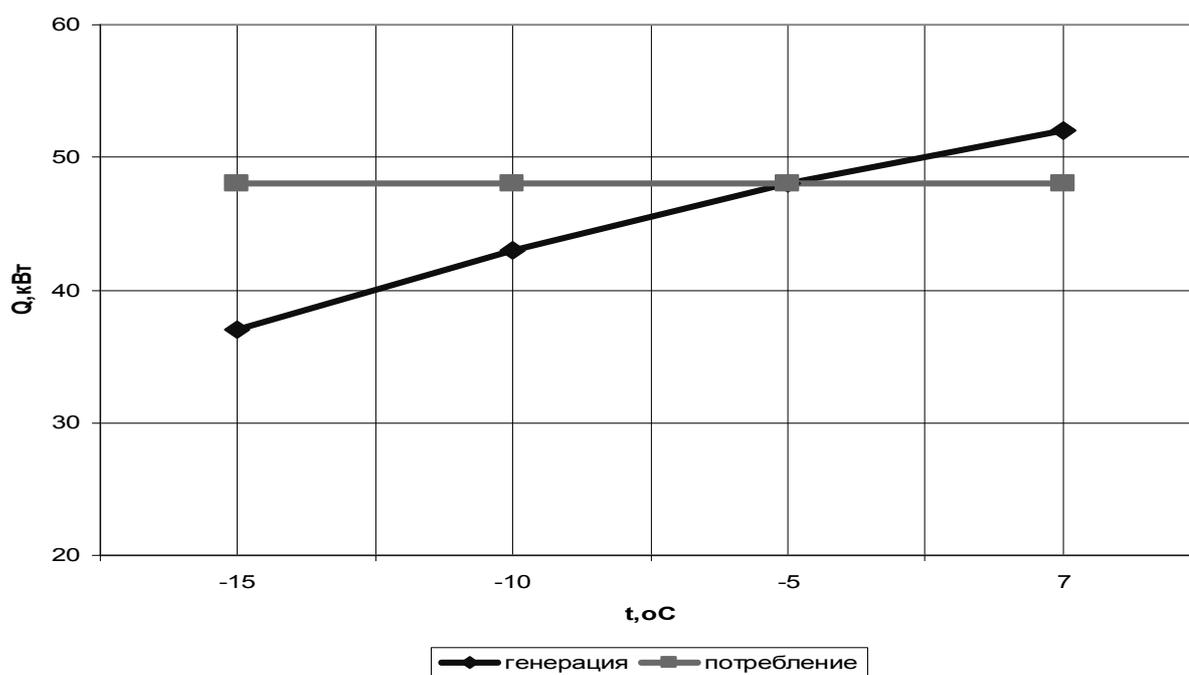
Биогазовая установка аналогична ранее рассмотренной. Подогрев свежего субстрата, подающегося в реактор, осуществляется двухступенчато. Первая ступень нагрева – рекуперативный теплообменник типа «труба в трубе», в котором осуществляется подогрев поступающего в реактор субстрата за счет тепла отработанного шлама от температуры  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  до температуры  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Второй ступенью является подогрев массы тепловым насосом типа «воздух-вода».

### 2.1. Расчет теплового насоса типа «воздух-вода».

В тепловом насосе типа «воздух-вода» атмосферный воздух с помощью вентиляторов продувается сквозь пластинчато-трубные теплообменники, в которых передает теплоту испаряющемуся фреону. В конденсаторе ТН теплота передается холодному теплоносителю (свежий субстрат с температурой  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  на выходе из рекуперативного теплообменника), поддерживая его температуру на заданном уровне (в нашем случае  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

Характеристики теплового насоса «воздух-вода» существенно зависят от температуры воздуха. Наиболее перспективна эта схема для районов со среднемесячной температурой не ниже  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . При снижении температуры воздуха снижается и мощность теплового насоса.

При определенной температуре наружного воздуха в системе отопления достигается точка равновесия, в которой мощность теплового насоса равна мощности, необходимой для отопительной системы. При дальнейшем снижении температуры тепловой насос уже не способен обеспечить потребности системы отопления, и возникает необходимость в дополнительном источнике энергии. График нагрузки системы теплоснабжения реактора приведен на рис. 3.



**Рис.3** Зависимость мощности системы с тепловым насосом типа «воздух-вода» от температуры наружного воздуха

Как видно из графика, при расчетной температуре ( $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) в системе достигается баланс мощностей. В случаях понижения температуры ниже расчетной дополнительно подключается электрический нагреватель мощностью 11 кВт.

Расчет теплового насоса проводим для температуры низкопотенциального источника тепла (наружного воздуха)  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Теплота воздуха используется для подогрева поступающего в реактор свежего субстрата от  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

В результате расчета парокompрессионного цикла теплового насоса в  $\lg P-h$  диаграмме фреона R407C получим коэффициент преобразования энергии в тепловом насосе:

$$КОП = 2,89$$

Результаты расчетов коэффициента преобразования теплового насоса типа «воздух-вода» для различных температур наружного воздуха представлены в табл. 1.

Таблица 1

Зависимость КОП теплового насоса от температуры наружного воздуха

$t_{н},\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\varepsilon$
-5	2,89
0	3,24
10	3,66
20	4,97

### 3. Сравнение тепловых насосов по коэффициенту первичной энергии.

Для оценки различных теплонасосных систем с приводом компрессора за счет различных топлив применяют коэффициент первичной энергии (КПЭ) [4]. Он учитывает не только КОП, но и коэффициент полезного действия (КПД) преобразования первичной энергии (нефть, газ, уголь или солнечное тепло) в работу привода компрессора:

$$КПЭ = \eta_T \cdot КОП \quad (1)$$

где  $\eta_T$  – термический КПД тепловой машины, используемой для привода компрессора. В рассматриваемом случае для привода компрессора теплового насоса используется газовый двигатель, работающий на биогазе, термический КПД таких двигателей достигает значений 0,35 [5].

При использовании теплового насоса для отопления КПЭ показывает, насколько выгоден тепловой насос по сравнению с обычным водогрейным или паровым котлом, а также по сравнению с непосредственным огневым нагревом.

### 4. Расчет затрат на отопление реактора при использовании различных источников тепла.

При сравнении затрат будем исходить из условий:

- 1) отопительное оборудование работает круглогодично;
- 2) потребность сбрасываемой массы в тепле постоянна в течение года и составляет:

$$Q = Q_c \cdot 365 \quad (2)$$

где 365 – количество часов работы теплогенерирующего оборудования в год,

$Q_c = 48$  кВт – количество тепла, которое необходимо подводить к порции свежего субстрата.

$$Q = 48 \cdot 365 = 17520 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

3) производится сравнение систем теплоснабжения с применением котла, работающего на биогазе, теплового насоса типа «вода-вода» и теплового насоса типа «воздух-вода». Для сравниваемых схем принято следующее оборудование: котёл газовый напольный малой мощности VITOGAS 100-F с системой управления Vitotronic 200 тип KW4 с газовой атмосферной горелкой 48 кВт, тепловой насос типа «воздух-вода» модель FSLRDM50 мощностью 48 кВт фирмы ACWELL, тепловой насос типа «вода-вода» Aquator T44 фирмы ELCO мощностью 48 кВт.

Тепловой насос типа «воздух-вода» для покрытия пиковых нагрузок использует дополнительный электронагреватель мощностью 11 кВт. Долевая часть дополнительного теплоэлектронагревателя в суммарной работе на отопление составляет около 2 % [6]. Следовательно, его годовая потребность в электроэнергии при годовой работе отопления 17520 кВт\*ч составит

$$350,4 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

5. Сравнение систем отопления реактора по приведенным затратам [7].

Выбор оптимального способа отопления реактора проводится на основе сравнения затрат на строительство и эксплуатацию, приведенных к одному году эксплуатации:

$$Z_{np} = \frac{K}{T_n} + C_{экс} + C_{бг} + C_{эл} \quad (3)$$

где  $K$  – капитальные затраты на строительство сооружений, включающие стоимость оборудования и его монтаж;  $T_n$  – срок службы оборудования до капитального ремонта;  $C_{экс}$  – эксплуатационные затраты, включая затраты на ремонт и обслуживание оборудования;  $C_{бг}$  – стоимость биогаза,  $C_{эл}$  – стоимость электроэнергии.

Срок службы системы отопления с использованием тепловых насосов до капитального ремонта 20 – 25 лет. Согласно данным производителей газовые котлы имеют срок службы 10-15 лет.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

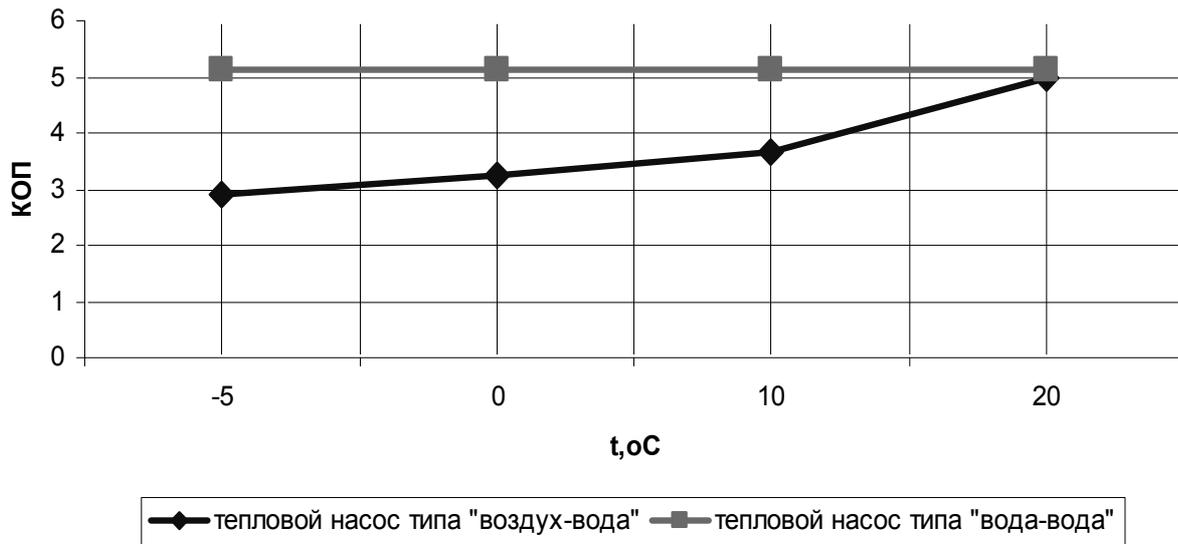
1. Сравнение тепловых насосов по коэффициенту преобразования.

Графики зависимости КОП тепловых насосов обоих видов от температуры наружного воздуха представлены на рис. 4.

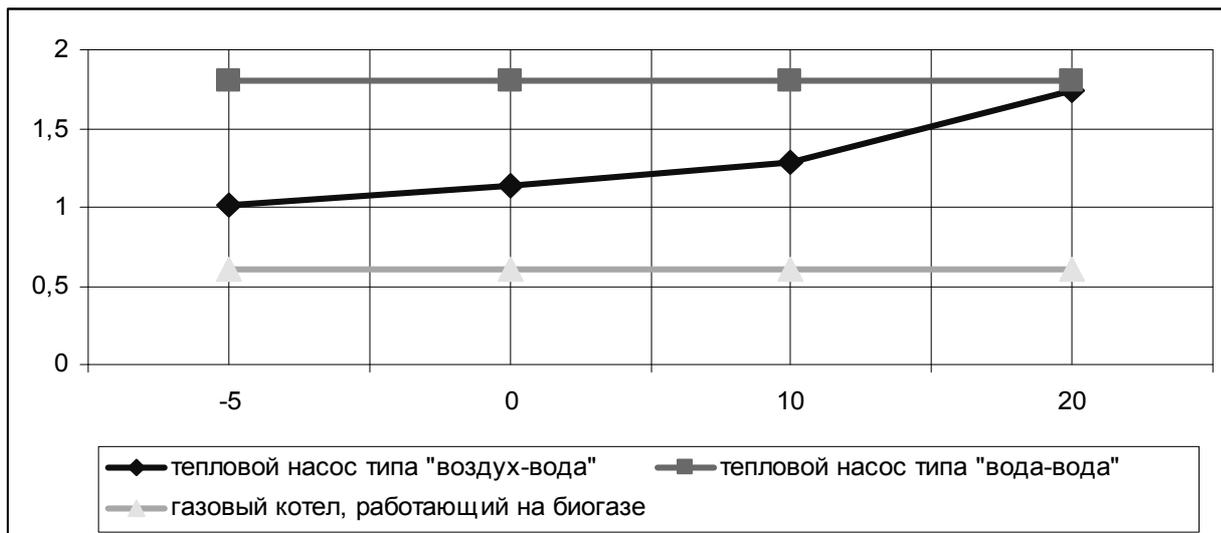
Как видно из графика, коэффициент преобразования теплового насоса типа «воздух-вода» не достигает соответствующих значений для теплового насоса типа «вода-вода» даже при высоких температурах наружного воздуха.

2. Сравнение тепловых насосов по коэффициенту первичной энергии.

Графики изменения коэффициента первичной энергии в течение года представлены на рис. 5.



**Рис.4. Сравнение КОП тепловых насосов**



**Рис. 5. Сравнение источников тепла по коэффициенту первичной энергии**

Коэффициент использования первичной энергии для газового котла примерно равен коэффициенту полезного действия. Для котла, работающего на биогазе, коэффициент первичной энергии составит 0,6. Из расчетов следует, что тепловой насос типа «вода-вода» дает в 3 раза, а «воздух-вода» в 1,89 раз больше тепла, чем прямое сжигание топлива.

3. Затраты на подогрев сырья при использовании различных источников тепла.

Низшая теплота сгорания биогаза  $q_{\text{вн}} = 23,3 \text{ МДж/м}^3$ . Из  $1 \text{ м}^3$  биогаза можно получить  $q_T = 6,5 \text{ кВт*ч}$  тепловой энергии. КПД котла, работающего на биогазе  $\eta_k = 0,6$  [5]. Следовательно, из  $1 \text{ м}^3$  биогаза получаем:

$$q = q_T \cdot \eta_k \quad (4)$$

$$q = 6,5 \cdot 0,6 = 3,9 \text{ кВт*ч}$$

Тогда годовой расход биогаза на подогрев сырья с помощью котла составит:

$$Q_{\text{ук}} = \frac{Q}{q} = \frac{17520}{3,9} = 4492 \text{ м}^3$$

Исходя из КПЭ тепловых насосов, получим расход биогаза для привода компрессора.

Для теплового насоса типа «вода-вода»:

$$Q_{\text{ув-в}} = \frac{Q_{\text{ук}}}{3} = \frac{4492}{3} = 1497 \text{ м}^3$$

Для теплового насоса типа «воздух-вода»:

$$Q_{\text{увз-в}} = \frac{Q_{\text{ук}}}{1,89} = \frac{4492}{1,89} = 2377 \text{ м}^3$$

Результаты расчета затрат на подогрев субстрата при использовании различных источников тепла приведены в табл. 3.

Таблица 3

Затраты на отопление реактора при использовании различных источников тепла

Параметры	Газовый котел	ТН «воздух-вода»	ТН «вода-вода»
Тепловая мощность (кВт)	48	48	48
Стоимость единицы энергоносителя (грн.):			
Биогаз	0,68 грн/м <sup>3</sup>		
Электрическая энергия	-	0,24 грн/кВт*ч	-
Объем энергоносителя:			
Биогаз, м <sup>3</sup> /год	4492	2377	1497
Электрическая энергия кВт*ч/год	-	350	-
Стоимость энергоносителя, грн:			
Электрическая энергия	-	84	-
Биогаз	3055	1616	1018
Стоимость оборудования (грн)	28420	158200	164740
Установка и монтаж (грн)	3175	7200	7500
Эксплуатационные затраты в год (грн.)	8722	3400	3440
Обслуживание (грн)	6332	-	-
Итого за год (грн)	49704	170500	176698
Гарантия производителя, лет	1	2	3

Система отопления реактора с использованием теплового насоса требует значительных первоначальных вложений, однако имеет длительный срок службы (20-25 лет) и не требует затрат на обслуживание (обслуживание установок заключается в сезонном техническом осмотре и периодическом контроле режима работы).

4. Результаты расчета приведенных затрат на установку и эксплуатацию отопительного оборудования приведены в табл. 4.

Таблица 4

Расчет приведенных затрат

Параметры	Газовый котел	ТН «воздух-вода»	ТН «вода-вода»
Капитальные затраты, грн	31595	165400	172240
Срок службы оборудования до капитального ремонта, год	15	25	25
Эксплуатационные затраты, грн	15054	3400	3440
Затраты на биогаз, грн	3055	1616	1018
Затраты на электроэнергию, грн	-	84	-
Приведенные затраты, грн/год	20215	11716	11348

Из таблицы 4 следует, что приведенные затраты при использовании теплового насоса типа «вода-вода» на 44 % меньше, чем при применении газового котла; приведенные затраты при использовании теплового насоса типа «воздух-вода» на 42 % меньше, чем при применении газового котла.

## ВЫВОДЫ

Наиболее оптимальной по всем указанным параметрам является схема подогрева сырья с использованием рекуперативного теплообменника и теплового насоса типа «вода-вода». Согласно расчету в этом случае расход биогаза на подогрев субстрата составит 4 % от общего количества производимого установкой биогаза.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ратушняк Г.С., Джеджула В.В. Інтенсифікація біоконверсії коливальним перемішуванням субстрату: Монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ – Вінниця, 2008. – 117 с.
2. Веденев А.Г. «Биогазовые установки», 2005 ОФ «Флюид» Ассоциации «Фермер», справочное пособие.
3. Агрохимия. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.:Колос, 1984. -304с. под ред. Смирнов П.М., Муравин Э.А.
4. Рей Д., Макмайл Д. Тепловые насосы: Пер. с англ. — М.: Энергоиздат, 1982. — 224 с, ил.
5. Баадер В., Доне Е., Бреннденфер М., Биогаз: теория и практика – М. Колос, 1982 – 148с.

6. Документация для планирования и проектирования. Рассольно-водяные тепловые насосы Logatherm WPS 6-11 K и WPS 6-17. Издание 06/2008.

7. Методические указания к выполнению расчетно-графической работы «Расчет процессов массопередачи в аэротенках с пневматической и пневмомеханической аэрацией» по дисциплине «Массопередача» для студентов специальности 7.092601 «Водоснабжение и водоотведение»/Сост. Боровский Б.И. Дихтярь Т.В. – Симферополь: КАПКС. 2002 г.

## **УДК 624.216625.1**

### **МОСТ ЧЕРЕЗ КЕРЧЕНСКИЙ ПРОЛИВ**

Казьмина А.И., доцент, Ажермачева К.С., студентка

*Национальная академия природоохранного и курортного строительства*

Вот уже несколько лет идут дебаты о строительстве транспортного перехода через Керченский пролив. Специалисты рассматривают две альтернативы: мост над проливом или тоннель под проливом. И за одно, и за другое решение есть веские аргументы. В настоящее время сообщение через пролив осуществляется при помощи паромной переправы.

А ведь мало кто знает, что через Керченский пролив в 1944 году был построен железнодорожный мост. Это был самый протяженный мостовой переход над проливом в истории России [1].

В Крыму еще были гитлеровцы. На Керченском полуострове в районе Еникальского полуострова закрепился десант советских войск.

Мост строился от мыса Чушка на Кавказском берегу. Мыс представлял собой узкую песчаную полосу длиной 16 км и шириной от 60 м у материка с выходом в море шириной полтора километра.

От Крыма Чушка отделена проливами 4,5÷6 км. От Тамани на Кавказском берегу отделена огромным Таманским заливом, на юго-западе остров Тузла, а за ним Крымский берег.

В апреле началось строительство, а к ноябрю 1944 г. временный мост был построен (рис. 1).

Мост начинался от Чушки, шагал через пролив своими 115 пролетами по 29,64 ярды, поворачивающимся на средней опоре 110 м пролетным строением двойного судоходного отверстия для крупных судов, эстакады у берега и дамбы – все это составляло мостовой переход. Одновременно сооружалась железнодорожная линия к мосту: от станции Сенной на Кавказском берегу и от завода Войкова на Крымском берегу.

Вдоль намеченной трассы мостового перехода в проливе забивали кусты тридцатиметровых свай из стальных труб под основные опоры. На металлический ростверк устанавливали деревянные пространственные