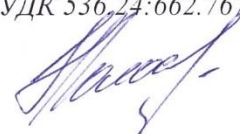


Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

На правах рукописи  
УДК 536.24:662.767.2

**Колосова Нелли Вадимовна**



**ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОБМЕНА В  
БИОГАЗОВОЙ УСТАНОВКЕ ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ ВЫХОДА  
ГОРЮЧИХ ГАЗОВ**

05.23.03 – теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха,  
газоснабжение и освещение

**Диссертация**

на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель

к.т.н., доцент

Монах С.И.



Идентичность всех экземпляров заверяю.

Ученый секретарь диссертационного совета

Д 01.005.01



З.В. Удовиченко

Макеевка – 2019

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
РАЗДЕЛ 1. АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ УСТАНОВОК ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ БИОГАЗА И ТЕПЛОМАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В НИХ.....	11
1.1 Анализ отечественного и зарубежного опыта применения биогазовых установок.....	12
1.2 Устройство и принцип работы биогазовой установки.....	16
1.3 Анализ конструкций метантенков и технологии анаэробной переработки органических отходов животноводческих ферм при производстве биогаза .....	19
1.3.1 Биохимические процессы разложения биомассы при образовании биогаза .....	19
1.3.2 Конструкции метантенков для сбраживания отходов биомассы.....	21
1.4 Факторы, влияющие на интенсивность процесса сбраживания биомассы в метантенке.....	23
1.5 Способы интенсификации теплообмена в метантенке .....	27
1.6 Выводы по первому разделу .....	33
РАЗДЕЛ 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССООБМЕНА В ПРЕДЛАГАЕМОЙ КОНСТРУКЦИИ МЕТАНТЕНКА .....	35
2.1 Теплоотдача от биогаза и сбраживаемой массы к внутренним поверхностям метантенка.....	41
2.2 Теплообмен между наружными поверхностями МТ и окружающей средой .....	46
2.3 Теплообмен при нагреве сбраживаемой массы через змеевик .....	51
2.3.1 Теплоотдача от греющего теплоносителя к стенке змеевика .....	53
2.3.2 Теплоотдача от змеевика при механическом перемешивании сбраживаемой массы.....	54

2.3.3 Теплоотдача от змеевика при естественном перемешивании сбраживаемой массы.....	58
2.4 Определение времени нагрева свежей порции биомассы .....	65
2.5 Выводы по второму разделу .....	69
РАЗДЕЛ 3 ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОООБМЕНА В МЕТАНТЕНКЕ.....	70
3.1 Физическое моделирование объекта исследования .....	70
3.2 Ход проведения эксперимента.....	75
3.3 Планирование и обработка результатов эксперимента.....	78
3.4 Программа автоматизированного расчета параметров МТ .....	93
3.5 Выводы по третьему разделу .....	94
РАЗДЕЛ 4 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАЗРАБОТАННОГО МТ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ АНАЭРОБНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ БИОМАССЫ.....	96
4.1 Экономическое обоснование разработанной интенсификации регулирования температуры греющего теплоносителя .....	96
4.2 Техничко-экономическая оценка применения метода регулирования температуры греющего теплоносителя.....	104
4.3 Экологический расчет применения анаэробной технологии переработки биомассы .....	109
4.4 Выводы по четвертому разделу .....	110
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	112
ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	114
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	115
Приложение А Практический расчет габаритных размеров метантенка и количества биогаза .....	131
Приложение Б Расчет температуры греющего теплоносителя .....	141
Приложение В Определение срока окупаемости биогазовой установки.....	146
Приложение Г Внедрение результатов диссертационной работы.....	150

## ВВЕДЕНИЕ

Использование ископаемого топлива и влияние парниковых газов на окружающую среду инициировали исследования в производстве альтернативных видов топлива из биоресурсов. Количество выбросов парниковых газов в атмосферу растет, при этом основным компонентом является углекислый газ. Кроме того, мировой спрос на энергию стремительно растет. Примерно 88% произведенной энергии в настоящее время производится из ископаемого топлива. С целью снижения расхода природного топлива, последнее десятилетие стремительно развивается альтернативная энергетика. Применение конкретного вида альтернативного топлива зависит от климатических и технологических факторов. Газификация животноводческих предприятий связана с существенными финансовыми затратами, связанными со строительством газопроводов и дополнительными газорегуляторными пунктами. Так же животноводство является одним из основных источников выбросов парниковых газов в атмосферу. Метан и закись азота образуется в результате разложения биомассы на животноводческих и птицеводческих фермах при ее хранении или переработке в системах, способствующих возникновению анаэробных условий.

В этом контексте биогаз, получаемый в результате разложения отходов, может играть важную роль в энергетическом будущем при газификации животноводческих ферм.

**Актуальность темы.** С каждым годом возрастает интерес к альтернативным видам топлива. Это связано с рядом объективных причин: растущая нехватка традиционного органического топлива, экологические аспекты использования природных источников энергии, а также требования действующих программ по энергосбережению. Для животноводческих предприятий применение биотехнологий путем анаэробной переработки отходов целесообразно.

Рациональным путем утилизации отходов животноводческих ферм является анаэробное сбраживание, при котором обеспечивается обезвреживание биомассы и образование биогаза. Биогазом можно частично заменить природный газ,

расходуемый на нужды фермерского хозяйства, а органическое удобрение можно использовать в сельскохозяйственной отрасли.

Для стабильного протекания процесса сбраживания отходов животноводческих ферм необходимо соблюдение всех технологических параметров, влияющих на объем получаемого биогаза. Одним из основных параметров является температура сбраживания. Повышение или понижение температуры сбраживания в метантенке (МТ) приводит к уменьшению объема получаемого биогаза. Для поддержания температуры сбраживания предусматривается нагрев МТ греющим теплоносителем, циркулирующим в змеевике (ЗМ). Определение тепловой мощности, необходимой для нагрева сбраживаемой массы с учетом всех влияющих факторов, является обязательным для качественного регулирования температуры греющего теплоносителя.

Таким образом, выбранная тема для диссертационных исследований является актуальной.

**Степень разработанности темы.** Вопросами теплообмена в МТ занимались такие ученые как Г.С. Ратушняк, В.В. Джеджула, К.В. Анохина, Д.В. Костромин, В.С. Вохмин, Ю.В. Караева, А.А. Землянка, С.М. Биркин, А.Г. Кудряшова, А.А. Чернышов, Л.А. Куцев, Д.Ю. Суслов, Ю.П. Ильин, Ю.Н. Сидыганов, Е.М. Онучин, Н.Ю. Лизунов.

Среди зарубежных учёных, занимающихся тепловыми процессами в МТ биогазовой установки, можно выделить E.L. Iannotti, J. Durand, L.P.Walker, R.A. Pellerin, M.G. Heisler, G.S. Farmerand, L.A. Hills.

Регулирование температуры греющего теплоносителя в зависимости от влияющих факторов, таких как температура наружного воздуха и толщина отложений на наружной стенке змеевика, малоизучена и требует дальнейших теоретических и экспериментальных исследований.

**Цель исследования.** Увеличение объема получаемого биогаза при сбраживании отходов животноводческих ферм в метантенках путем интенсификации процессов тепломассообмена в биогазовой установке.

**Задачи исследования:**

- провести аналитические исследования существующих конструкций МТ и технологических особенностей производства биогаза путем сбраживания отходов животноводческих ферм в метантенке;
- разработать математическую модель процессов тепломассообмена в метантенке при сбраживании отходов животноводческих ферм;
- создать экспериментальную установку и провести экспериментальные исследования влияния температуры наружного воздуха и толщины отложений на греющем змеевике на интенсивность теплообмена в метантенке и, следовательно, на температуру сбраживаемой массы при образовании биогаза;
- разработать программное обеспечение для проектирования метантенков и расчета технологических карт подачи греющего теплоносителя при эксплуатации метантенков;
- обосновать экономическую эффективность предложенной методики интенсификации процессов тепломассообмена в биогазовой установке, а также частичную замену природного газа, сжигаемого для нагрева теплоносителя;
- определить экологическую эффективность применения анаэробной переработки отходов животноводческих ферм.

**Объект исследования** – метантенк биогазовой установки для получения горючих газов при сбраживании отходов животноводческих ферм.

**Предмет исследования** – интенсивность процессов тепломассообмена в метантенке между греющим элементом и сбраживаемой массой.

**Научная новизна полученных результатов:**

- впервые получена математическая модель теплообменных процессов в метантенке биогазовой установки, позволяющая корректировать интенсивность тепломассообмена при изменении температуры наружного воздуха и образовании отложений на наружной поверхности греющего змеевика;
- разработана математическая модель процессов тепломассообмена в условиях отсутствия механического перемешивания сбраживаемой массы и барботажа выделяющегося биогаза;

- впервые разработано математическое обеспечение для расчета конструктивных и технологических параметров биогазовой установки, представляющее собой алгоритм и программу расчета.

### **Теоретическая и практическая значимость.**

Теоретическая значимость результатов исследования:

- на основе полученной математической модели тепломассообменных процессов в метантенке биогазовой установки разработан метод расчета температурного режима сбраживаемой массы в зависимости от толщины отложений на ЗМ и колебаний температуры наружного воздуха;

- получены эмпирические зависимости теплофизических характеристик сбраживаемой массы от температуры сбраживания и объемной доли сухого вещества;

- разработана методика расчета скорости всплытия пузырьков биогаза для определения коэффициента теплоотдачи от греющего элемента к сбраживаемой массе при барботаже биогаза;

- разработана методика оценки экономической эффективности интенсификации процессов тепломассообмена в метантенке за счет регулирования температуры греющего теплоносителя в зависимости от толщины отложений на ЗМ и колебаний температуры наружного воздуха;

- материалы диссертационной работы включены в рабочие программы учебных дисциплин «Энергосбережение в системах теплогазоснабжения и вентиляции», «Автономные системы энергоснабжения», «Моделирование процессов тепломассообмена в системах теплогазоснабжения» для подготовки бакалавров и магистров по направлению «Строительство».

Практическая значимость результатов исследования:

- разработана методика регулирования температуры греющего теплоносителя в змеевике метантенка в зависимости от толщины отложений на поверхности нагрева и температуры наружного воздуха;

- доказано увеличение объема выхода биогаза при реализации предложенной методики интенсификации теплообмена внутри метантенка;

- разработана программа расчета «Метантенк» для проектирования биогазовых установок и расчета температурного режима подачи греющего теплоносителя в годовом цикле эксплуатации;
- обоснована экономическая эффективность предложенного метода интенсификации процессов теплообмена с целью увеличения объема выхода горючих газов;
- обоснована экологическая эффективность применения анаэробного сбраживания отходов животноводческих ферм в метантенках биогазовых установок.

**Методология и методы исследования.** В процессе выполнения работы автором был применен системный подход к изучению тепломассообменных процессов в метантенке биогазовой установки. В диссертации использованы численные и экспериментальные методы исследования. Задачи, поставленные в диссертационной работе, решались методами планирования эксперимента, математического моделирования и дисперсионного анализа. Планирование экспериментальных исследований осуществлялось с применением полного двухфакторного эксперимента.

**Личный вклад соискателя** включает постановку цели и задач исследования, разработку математической модели тепломассообмена в метантенке биогазовой установки, создание конструктивной схемы экспериментальной установки, проведение теоретических и экспериментальных исследований, разработку программы «Метантенк» для практических расчетов при проектировании, экономическое и экологическое обоснование предложенного метода интенсификации процессов теплообмена в биогазовой установке.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

- математическая модель тепломассообменных процессов в метантенке биогазовой установки, позволяющая корректировать интенсивность тепломассообмена в зависимости от колебаний температуры наружного воздуха и толщины отложений на поверхностях греющего змеевика;



- экспериментально-статистическая математическая модель температуры греющего теплоносителя в змеевике метантенка в зависимости от влияния внешних факторов – температуры наружного воздуха и толщины слоя отложений на змеевике;

- эмпирические зависимости теплофизических характеристик сбраживаемой массы от температуры сбраживания и объемной доли сухого вещества;

- методика расчета скорости всплытия пузырьков биогаза для определения коэффициента теплоотдачи при барботаже биогаза и отсутствии перемешивания;

- программа расчета «Метантенк» для практического проектирования биогазовых установок.

**Степень достоверности и апробация результатов диссертационной работы.** Достоверность результатов исследований подтверждается использованием основополагающих положений теории тепломассообмена, современных методов математического моделирования, а также адекватностью результатов экспериментальных исследований. Достоверность обеспечивается также широкой публикацией работ по данной теме и обсуждением их на конференциях различного уровня.

Основные результаты диссертации докладывались на:

- IX-XI, XIII Международных конференциях молодых ученых, аспирантов и студентов Донбасской национальной академии строительства и архитектуры «Здания и конструкции с применением новых материалов и технологий» (г. Макеевка, 2010, 2011, 2012, 2014 гг.);

- II Международной научно – практической конференции «Научно – техническое творчество молодежи – путь к обществу, основанному на знаниях», Московский государственный строительный университет (г. Москва, 2010 г.);

- III Международной конференции молодых ученых ERECS-2011 «Энергетика та системи управління», Национальный университет «Львовская политехника» (г. Львов, 2011 г.);

- международной научно-практической конференции «Строительство-2013» (г. Ростов-на-Дону, 2013 г.);

- XXXX Всеукраинской студенческой научно-технической конференции «Научно-технические достижения студентов строительно-архитектурной отрасли Украины» (г. Макеевка, 2014 г.);

- VIII Республиканской научно-практической конференции (с международным участием) «Современное строительство и архитектура. Энергосберегающие технологии» (г. Бендеры, 2016 г.);

- II Международной научно-технической конференции «Энергетические системы» (г. Белгород, 2017 г.).

**Публикации.** Результаты исследований опубликованы в 13 печатных работах общим объемом 2,18 а.л., лично автором 0,98 а.л., в том числе 5 работ опубликованы в изданиях, входящих в перечень специализированных научных журналов, утвержденный МОН Украины, 1 работа в издании, входящем в перечень специализированных научных журналов, утвержденный Министерством образования и науки ДНР, получен 1 патент на полезную модель, 6 публикаций по материалам конференции.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных литературных источников и приложений. Общий объем работы - 151 страниц, в том числе 103 страницы основного текста; 16 страниц списка использованных источников; 21 страница приложений.

## РАЗДЕЛ 1

### АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ УСТАНОВОК ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ БИОГАЗА И ТЕПЛОМАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В НИХ

В такой отрасли как животноводство существует серьезная проблема - утилизации отходов ферм. Животноводство является одним из основных источников выбросов парниковых газов в атмосферу. На животноводческих фермах загрязнение атмосферы происходит от двух источников. Первым источником загрязнения является кишечная ферментация животных, в результате которой в атмосферу поступает метан ( $\text{CH}_4$ ). Вторым источником выбросов метана и закиси азота ( $\text{N}_2\text{O}$ ) являются системы уборки и хранения биомассы [1,2,3].

Метан образуется в результате разложения биомассы на животноводческих и птицеводческих фермах при ее хранении или переработке в системах, способствующих возникновению анаэробных условий.

По данным организации Global Methane Initiative мировой объем выбросов метана составляет 243,95 млн. т эквивалента  $\text{CO}_2$  за 2010 год из отходов сельского хозяйства. Для уменьшения выбросов от отходов животноводческих ферм применяются различные способы улавливания выделяющихся парниковых газов.

В аспекте удорожания добычи и транспортировки природных энергоносителей, таких как природный газ и нефть, решение этой проблемы приобретает особое значение, так как органические отходы ферм являются потенциальным сырьем для биотехнологий. Биотехнологии предусматривают несколько стадий разложения органических веществ (ОВ) с дальнейшим производством биотоплива (биогаза). Биогаз содержит в своем составе метан 40-60%, углекислый газ 30-60%, и небольшое количество водорода до 1% и сероводорода - до 3%. После очистки от примесей до состояния биометана, им можно частично заменить природный газ, без перенастройки газосжигающего оборудования [3,4].

## 1.1 Анализ отечественного и зарубежного опыта применения биогазовых установок

Технология получения биогаза путем переработки органических отходов (биомассы) в анаэробных условиях, давно известна человечеству. Она успешно применяется в ряде стран с развитой сферой сельского хозяйства. США, ЕС, Китай, Индия, Бразилия являются лидерами по производству биогаза (БГ) [1,2,4-9].

На сегодняшний день возобновляемые источники энергии занимают значительное место в энергетическом балансе стран мира.

Использование электроэнергии и тепла, производимого с помощью анаэробной переработки биомассы, в Европе сосредоточено в основном в Австрии, Финляндии, Германии, Дании и Великобритании. Германия является лидером по производству биогаза в Европе. В Германии в 1992 году насчитывалось 139 биогазовых установок, а в настоящий момент работает более 7000 больших установок анаэробного сбраживания сельскохозяйственных отходов. Крупнейшая биогазовая установка (БГУ) расположена на юге Германии, позволяющая перерабатывать до 120 т отходов животноводческой фермы в месяц. Площадь, занимаемая биогазовой установкой составляет 3 га. Корпус метантенка выполнен из кислотостойкого железобетона диаметром 15 м и высотой 6 м. Получаемый БГ сжигают для получения электрической энергии и теплоты [10-12].

В Австрии, в настоящее время, работает около 120 биогазовых установок, с объемами реакторов каждой более 2000 м<sup>3</sup>. Около 25 установок находятся в стадии проектирования и строительства [1,13].

Высокая степень развития рынка биогазовых технологий имеет место в муниципальных предприятиях утилизации сточных вод, очистке промышленных сточных вод и утилизации сельскохозяйственных отходов. В Швеции энергия биомассы составляет 50% необходимой теплоты. В Англии, на родине первого промышленного биогазового реактора, с помощью БГ еще в 1990 г. удалось

покрыть все энергозатраты в сельском хозяйстве. В Лондоне действует один из крупнейших в мире комплексов по переработке бытовых сточных вод [12-13].

В США первая БГУ по переработке животноводческих отходов была построена в 1939 году и успешно работала в течение более 30 лет. В 1954 г. был построен первый завод по переработке коммунальных отходов с получением БГ в Форт-Додже, штат Айова. Биогаз подавался в двигатель внутреннего сгорания для выработки электроэнергии при мощности электрогенератора 175 кВт. Сейчас в США производство БГ поддерживается законодательно на государственном уровне. Насчитывается несколько сотен крупных биогазовых установок, перерабатывающих отходы животноводства, и тысячи установок, утилизирующих городские сточные воды. Биогаз используется в основном для получения электричества, отопления домов и теплиц. Больше всего биогазовых фермерских установок находится в Калифорнии, Пенсильвании, Висконсине и Нью-Йорке.

Среди развивающихся стран распространено производство энергии и тепла с помощью переработки отходов на небольших биогазовых установках. Около 16 миллионов хозяйств по всему миру используют энергию, производимую в биогазовых установках, для освещения, обогрева и приготовления пищи. Это 12 миллионов хозяйств в Китае, 3,7 миллиона хозяйств в Индии и 140 тысяч хозяйств в Непале [1,7,11,13].

В Китае в конце 90-х годов эксплуатировалось более 10 млн. малых биогазовых установок. Они производили около 7 млрд. м<sup>3</sup> биогаза в год.

В сельских районах Китая в 2006 году действовало 17 млн. биогазовых установок, что позволило заменять около 10 млн. т условного топлива, при этом более 50 миллионов человек пользуются биогазом в качестве топлива. Типичная БГУ имеет объем реактора около 6-8 м<sup>3</sup>, производит 300 тыс. м<sup>3</sup> биогаза в год, работая ежегодно от 3 до 8 месяцев, и, в зависимости от провинции, стоит около \$200-250. Большинство установок очень просты и, после определенного обучения фермеры строят и эксплуатируют установки самостоятельно [1,8,12,13,14].

С 2002 года правительство Китая выделяет ежегодно около 200 миллионов долларов на поддержку строительства биогазовых установок. Дотация на каждую

установку составляет примерно 50% средней стоимости. Таким образом, правительство добилось годового роста количества биогазовых установок до одного миллиона в год. На индустриальной основе в Китае работают несколько тысяч средних и крупных установок, и планируется увеличение их количества.

В настоящее время ставится задача достичь к 2020 году уровня 25 млрд. м<sup>3</sup> биогаза в год, что даст возможность обеспечить им до 300 млн. человек.

На Украине существуют единичные примеры внедрения биогазовых технологий. Первая из ныне работающих на отходах животноводства БГУ промышленного типа, была построена в 1993 г. на свиноферме (8000-10000 поголовья) комбината «Запорожсталь» в г. Запорожье по технологиям BigadanLtd” (Дания). Объем МТ составляет 595 м<sup>3</sup>, принятый температурный режим – мезофильный.

На свиноферме с поголовьем 15000 свиней корпорации Агро-Овен, Еленовка, Днепропетровской области, построена БГУ компании Biomass Technology Group (Голландия) в 2003 году. БГУ состоит из двух реакторов объемом 1000 м<sup>3</sup> каждый. Путем когенерации получаемого биогаза производится 180 кВт электроэнергии.

В 2009 году запущена в эксплуатацию БГУ, построенная по технологии немецкой компании LIPP для с/х компании «Элита», пгт. Терезино, Киевской области с поголовьем 1000 голов. Объем МТ составляет 1500 м<sup>3</sup> работающего при мезофильном режиме, мощностью установки 250 кВт.

Одной из ведущих компаний на Украине занимающихся проектированием и строительством биогазовых установок является «Зорг Биогаз Украина». В 2009 году запущена в эксплуатацию БГУ на ферме крупного рогатого скота (КРС) «УМК», с. В. Круполь, Киевская обл. с поголовьем 6000 голов КРС, перерабатывающая навоз КРС и силос кукурузы в трех реакторах объемом 2400 м<sup>3</sup> каждый и один - 1000 м<sup>3</sup>. Мощность установки составляет 955 кВт [15,16].

На 2013 год этой компанией запущено в эксплуатацию 4 биогазовых установки, три из которых предназначены для работы с отходами животноводческих ферм. Одним из крупнейших объектов этой компании является

БГУ построенная в с. Подгородное Днепропетровской области на базе агрохолдинга «Демис Агро» свиной направленности мощностью 125 кВт электроэнергии [17].

В России первый реактор был запущен в 2009 году в деревне Дошино Калужской области. Позднее в Белгородской области запустили биогазовые станции «Байнцуры» на базе свиноводческого комплекса, а затем «Лучки» [18]. «Лучки» является первой в России биогазовой станцией промышленного масштаба. В июне 2012 года передала в сеть первую электроэнергию, а в июле 2012 вышла на проектную мощность 2,4 МВт [19,20].

Среди крупных производителей биогазовых установок в России можно выделить компании: ЗАО "Центр ЭкоРос", ООО "Гринтек", ОАО "Волжский дизель имени Маминых", ООО "Мелькомпинжинеринг", ООО "Сибирский институт прикладных исследований", ЗАО "Энерг-биогаз", ОАО "Концерн КОНАТЭМ", корпорация "БиоГазЭнергоСтрой" и др. Продукция корпорации «БиоГазЭнергоСтрой» и сегодня вполне конкурентоспособна на мировом рынке. Российские станции работают и строятся в Прибалтике, Израиле, в разработке несколько проектов на территории Беларуси. Технологии корпорации «БиоГазЭнергоСтрой» приспособлены к работе при температуре внешней среды от +40°C до -40°C. В настоящий момент Корпорация «БиоГазЭнергоСтрой» реализует комплексный проект по внедрению биогазовых технологий в российских регионах и странах СНГ. Были подписаны протоколы и соглашения с руководством 27-ми регионов России, в том числе: Белгородской, Нижегородской, Новосибирской, Тамбовской областей, Ставропольского края, Воронежской, Орловской, Ростовской областей и других. Эти соглашения предусматривают строительство в регионах более 50-ти биоэнергостанций, работающих на сырье животноводства, растениеводства, а также создание таких установок на базе очистных сооружений городского водоканала (г. Белгород). Планируемая установленная мощность каждой станций составит от 350 кВт до 10 МВт. Суммарная мощность станций превысит 120 МВт. Они подтверждены

всеми необходимыми сертификатами и лицензиями, как российскими, так и международными [17-23].

В настоящее время в странах СНГ возрос интерес к получению энергии и биоудобрений путем переработки сельскохозяйственных отходов. Этому способствуют высокая стоимость энергоресурсов и удобрений, а также ухудшающееся состояние окружающей среды. Однако из-за низкой информированности фермеров о практических путях внедрения биогазовых технологий, а также высокой начальной стоимости биогазовых установок, общее число биогазовых установок, в странах СНГ не превышает нескольких сотен.

## 1.2 Устройство и принцип работы биогазовой установки

Работа биогазовой установки предполагает максимальную автоматизацию и сведение к минимуму затрат человеческого труда. Принципиальная схема биогазовой установки приведена на рисунке 1.1. [8,10,22,24,25]. Отходы поступают в приемный резервуар для измельчения крупных включений. В нем происходит их предварительное накопление, гомогенизация, перемешивание, осаждение и удаление тяжелых фракций.

Подача сырья в метантенк происходит 1-2 раза в сутки с помощью специального насоса для жидких и вязких субстратов. МТ является основой биогазовой установки, в котором происходит сбраживание биомассы и образование БГ. МТ является газонепроницаемым, герметичным резервуаром. Для поддержания стабильной температуры, внутри метантенка оборудуется система обогрева (змеевик). Субстрат 2 раза в сутки перемешивается при помощи турбинной мешалки. Выгрузка сброженного субстрата происходит автоматически с такой же периодичностью, как и загрузка.



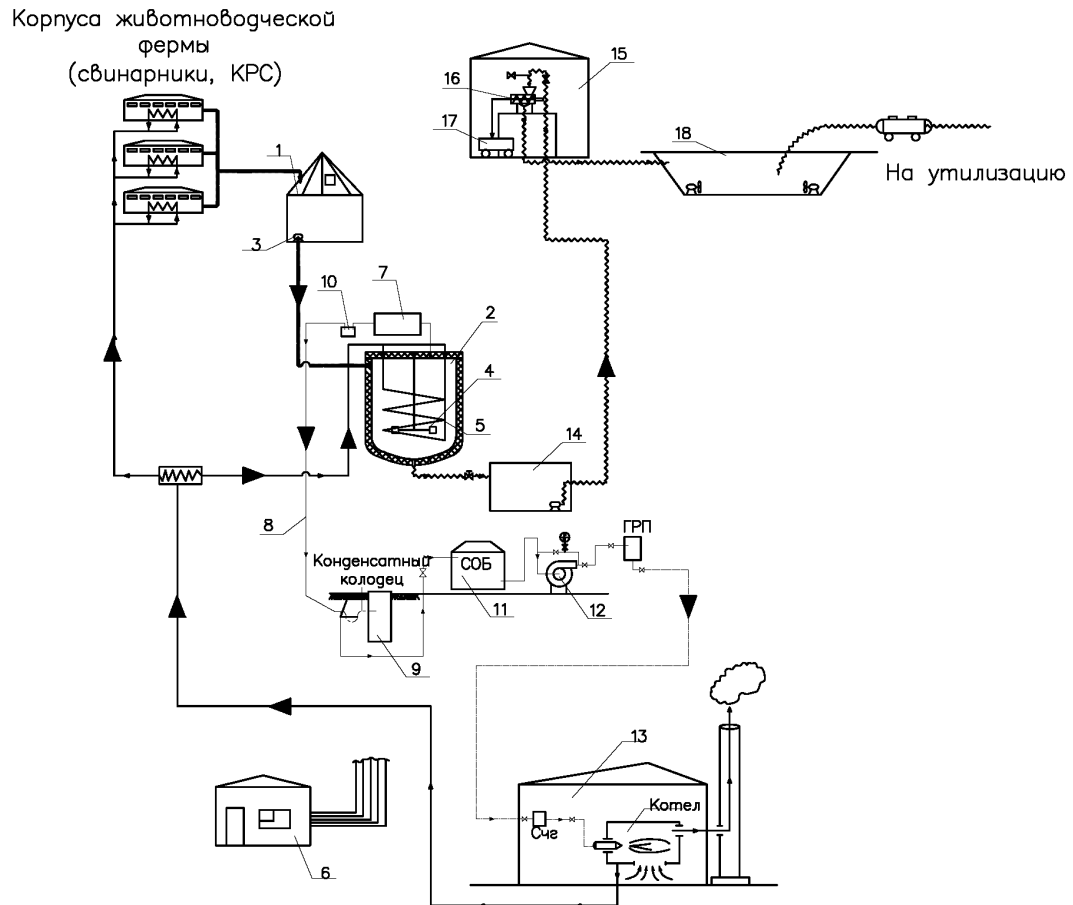


Рисунок 1.1 - Принципиальная схема биогазовой установки:

1-приемный резервуар, 2- метантенк, 3-насос, 4-турбинная мешалка, 5-змеевик, 6- система автоматики, 7-газгольдер, 8-газопровод, 9- устройство для отвода конденсата, 10- предохранительный клапан, 11- станция очистки биогаза, 12- компрессор, 13- теплогенерирующая установка, 14- емкость для сбора сброженной биомассы, 15- сепараторная , 16- шнековый барабанный сепаратор , 17- емкость для твердой фракции, 18-емкость для жидкой фракции

Управление работой всей биогазовой установки происходит по командам системы автоматики. Получаемый БГ собирается в газгольдер. Газгольдер представляет собой емкость, выполняющий функцию аккумуляции газа. Отведение БГ происходит по газопроводу, который оснащен устройствами автоматического отвода конденсата и предохранительными устройствами, защищающими газгольдер от превышения допустимого давления. Из газгольдера идет непрерывная подача биогаза на станцию очистки биогаза (СОБ) и далее

через ГРП, с компрессором, повышающим давление, на котельную. Переработанный субстрат подается на механическое разделение в шнековый барабан-сепаратор. Система механического разделения разделяет массу на твердую (обезвоженный шлам) и жидкую (фугат) фракции. Обезвоженный шлам не имеет запаха, не содержит патогенную микрофлору и является высококонцентрированным, обеззараженным, дезодорированным органическим удобрением, пригодным для непосредственного внесения в почву. Фугат – обеззараженная, дезодорированная жидкость, используемая как органическая подкормка для полива или орошения различных сельскохозяйственных культур [1, 26,27,28].

Автоматика, управляющая биогазовой установкой, контролирует работу насосов, мешалки, системы подогрева, газовой автоматики.

Использование биогаза в качестве альтернативного топлива возможно после предварительной очистки биогаза от воды, сероводорода и диоксида углерода [1,4,8].

Поскольку БГ насыщен влагой, необходимо его охлаждение в конденсационном колодце. После этого БГ подогревается и содержание влаги в нем уменьшается. Содержащийся в биогазе сероводород, смешиваясь с водой, образует кислоту, вызывающую коррозию металла. Наиболее эффективным методом очистки от сероводорода является сухая очистка в специальном фильтре. В качестве десульфуризатора применяются различные абсорбенты. Диоксид углерода может быть отделен путем впитывания в известковое молоко. Углекислота сама по себе является ценным продуктом, который можно использовать в различных производствах.

Получаемым биогазом можно частично заменить природный газ, расходуемый на нужды фермерского хозяйства. На нагрев МТ расходуется получаемого биогаза до 10% летом и до 20% зимой.

### 1.3 Анализ конструкций метантенков и технологии анаэробной переработки органических отходов животноводческих ферм при производстве биогаза

#### 1.3.1 Биохимические процессы разложения биомассы при образовании биогаза

Рациональным путем утилизации отходов животноводческих ферм является анаэробное сбраживание, при котором обеспечивается обезвреживание биомассы и образование БГ.

Основным узлом биогазовой установки является метантенк, в котором происходит анаэробное сбраживание биомассы, обеззараживание ее и образование биогаза.

Разложение органического вещества (ОВ) в МТ представляет собой сложный анаэробный процесс. В процессе сбраживания сложные ОВ разлагаются на более простые. В результате сбраживания образуется БГ и обезвреженная органическая масса. Сброженная биомасса представляет собой качественное органическое удобрение.

Процесс сбраживания можно разделить на 4 этапа, в каждом из которых участвуют разные группы бактерий [1,29-37].

На первом этапе аэробные бактерии преобразуют высокомолекулярные органические субстанции (белок, углеводы, жиры, целлюлозу) в низкомолекулярные соединения, такие как сахар, аминокислоты, жирные кислоты и воду. Гидролиз протекает медленнее. На процесс оказывают влияние уровень рН и длительность сбраживания.

На втором этапе на разложение влияют кислотообразующие бактерии. Отдельные молекулы соединяются с клетками бактерий, где продолжают разлагаться. В этом процессе частично принимают участие анаэробные бактерии, использующие остатки кислорода и образующие тем самым необходимые для метановых бактерий анаэробные условия. При уровне 6-7,5 рН вырабатываются в первую очередь нестойкие жирные кислоты (карбоновые кислоты – уксусная, муравьиная, масляная, пропионовая кислоты),

низкомолекулярные спирты - этанол и газы – двуокись углерода, углерод, сероводород и аммиак. Этот этап носит название фаза окисления (уровень pH понижается).

На третьем этапе кислотообразующие бактерии из органических кислот создают исходные продукты для образования метана, а именно: уксусную кислоту, двуокиси углерода и углерод. Такие бактерии, понижающие количество углерода являются очень чувствительными к температуре.

На последнем этапе образуется метан, двуокись углерода и вода. 90% всего метана вырабатывается на этом этапе, 70% происходит из уксусной кислоты. Таким образом, образование уксусной кислоты (то есть третий этап расщепления) является фактором, определяющим скорость образования метана. Метановые бактерии исключительно анаэробные. Оптимальный уровень pH составляет 7. Схематичное изображение биохимических реакций происходящих в процессе сбраживания приведено на рисунке 1.2.

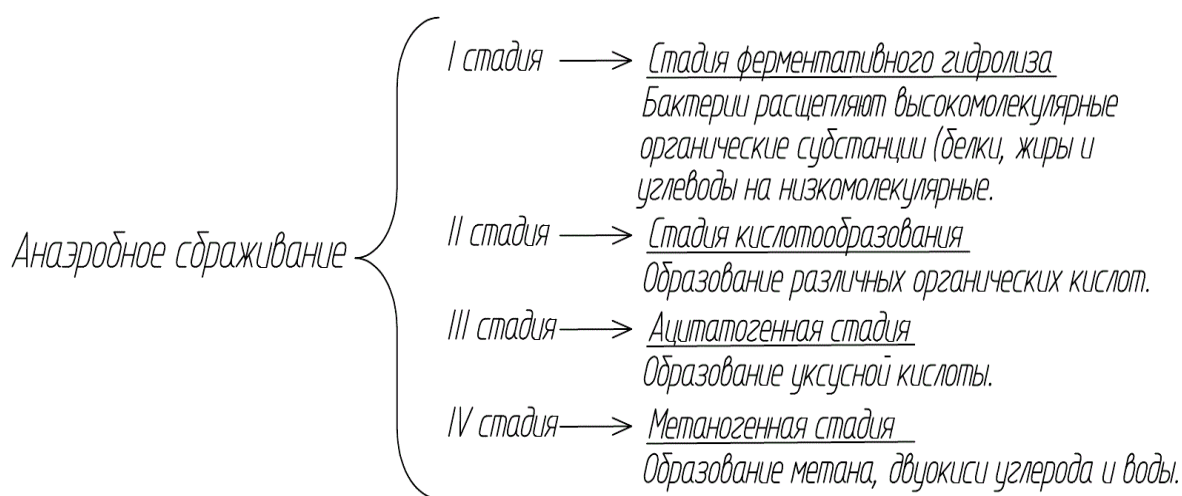


Рисунок 1.2 - Биохимические реакции процесса разложения биомассы

Эти реакции протекают одновременно, причем, метанобразующие бактерии предъявляют более высокие требования к условиям своего существования, чем кислотообразующие. Они нуждаются в анаэробных условиях и требуют более значительного периода времени для их воспроизводства. Скорость и масштабы

развития и жизнедеятельности метанобразующих бактерий зависят от их метаноболической активности.

Соотношение и взаимодействие различных групп микроорганизмов обуславливают стабильность процесса переработки. Для нормального протекания процесса должны обеспечиваться оптимальные условия жизнедеятельности бактерий. Для создания этих условий необходимо соблюдать следующие факторы: определенные свойства сырья, температура процесса сбраживания, концентрация питательных веществ, влажность субстрата, pH среды, анаэробные условия, давление в МТ, длительность сбраживания, интенсивность перемешивания субстрата, конструкция МТ и др. [1,3,22,25,38,39].

Таким образом, к работе МТ предъявляются высокие требования, основные из которых гидравлические, технологические, теплотехнические и др.

### 1.3.2 Конструкции метантенков для сбраживания отходов биомассы

По форме различают МТ: яйцеобразные, цилиндрические, шарообразные, траншейные, кубические и др.

С точки зрения создания наиболее благоприятных условий для перемешивания жидкого субстрата, накапливания газа, отвода осадков и разрушения образующейся корки на поверхности субстрата целесообразно использование резервуаров яйцеобразной формы (Рис.1.3а) [31,38,40]. Крупные реакторы такой формы обычно сооружают из бетона, поэтому для них характерна высокая стоимость изготовления, что существенно ограничивает их применение.

Для цилиндрического резервуара с конусными верхней и нижней частями (Рис.1.3б), как и для овальной формы, характерны небольшое пространство для накопления газа, ограниченный объем плавающей корки, а также хороший отвод шлама. Однако в подобных реакторах создаются менее благоприятные условия для перемещения жидкого субстрата. Резервуары большого объема такой формы, используемые в коммунальных установках для очистки и разложения стоков, как и реакторы овальной формы, изготавливают из бетона. Однако «цилиндрические»

реакторы несколько дешевле. В индивидуальных хозяйствах реакторы данной формы делают из стали.

Цилиндрические резервуары (Рис.1.3в) относительно просты в изготовлении, что объясняется обширным опытом строительства емкостей для сельскохозяйственных целей (стальные, бетонные, стеклопластиковые цистерны-бункера для силоса и других кормов). Однако по сравнению с резервуарами предыдущих форм в цилиндрическом резервуаре невозможно организовать достаточно хорошие условия для перемещения субстрата, при этом приходится считаться с более высокими затратами на удаление осадка и разрушение плавающей корки, что связано с увеличением расхода энергии на перемешивание массы.

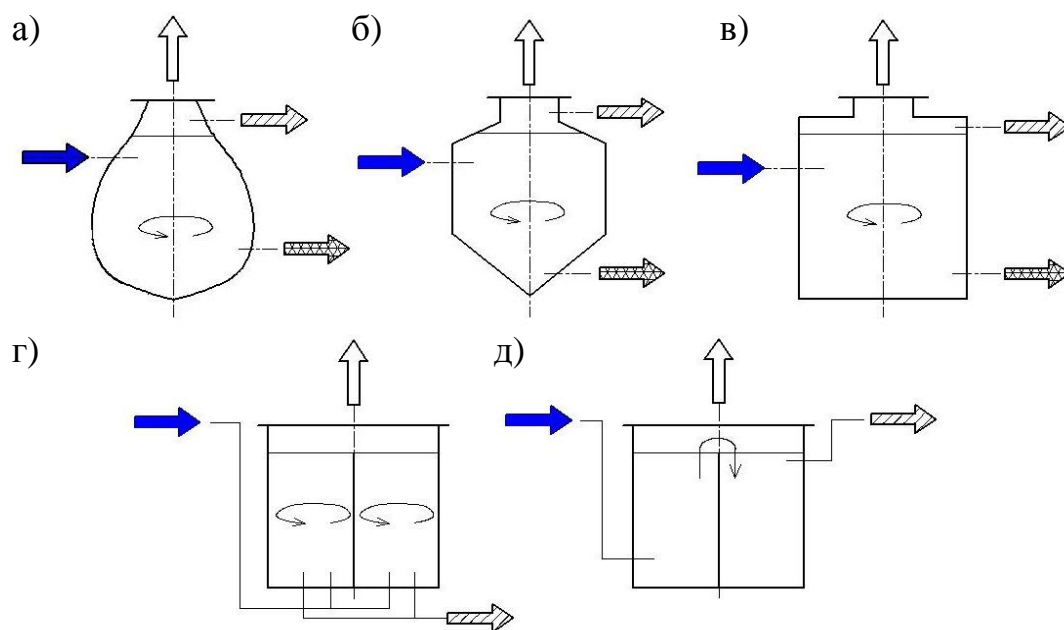


Рисунок 1.3 - Наиболее распространённые формы МТ:

а) – овальная;

б) – цилиндрическая с конусными верхней и нижней частями;

в) – цилиндрическая;

г) – цилиндрическая с перегородкой;

д) – в виде параллелепипеда (с перегородкой)

➡ - свежая биомасса; ➡ - твердый остаток; ➡ - перебродившая биомасса; ➡ - биогаз

Для резервуаров цилиндрической формы, разделенных поперечной вертикальной перегородкой на две камеры (Рис.1.3г), можно организовать систему получения биогаза с поочередным использованием камер резервуара. При такой компоновке уменьшается значение теплоизоляции наружных стенок резервуара, а в перегородку, выполняемую из достаточно теплопроводного материала, несложно встроить какое-либо нагревательное устройство, что придает установке дополнительные конструктивные преимущества.

В простых небольших биогазовых установках МТ имеет форму параллелепипеда (Рис.1.3д). Для повышения эффективности такой реактор перегородками вертикальной стенкой, создавая главную бродильную камеру и камеру для окончательного сбраживания и осаждения шлама. В установках данного типа невозможно обеспечить равномерное перемешивание массы и управление загрузкой рабочего объема резервуара, а также соблюдение времени пребывания массы в реакторе.

#### 1.4 Факторы, влияющие на интенсивность процесса сбраживания биомассы в метантенке

Метаногенные бактерии являются очень чувствительными анаэробами, поэтому необходимо строго соблюдать технологию получения биогаза в анаэробных условиях. Активность обмена веществ и интенсивность производства метана зависит от состава субстрата, поддерживаемой температуры и ее колебаний, срока выдержки, влажности, перемешивания субстрата [1, 5-9, 31-32, 38-41].

Производство БГ может осуществляться в широком температурном диапазоне. В зависимости от температурного режима, который поддерживается в МТ в процессе работы, различают три режима сбраживания: психрофильный ( $10 - 20^{\circ}\text{C}$ ), мезофильный ( $30 - 45^{\circ}\text{C}$ ), термофильный ( $50 - 65^{\circ}\text{C}$ ).

Сбраживание биомассы при психрофильном режиме работы, в климате с низкими температурами не применяется. Это связано с тем, что увеличивается

длительность сбраживания и наблюдается небольшая производительность биогаза.

На практике применяются мезофильный и термофильный режимы сбраживания. Каждый из этих режимов имеет свои достоинства и недостатки. Преимуществами термофильного режима сбраживания является высокая скорость разложения биомассы, увеличение объема получаемого БГ. К недостаткам термофильного режима относятся большое количество тепла, требуемого на поддержание высокой температуры в МТ, при этом возрастает чувствительность бактерий к минимальным изменениям температуры, что приводит к уменьшению объема получаемого БГ. Поэтому работа при высоких температурах требует установки специальных систем автоматизации и точного управления работой биогазовой установки. К недостаткам термофильного режима сбраживания можно отнести тот факт, что при высоких температурах растворенная в биомассе двуокись углерода интенсивнее переходит в газообразную фазу (в биогаз), при этом содержание метана сокращается.

Степень чувствительности бактерий к изменению температуры зависит от температурного режима, при котором происходит сбраживание биомассы. В процессе сбраживания могут быть допустимы изменения температуры в пределах: психрофильный температурный режим:  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  в час; мезофильный температурный режим:  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  в час; термофильный температурный режим:  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$  в час [4].

Большинство установок работают в мезофильном режиме с температурой сбраживания  $40^{\circ}\text{C}$ . При этом наиболее активно развиваются метаногенные бактерии с максимальным образованием БГ.

С целью поддержания постоянной температуры предусмотрены нагревательные элементы, смонтированные внутри МТ. Различают различные способы нагрева субстрата: такие как нагрев горячей водой через ЗМ, электронагрев, нагрев паром. Количество теплоты необходимое для поддержания заданной температуры состоит из количества теплоты затрачиваемой на нагрев свежей порции БМ и на компенсацию теплопотерь [42-49].



Одним из условий эффективного разложения биомассы в биореакторе является массообмен на поверхности твердой и жидкой фаз субстрата. Для обеспечения развитой поверхности массопереноса необходимо перед загрузкой в МТ измельчить биомассу. Это связано с тем, что в свежей биомассе содержится большое количество сырья растительного происхождения. Перед подачей сырья для измельчения его необходимо тщательно перемешать, и для этого навозосборники животноводческих ферм оборудованы устройствами для перемешивания осадка и гомогенизации навоза [50].

Равномерное распределение температуры по всему объему достигается путем перемешивания биомассы.

Различают механическое, гидравлическое перемешивание и барботаж.

Для реакторов малых объемов применяются механические мешалки с ручным приводом.

Так же одной из задач мешалки является предотвращение образования корки на поверхности сбрасываемой массы (СМ) и выпадения осадка в виде твердых частиц СМ.

Одним из важных факторов, влияющих на метановое брожение, является соотношение углерода (С) и азота (N) в перерабатываемом сырье. Наиболее благоприятное соотношение углерода и азота для микробиологической конверсии органических веществ в БГ соответствует значению  $C:N = 10...16$ . Если соотношение  $C/N$  чрезмерно велико, то недостаток азота будет служить фактором, ограничивающим процесс метанового брожения. Если же это соотношение слишком мало, то образуется такое большое количество аммиака, что он становится токсичным для бактерий [4].

Для того чтобы процесс сбрасывания в МТ протекал равномерно, в нем необходимо поддерживать следующие условия [1, 4, 29, 31, 40, 42, 51-52]:

- $pH = 6,0 - 7,5$ ;
- содержание жирных летучих кислот 3 - 8 мг экв/л;
- содержание щелочей 70 - 76 мг экв/л;
- содержание аммонийных солей азота 500 - 600 мг/л;

- поддержание температурного режима.

Для этого подачу и выгрузку осадка в МТ в течение суток рекомендуется выполнять равномерно (прямоточная схема эксплуатации). Тем не менее, в общем плане, метантенки могут работать в режимах:

- периодическом;
- непрерывном;
- квазинепрерывном (при загрузке и выгрузке сбраживаемой массы (СМ) через короткие промежутки времени).

Твердые частицы биомассы образуют осадок, а более легкие материалы поднимаются на поверхность сырья и образуют корку. Это приводит к уменьшению газообразования. Перед загрузкой биомассы в МТ необходимо ее гомогенизировать и стремиться к отсутствию твердых веществ в сырье.

Влажность субстрата играет важную роль в процессе сбраживания. Для возможности равномерного перемешивания и стабильного разложения бактерий влажность биомассы должна находиться в пределах 85-95%.

Рабочее давление в МТ играет незначительную роль в образовании биогаза, поэтому большинство МТ работают при давлении, незначительно превышающе атмосферное.

Таким образом, достижение максимального количества получаемого биогаза возможно только при соблюдении всех технологических факторов, основными из которых являются температура сбраживания, режим перемешивания, влажность биомассы, длительность сбраживания.

Процесс развития биогазовых установок показал, что конструктивное исполнение МТ имеет большое значение для организации технологии сбраживания биомассы.

МТ должен отвечать следующим требованиям [53-55]:

- прочность и надежность в процессе эксплуатации биогазовой установки;
- коррозионная стойкость внутренней поверхности МТ при сбраживании биомассы;

- минимальные тепловые потери в окружающую среду, через наружные поверхности;
- соблюдение технологических режимов сбраживания;
- простота загрузки свежей биомассы и выгрузки сброженного субстрата;

Стабильная работа МТ должна сопровождаться постоянным соблюдением технологических факторов.

Недостатком современных МТ большого объема является то, что наблюдается неравномерный и нестабильный нагрев биомассы по всему объему. Это связано с тем, что возникает непрогретаемый слой биомассы в нижней части МТ и перегрев ее в области нагревателя. Это приводит к угнетению развития метаногенных бактерий и, как следствие, снижению объема получаемого биогаза. Поэтому возникает интерес к рассмотрению и интенсификации термостабилизационных процессов в МТ.

### 1.5 Способы интенсификации теплообмена в метантенке

Анализ конструкций МТ показал, что для интенсификации процесса образования биогаза имеет значение теплообмен в МТ между нагревательным элементом и сбраживаемой массой, распределение температур по всему объему СМ при перемешивании, а также теплообмен между наружными поверхностями МТ и окружающей средой. Этим вопросом занимались такие ученые как Г.С. Ратушняк, В.В. Джеджула, К.В. Анохина, Д.В. Костромин, В.С. Вохмин, Ю.В. Караева, А.А. Землянка, С.М. Биркин, А.Г. Кудряшова, А.А. Чернышов, Л.А. Куцев, Д.Ю. Суслов, Ю.П. Ильин, Ю.Н. Сидыганов, Е.М. Онучин, Н.Ю. Лизунов.

Большое распространение в качестве устройства для обеззараживания сточных вод метантенки получили в очистных сооружениях водоотведения. В данных сооружениях, в отечественной практике, подогрев осадка наиболее часто осуществляется острым паром. Пар низкого давления с температурой 110...112°C подается во всасывающую трубу насосом при подаче и перемешивании осадка

или непосредственно в МТ через паровой инжектор. Данный метод подогрева СМ имеет ряд недостатков. В процессе эксплуатации отверстия паровпускных труб инжекторного подогревателя уменьшаются из-за образования на них солей отложений. Так же при внезапном снижении давления пара в паропроводящей распределительной системе осадок из МТ может попасть в паропровод и вызвать аварию. Основным недостатком применения данного способа нагрева являются высокие температуры пара, приводящие к гибели бактерий участвующих в процессе образования метана [56-58].

В работе [59] предложена схема и математическая модель теплообмена в МТ с лопастной мешалкой и теплообменником (Рис.1.4).

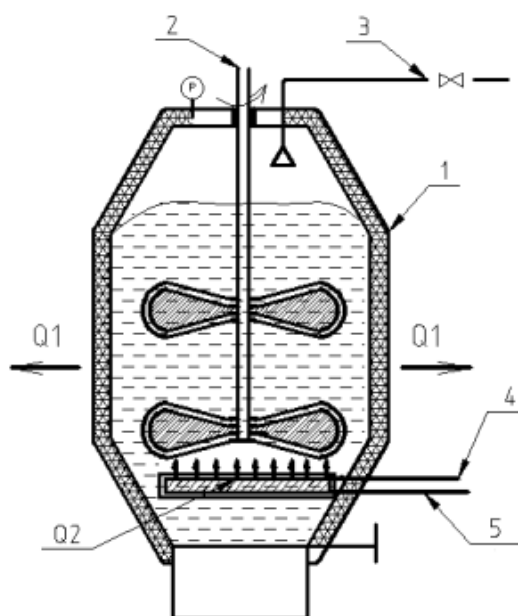


Рисунок 1.4 - Биогазовый реактор с лопастной мешалкой и теплообменником:

1 - утепленный корпус; 2 – лопастная мешалка; 3 – трубопровод отвода биогаза; 4 – подающий трубопровод теплоносителя; 5 – обратный трубопровод теплоносителя;  $Q_1$  – теплопотери корпуса;  $Q_2$  – количество теплоты передаваемое от теплоносителя к сбраживаемой массе

В предлагаемой автором схеме биогазового реактора исследовались особенности нестационарного теплообмена. Для нагрева использовался теплоноситель с температурой на входе  $60^{\circ}\text{C}$ , который протекает в трубопроводах 4 и 5. Перемешивание субстрата производится лопастной мешалкой 2.

Недостатком данного биогазового реактора является невозможность равномерного нагрева всего объема сброживаемой массы, так как нагревательный элемент устанавливается в нижней части реактора. В период, когда лопастная мешалка отключена, будет наблюдаться перегрев нижней части и понижение температуры СМ в верхней части реактора.

В работе [60] предлагается использовать конструкцию квазинепрерывного типа с трехсекционным МТ, в качестве нагревателя применяется трубчатый электронагреватель. Схема установки приведена на рисунке 1.5.

Установка представляет собой трехстадийный МТ 1, в центральной части которого расположен трубчатый электронагреватель. Сырье загружается через приемное устройство в крайнюю зону реактора и далее перемещается в термофильную камеру 4, где подогревается электронагревателем 5. Подогреваемое сырье перемешивается при помощи мешалок 8. Давление в МТ регулируется при помощи манометра 9. Газ отбирается шлангами в газгольдер.

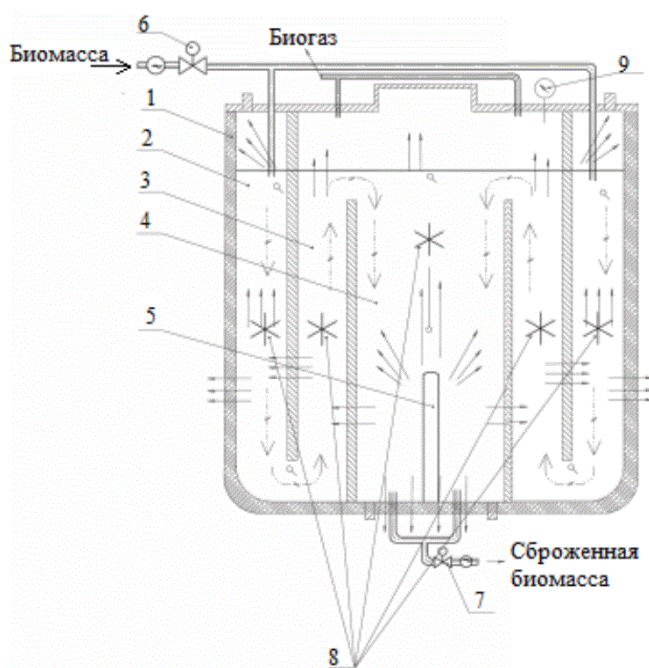


Рисунок 1.5 - Схема биогазовой установки с трехстадийным метантенком:

1 – трехстадийный МТ; 2 – психрофильная камера; 3 – мезофильная камера; 4 – термофильная камера; 5 - трубчатый электронагреватель; 6 – насос подачи биомассы; 7 – насос откачки сброженной биомассы; 8 – перемешивающие устройства; 9 – манометр

В каждой зоне сбраживания поддерживается установленный температурный режим, позволяющий обеспечивать выработку газа. Но в данной конструкции имеется недостаток, заключающийся в неравномерном распределении теплоты внутри реактора, что ведет к дополнительным затратам электроэнергии при работе МТ.

В работе [61] для поддержания постоянной температуры предложен конвективно-индукционный нагрев (Рис. 1.6).

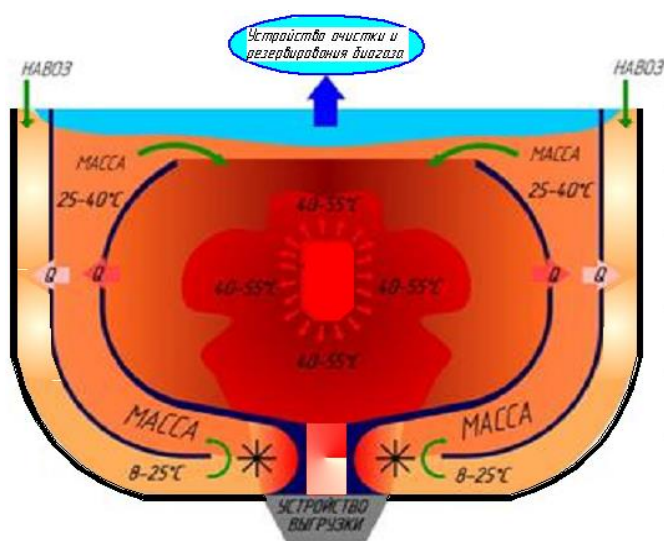


Рисунок 1.6 - Схема МТ с конвективно-индукционным нагревом

Схема физической модели процесса непрерывного метанового сбраживания с конвективно - индукционным нагревом разработана так, что высокотемпературная (термофильная) зона находится в центральной части МТ, при этом масса центральной зоны разогревает мезофильную и психрофильную зоны за счет конструктивных элементов реактора, а именно сужение зоны выгрузки переработанного навоза, приводит к интенсивным теплофизическим процессам передачи тепла вновь поступающему сырью. Также разогрев биомассы осуществляется контактным нагревом через перегородки, разделяющие эти зоны, и диффузии субстрата.

В период нагрева СМ температура в центральной части биореактора увеличивается до 55°C и поддерживается постоянной в заданном режиме, далее

происходит конвективный нагрев с соседними секциями МТ. Распределение тепла должно происходить равномерно по всему объему реактора.

Нагрев в пределах температур 40...55°C осуществляется в центральной секции МТ индукционным нагревателем с частотой тока 50 Гц, что соответствует термофильному режиму сбраживания. Заданная температура поддерживается постоянно для обеспечения непрерывного режима работы реактора. При поддержании заданного максимума температуры происходит теплообмен биомассы, при котором должен достигаться мезофильный и психрофильный режим сбраживания в средней и наружной секциях МТ. Теплообмену способствуют массообменный процесс при загрузке и выгрузке сырья, а также циклическое перемешивание субстрата. Мезофильный режим сбраживания происходит в средней секции МТ, где за счет конвективного нагрева достигается температура в пределах 25...40°C. Крайней секции реактора соответствует психрофильный режим, где температура сбраживания находится в пределах 8...25°C.

В работе [44] описан горизонтальный мобильный МТ для переработки отходов и получения биогаза. Брожение в нем происходит поэтапно в две стадии, каждая из которых протекает в отдельной секции устройства.

В реакторах с разделением на секции с различными температурными режимами сбраживания технологически проблематично поддерживать расчётные температуры в каждой зоне. Также учитывая то, что бактерии сильно восприимчивы к температуре, резкое изменение ее может привести к угнетению жизнедеятельности бактерий. На практике большинство установок работают в одном заданном температурном режиме сбраживания, так как при этом наблюдается стабильный выход биогаза.

В работе [62] рассматривается цилиндрический МТ, в котором нагрев осуществляется через рубашку. Данная конструкция является не эффективной с точки зрения энергосбережения. Так как тепловой поток будет направляться как в сторону СМ так и в сторону окружающей среды. При этом площадь внутренних стенок будет иметь повышенную температуру, что приведет к налипанию СМ на

внутренние стенки, а так же к угнетению жизнедеятельности бактерий, что будет сопровождаться уменьшением выхода биогаза. Через наружные поверхности греющей рубашки увеличатся теплотери в окружающую среду. Учитывая этот факт, можно сделать вывод, что целесообразней располагать нагревательный элемент внутри МТ.

В работах [44, 62-71] рассматриваются тепловые процессы, происходящие в различных конструкциях метантенков и различных режимах сбраживания и перемешивания.

Зарубежными учеными, проводившими исследования в области теплообменных процессов в МТ являются J. Fleming, J.R. Fisher, E.L. Iannotti, J. Durand, L.P. Walker, R.A. Pellerin, M.G. Heisler, G.S. Farmer и L.A. Hills [72-81]. Джейсон Флеминг разработал динамическую и механическую модель процесса анаэробного сбраживания, включающую движение жидкости, перемешивание пузырьков, биологические реакции, внутренний теплообмен и теплообмен с окружающей средой.

Технологические параметры сбраживания, такие как обязательное перемешивание и нагрев, аналогичны процессам, применяемым в химической промышленности. В связи с этим аналитические исследования затронули и рассмотрение аппаратов используемых в химической промышленности с подогревом и перемешиванием реагирующих веществ [82].

Вертикальные цилиндрические аппараты являются наиболее распространённым видом аппаратов, применяемых в химическом промышленности [83]. Корпус аппарата выполнен из листовой стали. Конструкция из данного материала соединяется болтами или сваривается из листов железа, свернутых в рулон. Оболочка реактора ставится на фундамент из бетона. Для поддержания температурного режима аппарат изолируется. В конструкции предусмотрены отверстия для загрузки и опорожнения реактора, а также доступ к его внутреннему пространству для обслуживания. В конструкции предусмотрен змеевик для нагрева вещества и мешалка для его перемешивания.



Корпус аппарата состоит из цилиндрической части и днища. Внутри корпуса смонтированы змеевик и лопастная мешалка.

Корпус закрывает крышка, в которой имеются технологические отверстия для вала мешалки, подвода и отвода греющей воды.

Свежее количество вещества поступает в реактор через патрубок, а отработанное удаляется снизу через технологическое отверстие.

Поскольку элементы готовятся предварительно, то железные резервуары изготавливаются более технологично нежели резервуары из монолитного бетона. На месте установки, изготовленные из листового железа, толщиной 4-6 мм, внешне защищенные от коррозии размещаются на ленточном фундаменте.

Анализируя теплофизические свойства СМ, можно сделать предположение, что на греющей поверхности будут иметь место отложения твердой фракции СМ. В результате аналитических исследований опубликованных материалов по производству биогаза, определено, что влияние слоя отложений на интенсивность теплообмена между греющим элементом и массой не изучалось.

Разработка конструкции МТ, который позволит поддерживать все технологические параметры процесса анаэробного сбраживания, а также быть простым в изготовлении, эксплуатации и быть энергоэффективным, является актуальным научным направлением.

## 1.6 Выводы по первому разделу

1. Проведен литературный обзор технологических процессов анаэробного сбраживания. На основании этого можно считать, что для стабильного сбраживания биомассы и выхода биогаза необходимо строгое соблюдение всех технологических параметров работы МТ.

2. Проведен обзор конструкций МТ, которые показали, что существующие МТ сложны в изготовлении, а при эксплуатации соблюдение технологических процессов анаэробного сбраживания будет затруднительно.

3. Анализ технологических процессов анаэробного сбраживания показал, что одним из основных факторов, влияющих на повышение эффективности работы МТ, является температурный режим сбраживания, для исследования которого необходимо усовершенствовать математическую модель процессов тепломассообмена в метантенке.

4. Выполненные аналитические исследования позволяют сделать вывод, что учет влияния отложений твердых частиц на поверхности змеевика мало изучен. Поэтому исследования влияния отложений на поверхностях нагревательных элементов на интенсивность теплообмена между греющим теплоносителем и сбраживаемой массой являются необходимыми.

## РАЗДЕЛ 2

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССООБМЕНА В ПРЕДЛАГАЕМОЙ КОНСТРУКЦИИ МЕТАНТЕНКА

На основании анализа литературных данных установлено, что конструкция МТ должна позволять соблюдать все необходимые технологические условия процесса сбраживания. Одним из основных условий является поддержание постоянной температуры сбраживания. Для выполнения этой задачи необходимо интенсифицировать процессы теплообмена в МТ. Предлагаемая схема МТ для анализа процессов теплообмена в МТ представлена на рисунке 2.1, на которую получен патент на полезную модель № 90880 [84].

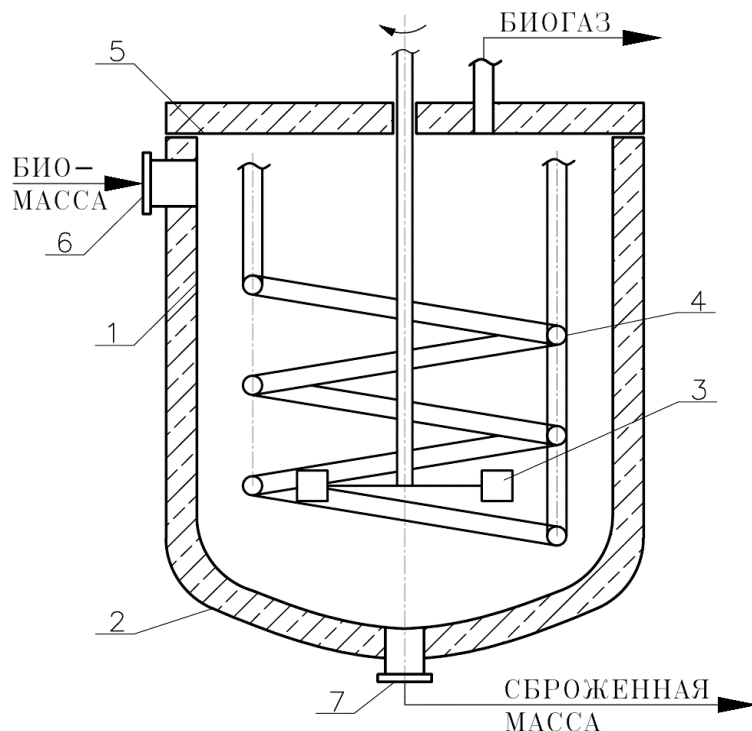


Рисунок 2.1 - Схема МТ для фермерского хозяйства:

1-цилиндрическая часть МТ, 2- днище МТ, 3- лопастная мешалка, 4- змеевик, 5- крышка, 6-патрубок для подачи свежей биомассы, 7-патрубок для удаления сброженной массы

Прототипом предлагаемой конструкции МТ являются аппараты, применяемые в химической промышленности. Для получения биогаза наиболее

оптимальной и долговечной является конструкция МТ, изготовленная из монолитного кислотоупорного бетона.

Преимуществом бетона является то, что он может выдерживать большие статические и динамические нагрузки тяжелого оборудования. Такие резервуары устанавливаются только наземно.

Основными узлами МТ являются корпус, состоящий из цилиндрической части 1 и днища 2. Внутри корпуса смонтированы лопастная мешалка 3 и ЗМ 4.

Корпус закрывает крышка 5, в которой имеются технологические отверстия для вала мешалки, подвода и отвода греющей воды и отвода биогаза. Для герметизации соединения корпуса и крышки, между ними обязательно укладывается уплотнительный материал.

Свежая биомасса поступает в МТ через патрубок 6, а сброженная биомасса удаляется снизу через патрубок 7.

К качеству бетона предъявляются соответствующие требования: водостойкость и устойчивость к агрессивной среде. Особенно следует учитывать кривую ситового анализа наполнителей, водоцементное отношение, а также тщательное уплотнение и избегание рабочих швов и усадочных трещин.

Серосодержащие кислоты, выступающие над уровнем субстрата в зоне накопления газа, вызывают коррозию бетона. Поэтому существует необходимость соблюдать требования к качеству бетона, соответствующую рецептуру изготовления бетона. Дополнительно можно установить специальную защиту в верхней части МТ. Для этого стены в верхней части, а в отдельных случаях и нижняя часть крышки покрываются полиэтиленовыми панелями или 2-х-компонентным слоем из искусственного материала.

МТ из бетона должны быть газонепроницаемы. Усадочные трещины и микропоры, которые образуются при затвердевании бетона вследствие выпаривания воды, в будущем без дополнительного покрытия изнутри будут вызывать трудно контролируемые газопотери во время эксплуатации. Места стыков крышки и цилиндрической части следует оснастить эластичными уплотнительными соединительными лентами. В качестве дополнительной защиты

рекомендуется применять аэрозольное покрытие или шпаклевку углов с помощью уплотнительной массы длительной эластичности на базе силикон-каучука, полиуретана или битум-каучука.

Для проведения исследований в работе принята конструкция МТ, выполненного из бетона и не имеющего теплоизоляции.

Чтобы получить необходимую для анаэробного процесса сбраживания температуру и поддержания ее на постоянном уровне необходимо через змеевик 4 нагреть сбраживаемую массу до температуры сбраживания  $t_{сбр}=40^{\circ}\text{C}$ , а после выхода на стационарный режим работы МТ поддерживать ее с учетом теплопотерь. При загрузке свежей биомассы, температура которой ниже температуры сбраживания, в МТ необходимо увеличить подвод теплоты через змеевик в сочетании с интенсивным перемешиванием биомассы. Это приведет к стабилизации температуры во всем объеме МТ.

В процессе эксплуатации на поверхности ЗМ откладываются взвешенные в субстрате твердые частицы, это приводит к уменьшению теплового потока от змеевика к СМ. Интенсивное перемешивание позволяет частично убирать эти отложения, но так как перемешивание осуществляется только после загрузки свежей биомассы, отложения на ЗМ будут присутствовать. Поддержание постоянного теплового потока приведет к увеличению мощности нагрева греющего теплоносителя, и как следствие, к увеличению затрат топливно-энергетических ресурсов на его нагрев.

Из вышеизложенного следует, что для повышения эффективности работы МТ, т.е. обеспечения высокого и стабильного объема получаемого биогаза, необходимо исследование температурного режима в установке, в том числе исследование влияния толщины отложений на интенсивность теплоотдачи от ЗМ к СМ.

Таким образом, одним из факторов повышения эффективности работы МТ является сокращение расхода топлива на получение биогаза в процессе эксплуатации установки. Это возможно за счет оптимизации температурного режима сбраживания.

Процесс анаэробного сбраживания отходов животноводческих ферм описывается следующими уравнениями [85]:

$$\begin{aligned}\frac{dT}{d\tau} &= (\mu - \tilde{\mu})T; \\ \frac{dS}{d\tau} &= \tau j_s T - V - \bar{V}; \\ \frac{dP}{d\tau} &= \tau j_p T - M + \bar{M},\end{aligned}\tag{2.1}$$

где  $T$ ,  $S$ ,  $P$  – соответственно концентрации сбраживаемого навоза, субстрата и продукта метаболизма, кг/т;

$\tau$  – продолжительность анаэробного сбраживания;

$\mu$  и  $\tilde{\mu}$  – удельные скорости роста и метаболизма биомассы сбраживаемого субстрата, сут<sup>-1</sup>;

$j_s$  и  $j_p$  – удельные скорости разложения субстрата и образования продукта метаболизма, сут<sup>-1</sup>;

$V$  и  $\bar{V}$  – скорости разложения субстрата и образования продукта метаболизма, кг/т·сут.;

$M$  и  $\bar{M}$  – скорости массообмена субстрата и продуктов метаболизма при переходе из одной фазы в другую, кг/т·сут.

В этой модели (2.1), согласно третьему уравнению, учитываются кинематические зависимости скорости массообмена субстрата и скорости продуктов метаболизма как основные факторы, влияющих на процесс эффективного разложения ОВ в СМ.

Для рассматриваемой конструкции МТ стабильное сбраживание может быть обеспечено в том случае, если потери в окружающую среду  $Q_{пот}$  и затраты теплоты на подогрев свежей порции биомассы  $Q_{св.бм}$  будут компенсироваться теплотой, воспринимаемой СМ через змеевик от греющего теплоносителя  $Q_{нагр}$  и теплотой экзотермической реакции разложения биомассы и образования биогаза  $Q_{сбр}$  (Рис 2.2).

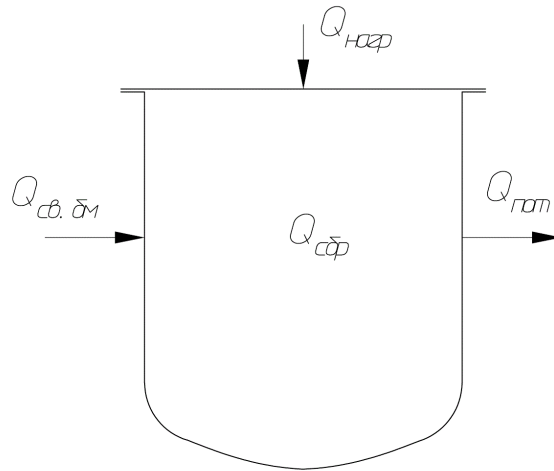


Рисунок 2.2 - Распределение потоков теплоты в МТ:

$Q_{нагр}$  – количество подводимой к метантенку теплоты, кДж/сут;

$Q_{сбр}$  – количества теплоты, образующейся при анаэробном разложении биомассы, кДж/сут;

$Q_{пот}$  – потери теплоты в окружающую среду через стенки МТ, кДж/сут;

$Q_{св.бм}$  – требуемая теплота для нагрева свежей порции биомассы, кДж/сут

Исходя из этого, тепловой баланс в МТ можно записать в виде следующего уравнения

$$Q_{нагр} + Q_{сбр} = Q_{св.бм} + Q_{пот}, \quad (2.2)$$

В биохимических процессах анаэробного сбраживания биомассы наблюдается выделение тепла. Это происходит на этапе расщепления анаэробных бактерий и образования уксусной кислоты. Этот вопрос рассмотрен в работах [31, 85] и основываясь на том, что суммарное тепловыделение незначительно, величиной  $Q_{сбр}$  можно пренебречь.

Для определения тепловых потерь необходимо рассчитать габаритные размеры МТ. Расчет габаритных размеров МТ приведен, в приложении А.

Учитывая этот факт, выражение (2.2) принимает вид

$$Q_{нагр} = Q_{св.бм} + Q_{пот}. \quad (2.3)$$

Принимая время нагрева свежей порции СМ до  $t_{сбр}$  равным  $\tau_{нагр}$ , требуемая тепловая мощность нагрева  $Q_{св.б.м}$ , составит

$$Q_{св.б.м} = \frac{Q'_{св.б.м}}{\tau_{нагр}}. \quad (2.4)$$

Так как температура вводимой порции биомассы  $t_{вв}$  всегда ниже температуры сбраживания  $t_{сбр}$  и равна температуре наружного воздуха, то для нагрева свежей порции необходимо затратить теплоту  $Q'_{св.б.м}$ , кДж

$$Q'_{св.б.м} = m_{вв} \cdot c_{см} \big|_{t_{вв}} \cdot (t_{сбр} - t_{вв}), \quad (2.5)$$

где  $m_{вв}$  – масса вводимой свежей порции биомассы, кг;

$c_{см} \big|_{t_{вв}}$  – удельная теплоемкость СМ при  $t_{вв}$ , кДж/(кг · К);

$t_{сбр}$  – температура сбраживания, °С;

$t_{вв}$  – температура вводимой свежей порции биомассы, °С.

Масса вводимой свежей порции СМ  $m_{вв}$ , кг, составит

$$m_{вв} = V_{вв} \cdot \rho \big|_{t_{вв}}, \quad (2.6)$$

где  $V_{вв}$  – объем вводимой биомассы, м<sup>3</sup>;

$\rho \big|_{t_{вв}}$  – плотность свежей порции СМ при температуре ввода  $t_{вв}$ , кг/м<sup>3</sup>.

Величина  $V_{вв}$  зависит от плановой длительности сбраживания  $\tau$  и частоты  $n$  выполнения операций замены СМ в МТ

$$V_{вв} = V_{yd} = \frac{V_p}{\tau \cdot n}, \quad (2.7)$$

где  $V_p$  – рабочий объем МТ, м<sup>3</sup>;

$\tau$  – плановая длительность сбраживания, сутки;

$n$  – частота замены СМ, 1/сутки.

Тепловые потери МТ можно определить по уравнению теплопередачи [86, 87]



$$Q_{\text{пот}} = K \cdot F \cdot (t_{\text{сбр}} - t_{\text{вх}}), \quad (2.8)$$

где  $K$  – коэффициент теплопередачи от СМ через наружные стенки МТ к окружающему воздуху;

$F$  – площадь наружных стенок МТ;

$t_{\text{вх}}$  – температура наружного воздуха.

Для исследования теплообмена МТ с окружающей средой используется предлагаемая конструкция МТ.

Так как конструктивно МТ представляет собой цилиндрический резервуар с плоской крышкой и овальным днищем, то рационально рассматривать теплотери корпуса, днища и крышки отдельно.

## 2.1 Теплоотдача от биогаза и сбраживаемой массы к внутренним поверхностям метантенка

Между СМ и крышкой МТ находится газовая фаза толщиной  $\delta$ , скорость движения биогаза в которой незначительна. Поэтому процесс теплообмена в данном случае был рассмотрен как свободная конвекция БГ в замкнутом объеме [86].

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha_1^k$  от биогаза к крышке МТ может быть рассчитан по выражению [88]

$$\alpha_1^k = \frac{\lambda_{\text{б}} \cdot \epsilon_{\text{к}}}{\delta}, \quad (2.9)$$

где  $\lambda_{\text{б}}$  – коэффициент теплопроводности биогаза, Вт/(м·К);

$\delta$  – расстояние от поверхности СМ до крышки МТ, м;

$\epsilon_{\text{к}}$  – коэффициент конвекции.

Биогаз состоит в основном из двух газов: метана  $\text{CH}_4$  и диоксида углерода  $\text{CO}_2$ . Количество других составляющих не превышает 5% и практически не влияет

на теплофизические характеристики смеси. Поэтому можно считать, что БГ состоит из метана и диоксида углерода, объемные доли которых  $r_{CH_4}$  и  $r_{CO_2}$ , а их молярные массы  $\mu_{CH_4}$  и  $\mu_{CO_2}$ . Молярная масса биогаза будет равна:

$$\mu_6 = r_{CH_4} \cdot \mu_{CH_4} + r_{CO_2} \cdot \mu_{CO_2}. \quad (2.10)$$

Массовые доли компонентов  $g_{CH_4}$  и  $g_{CO_2}$  рассчитываются по формулам:

$$g_{CH_4} = \frac{\mu_{CH_4}}{\mu_6}; \quad (2.11)$$

$$g_{CO_2} = \frac{\mu_{CO_2}}{\mu_6}. \quad (2.12)$$

В работе [89] для расчетов коэффициента теплопроводности смеси газов рекомендуется уравнение

$$\lambda_6 = \frac{\lambda_{CH_4} \cdot g_{CH_4}}{g_{CH_4} + g_{CO_2} \cdot \psi_{CH_4-CO_2}} + \frac{\lambda_{CO_2} \cdot g_{CO_2}}{g_{CO_2} + g_{CH_4} \cdot \psi_{CO_2-CH_4}}, \quad (2.13)$$

где  $\lambda_{CH_4}$  и  $\lambda_{CO_2}$  – коэффициенты теплопроводности чистых газов при температуре смеси, Вт/(м·К);

$\psi_{CH_4-CO_2}$  и  $\psi_{CO_2-CH_4}$  – безразмерные поправочные коэффициенты, которые характеризуют взаимное влияние компонентов.

Зависимость коэффициентов теплопроводности от температуры после обработки табличных данных была получена в виде:

$$\lambda_{CH_4} \cdot 10^3 = 30,589 + 0,155 \cdot t + 5,708 \cdot 10^{-5} \cdot t^2; r = 0,999; \quad (2.14)$$

$$\lambda_{CO_2} \cdot 10^3 = 14,168 + 0,089 \cdot t - 1,689 \cdot 10^{-5} \cdot t^2; r = 0,999. \quad (2.15)$$

Безразмерные поправочные коэффициенты рассчитывали по уравнениям:

$$\psi_{CH_4-CO_2} = \frac{\frac{\mu_{CH_4}}{\mu_{CO_2}}}{\sqrt{8} \cdot \left(1 + \frac{\mu_{CH_4}}{\mu_{CO_2}}\right)^{0,5}} \cdot \left[1 + \left(\frac{\mu'_{CH_4}}{\mu'_{CO_2}}\right)^{0,5} \cdot \left(\frac{\mu_{CO_2}}{\mu_{CH_4}}\right)^{0,25}\right]^2; \quad (2.16)$$

$$\psi_{CO_2-CH_4} = \frac{\frac{\mu_{CO_2}}{\mu_{CH_4}}}{\sqrt{8} \cdot \left(1 + \frac{\mu_{CO_2}}{\mu_{CH_4}}\right)^{0,5}} \cdot \left[1 + \left(\frac{\mu'_{CO_2}}{\mu'_{CH_4}}\right)^{0,5} \cdot \left(\frac{\mu_{CH_4}}{\mu_{CO_2}}\right)^{0,25}\right]^2, \quad (2.17)$$

где  $\mu'_{CH_4}$  и  $\mu'_{CO_2}$  – коэффициенты динамической вязкости при заданной температуре сбраживания, Па·с.

Зависимость коэффициентов динамической вязкости от температуры, имеет вид:

$$\mu'_{CH_4} \cdot 10^6 = 10,743 + 0,0245 \cdot t, r = 0,999; \quad (2.18)$$

$$\mu'_{CO_2} \cdot 10^6 = 14,741 + 0,0374 \cdot t, r = 0,999. \quad (2.19)$$

Коэффициент конвекции  $\varepsilon_\kappa$  зависит от значений чисел подобия Грасгофа  $Gr$  и Прандтля  $Pr$  и рассчитываются по уравнению [87, 88]

$$\varepsilon_\kappa = 0,105 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,3}, \text{ если } 10^3 \leq Gr \cdot Pr \leq 10^6. \quad (2.20)$$

За определяющий размер, в формуле (2.9) принимается толщина газовой фазы  $\delta$ .

Технология работы МТ предполагает периодическую частичную выгрузку сброженного субстрата и загрузку свежей массы в реактор. В это время в МТ происходит перемешивание сбраживаемой биомассы и дополнительный подогрев для стабилизации и поддержания постоянной температуры в МТ. Все остальное время работы МТ механическое перемешивание отсутствует, поэтому требуется отдельное рассмотрение определения коэффициентов теплоотдачи от СМ к внутренним стенкам МТ.

Теплообмен между СМ и цилиндрической стенкой МТ для условий движения потока СМ параллельно стенке диаметром  $D$  (окружная составляющая

$W_T$ ) можно рассматривать как омывание пластины, характерным размером которой будет периметр цилиндра размером  $l_y = \pi \cdot D$ .

Для такого случая используется уравнение [88]

$$Nu_y = 0,037 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr_{CM}^{0,43} \cdot \left( \frac{Pr_{CM}}{Pr_{CM_{cm}}} \right)^{0,25}, \quad (2.21)$$

где  $Nu_y = \frac{\alpha_1^y \cdot l_y}{\lambda_{CM}(t)}$  – число подобия Нуссельта;

$Re = \frac{W_T \cdot l_y}{v_{CM}(t)}$  – число Рейнольдса;

$Pr_{CM}$  и  $Pr_{CM_{cm}}$  – числа Прандтля при температуре CM и температуре цилиндрической стенки.

В условиях, когда отсутствует перемешивание, теплообмен между CM и вертикальной стенкой носит другой характер. Принято, что температура стенки на несколько градусов меньше температуры CM и характерным размером является (погонный метр) высота стенки. Процесс передачи тепла рассматривается как свободная конвекция у вертикальной стенки [88]

$$Nu_{в.см} = 0,15 \cdot \left( Gr_{в.см} \cdot Pr|_{t_{сбр}} \right)^{0,6} \left( \frac{Pr|_{t_{сбр}}}{Pr|_{t_{см}}} \right)^{0,25}, \quad (2.22)$$

где  $Nu_{в.см} = \frac{\alpha_{в.см} \cdot l_{см}}{\lambda|_{40}}$  – число Нуссельта;

$Gr_{см} = \frac{g \cdot l_{см}^3}{(\nu|_{t_{сбр}})^2} \cdot \frac{t_{см} - t_{см}}{T_{см}}$  – число Грасгофа;

$Pr|_{t_{см}}$  – критерий Прандтля при температуре стенки.

Конвективный теплообмен CM с овальным днищем обусловлен внутренним омыванием днища потоком, который движется параллельно образующей. В литературе отсутствуют критериальные уравнения, которые описывают такой

редкий случай конвективного теплообмена. Поэтому для анализа принято обтекание цилиндрической пластины площадью, равновеликой площади внутренней поверхности овального днища, которая для конкретного МТ может быть рассчитана по формуле [90]

$$S_{\delta} = \pi(h^2 + 2 \cdot a^2), \text{ м}^2. \quad (2.23)$$

Характерный размер такой пластины равняется, м

$$l_n = 0,629 \cdot D_n = 0,629 \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot S_{\delta}}{\pi}} = 0,7097 \cdot S_{\delta}. \quad (2.24)$$

Средняя скорость омывания пластины принята  $W_{нл}$ , м/с

$$W_{нл} = \frac{W_{\varepsilon}}{2}, \text{ м/с}. \quad (2.25)$$

Для расчётов конвективного теплообмена для тел произвольной формы рекомендуется уравнение [91]

$$Nu_l = 0,662 \cdot Re_l^{0,5} \cdot Pr_{CM}^{\frac{1}{3}}, \quad (2.26)$$

где  $l$  – длина омываемого тела, ( $l = l_n$ ).

Днище МТ представляет собой шаровой сегмент, имеющий глубину  $h$  и хорду, равную внутреннему диаметру МТ  $2a = D_{MT}$ .

Площадь боковой поверхности определяется по формуле [90]

$$M = \pi \cdot (h^2 + a^2), \text{ м}^2. \quad (2.27)$$

Для анализа теплообмена между СМ и днищем в условиях естественного перемешивания условно принимали плоский диск, площадь поверхности которого  $S$  равна площади поверхности шарового сегмента, т.е.  $S=M$ . Условный диаметр такого диска  $D_y$  равен

$$D_y = \sqrt{\frac{4M}{\pi}}. \quad (2.28)$$

А характерный размер составляет

$$l_{\text{дн}} = \frac{2D_y}{\pi}. \quad (2.29)$$

Вид критериального уравнения теплообмена при свободной конвекции между СМ и условным диском определяется величиной числа Рэлея [91]

$$Ra = Gr_{\text{дн}} \cdot Pr|_{t_{\text{ср}}}, \quad (2.30)$$

где  $Gr_{\text{дн}} = \frac{g \cdot l_{\text{дн}}^3}{(\nu|_{t_{\text{ср}}})^2} \cdot \frac{t_{\text{см}} - t_{\text{см}}}{T_{\text{см}}}$  - число Грасгофа.

Если,  $Gr > 2 \cdot 10^7$ , то необходимо использовать критериальное уравнение [92, 93]

$$Nu_{\text{дн}} = 0,135 \cdot Ra^{0,33}. \quad (2.31)$$

## 2.2 Теплообмен между наружными поверхностями МТ и окружающей средой

Рассмотрим процесс передачи теплоты от сбраживаемой массы через стенки резервуара МТ к окружающему воздуху.

При анализе теплообмена учитывали особенности теплоотдачи к воздуху от плоской крышки, цилиндрической части МТ и днища при омывании их потоком воздуха, движущегося со скоростью  $w_{\text{вх}}$  и имеющего температуру  $t_{\text{вх}}$ .

Перенос теплоты от плоской крышки к воздуху соответствует частному случаю конвективного теплообмена – омыванию плоской горизонтальной стенки

потоком жидкости. При этом определяющий размер омываемой поверхности  $l_k$  равен

$$l_k = \frac{2 \cdot D_k}{\pi}, \text{ м,} \quad (2.32)$$

где  $D_k$  - диаметр крышки МТ, м.

Теплофизические характеристики воздуха для наружной температуры приведены в работе [94].

По значению числа Рейнольдса устанавливается режим течения

$$\text{Re} = \frac{w_{ex} \cdot l_k}{\nu_{ex}}, \quad (2.33)$$

где  $\nu_{ex}$  – коэффициент кинематической вязкости воздуха,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

Критериальное уравнение при омывании крышки для расчета числа Нуссельта имеет вид [91]

$$\text{Nu}_k = 0,032 \cdot \text{Re}_k^{0,8}, \quad (2.34)$$

а соответствующее значение коэффициента теплоотдачи от крышки к воздуху  $\alpha_2^k$  равно [92]

$$\alpha_2^k = \frac{\text{Nu}_k \cdot \lambda_{ex}}{l_k}, \quad (2.35)$$

где  $\text{Nu}_k = \frac{\alpha_2^k \cdot l_k}{\lambda_{ex}}$  - число Нуссельта;

$\lambda_{ex}$  – коэффициент теплопроводности воздуха,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ .

Коэффициент теплопередачи через крышку МТ определяли по уравнению

$$K_{\kappa} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1^k} + \frac{\delta_{\kappa}}{\lambda_{\kappa}} + \frac{1}{\alpha_2^k}}. \quad (2.36)$$

Тепловой поток через крышку МТ равен

$$Q_{\kappa} = \frac{K_{\kappa} \cdot \pi \cdot D_{\kappa}^2 \cdot (t_{\text{сбп}} - t_{\text{вх}})}{4}. \quad (2.37)$$

Теплообмен между цилиндрической частью МТ и воздухом рассматривали как омывание потоком жидкости (ветра) одиночного цилиндра. В качестве характерного размера принят диаметр цилиндра.

Определив число Рейнольдса  $Re_{\text{ц}}$

$$Re_{\text{ц}} = \frac{w_{\text{вх}} \cdot D_{\text{ц}}}{\nu_{\text{вх}}}, \quad (2.38)$$

где  $D_{\text{н}}$  – наружный диаметр цилиндра.

Число Нуссельта  $Nu_{\text{ц}}$  [91]

$$Nu_{\text{ц}} = 0,22 Re_{\text{ц}}^{0,5}. \quad (2.39)$$

Коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности цилиндра к воздуху рассчитывается

$$\alpha_{\text{ц}} = \frac{Nu_{\text{ц}} \cdot \lambda_{\text{вх}}}{D_{\text{н}}}, \quad (2.40)$$

где  $D_{\text{н}}$  – наружный диаметр цилиндрической части, м.

Поскольку отношение внутреннего и наружного диаметров  $n = D_{\text{н}}/D_{\text{с}} < 1,4$  для расчета коэффициента теплопередачи цилиндрической части,  $K_{\text{ц}}$ , приняли уравнение (2.36), применяемое для плоской стенки [95].

Тепловой поток через цилиндрическую стенку определен по уравнению



$$Q_u = K_\kappa \cdot \pi \cdot D_n \cdot H \cdot (t_{собр} - t_{вх}). \quad (2.41)$$

При анализе теплообмена между днищем МТ и воздухом было принято, что овальное днище представляет собой шаровой сегмент.

В качестве характерного размера приняли диаметр наружной поверхности  $D_n$ .

После расчета числа Рейнольдса  $Re_D$  из выражения

$$Re_D = \frac{w_{вх} \cdot D_D}{\nu_{вх}}, \quad (2.42)$$

число Нуссельта для случая обтекания шара находили по уравнению [86]

$$Nu_D = 2 + 0,03 Re_D^{0,5} \cdot Pr_{вх}^{0,33} + 0,35 Re_D^{0,58} \cdot Pr_{вх}^{0,35}, \quad (2.43)$$

а коэффициент теплоотдачи от днища к воздуху  $\alpha_2^D$  по формуле

$$\alpha_2^D = \frac{Nu_D \cdot \lambda_{вх}}{D_D}. \quad (2.44)$$

Коэффициент теплопередачи через шаровую поверхность  $K_\partial$ , [Вт/м<sup>2</sup>·К] выражается уравнением [96]

$$K_\partial = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1^\partial \cdot D_\partial^2} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_{ст}} \cdot \left( \frac{1}{D_\partial} - \frac{1}{D_n} \right) + \frac{1}{\alpha_2^\partial \cdot D_n^2}}, \quad (2.45)$$

где  $\alpha_1^D$  – коэффициент теплоотдачи от СМ к внутренней поверхности днища, Вт/(м<sup>2</sup> К).

Боковая поверхность шарового сегмента  $F_D$  равна

$$F_d = \pi \left[ \left( \frac{D_d}{2} \right)^2 + h_o^2 \right], \quad (2.46)$$

где  $\frac{D_d}{2}$  и  $h_o$  - хорда и стрела шарового сегмента, м.

Тепловой поток через днище к воздуху может быть вычислен по уравнению

$$Q_d = K_o \cdot (t_{cm} - t_{ex}) \cdot \frac{F_o}{F_{ш}}, \quad (2.47)$$

где  $F_{ш}$  – площадь поверхности шара, м<sup>2</sup>.

Суммарный тепловой поток через наружные поверхности рассматриваемого МТ

$$Q_{nom} = Q_{\kappa} + Q_{\eta} + Q_o. \quad (2.48)$$

Из уравнения теплового баланса (2.2) следует, что количество теплоты необходимое для поддержания температуры в МТ расходуется на компенсацию потерь тепла в окружающую среду и нагрев свежей порции биомассы. При загрузке свежей порции биомассы для усреднения температуры во всем объеме МТ включается механическая мешалка. Когда температура всей СМ имеет одну температуру сбраживания механическая мешалка отключается. Так же с целью составления температурных режимов процесса сбраживания необходимо определить время нагрева СМ. Время нагрева будет равно времени работы механической мешалки  $\tau_{нагр} = \tau_{меш}$ . Процесс передачи тепла в данных режимах работы МТ различный. Поэтому необходимо рассматривать процесс нагрева СМ для двух режимов нагрева - первый при условии механического перемешивания,

второй при естественном перемешивании сбразживаемой биомассы пузырьками образующегося биогаза (барботаже).

### 2.3 Теплообмен при нагреве сбразживаемой массы через змеевик

В процессе работы МТ наблюдается налипание органической массы в виде отложений на нагревательный элемент. Это связано с тем, что СМ состоит из смеси сухого ОВ и воды. Несмотря на перемешивание СМ, на ЗМ будет образовываться слой отложений. Исследования показали [97], что наблюдается неравномерность в толщине отложений по длине ЗМ после перемешивания. На части ЗМ, которая расположена в одной горизонтали с мешалкой, появление отложений незначительно, а в нижней и верхней частях ЗМ наблюдаются значительные отложения твердых частиц биомассы. Это связано с тем, что при перемешивании осевая составляющая потока значительно меньше окружной и радиальной составляющих [98]. Изменение количества оборотов мешалки не оказывает существенного влияния на толщину отложений. На основании этого можно сделать вывод, что толщина отложений незначительно зависит от скорости перемешивания.

По данным [29, 99] коэффициент теплопроводности сухого ОВ составляет 0,15-0,25 Вт/м·К. Налипание сухого ОВ приводит к снижению теплопередачи из-за низкой теплопроводности отложений и, как следствие, увеличению времени нагрева биомассы.

Поэтому при рассмотрении теплового потока от греющего теплоносителя к СМ необходимо учитывать термическое сопротивление слоя отложений на ЗМ.

Процесс теплопередачи от греющего теплоносителя к сбразживаемой массе можно условно разделить на четыре элементарных процесса, при соблюдении закона сохранения энергии.

Первый процесс – теплоотдача от греющего теплоносителя к стенке ЗМ; второй процесс – процесс передачи теплоты теплопроводностью в стенке самого ЗМ; третий – процесс передачи теплоты теплопроводностью в налипших на

наружную стенку ЗМ отложениях и четвертый процесс – теплоотдача от наружной стенки ЗМ к СМ.

В условиях, когда нет отложений на наружной стенке ЗМ, третий процесс не учитывается. Тепловой поток для каждого из указанных процессов составит:

$$Q_{нагр} = \alpha_1 \cdot F \cdot (\overline{t_{cp}} - t_{cp1}); \quad (2.49)$$

$$Q_{нагр} = \frac{\pi \cdot l \cdot (t_{cm1} - t_{cm2})}{\frac{1}{2 \cdot \lambda_{зм}} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1}}; \quad (2.50)$$

$$Q_{нагр} = \frac{\pi \cdot l \cdot (t_{cm2} - t_{отл})}{\frac{1}{2 \cdot \lambda_{отл}} \cdot \ln \frac{d_3}{d_2}}; \quad (2.51)$$

$$Q_{нагр} = \alpha_2 \cdot F \cdot (t_{отл} - t_{см}), \quad (2.52)$$

где  $\alpha_1$  - коэффициент теплоотдачи от греющего теплоносителя к внутренней стенке ЗМ;

$F$  – площадь поверхности ЗМ;

$\overline{t_{cp}}$  - средняя температура греющего теплоносителя, °С, определяется как

$$\overline{t_{cp}} = \frac{t_1 + t_2}{2}, \quad (2.53)$$

$t_1$  и  $t_2$  - температуры греющего теплоносителя соответственно на входе и выходе из ЗМ;

$t_{cm1}$  и  $t_{cm2}$  – температуры соответственно на внутренней и наружной стенке ЗМ;

$t_{отл}$  – температура на поверхности отложений;

$t_{см}$  – температура сбраживаемой массы;

$l$  – длина ЗМ, м;

$\lambda_{зм}$  и  $\lambda_{отл}$  - коэффициенты теплопроводности соответственно материала ЗМ и отложений, Вт/(м·К);

$d_1, d_2, d_3$  – соответственно внутренний диаметр ЗМ, наружный диаметр ЗМ, диаметр ЗМ с учетом толщины отложений, м

$$d_3 = d_2 + 2 \cdot \delta_{отл}, \text{ м.} \quad (2.54)$$

$\alpha_2$  - коэффициент теплоотдачи от наружной стенки ЗМ к СМ, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Уравнение (2.49) определяет тепловой поток от греющего теплоносителя к внутренней стенке ЗМ путем конвективного теплообмена. Уравнение (2.50) и (2.51) определяют тепловой поток теплопроводностью через стенку ЗМ и толщину отложений на ЗМ соответственно. Уравнение (2.52) определяет тепловой поток с наружной поверхности отложений к СМ.

### 2.3.1 Теплоотдача от греющего теплоносителя к стенке змеевика

Для определения  $\alpha_1$  необходимо определить режим движения теплоносителя. Для этого определяется скорость движения воды в ЗМ

$$W_g = \frac{4 \cdot m'_g}{\rho_g|_{t_g} \cdot \pi \cdot d_1^2}, \text{ м/с,} \quad (2.55)$$

где  $\rho_g|_{t_g}$  - плотность воды при ее средней температуре в ЗМ, кг/м<sup>3</sup>;

$m'_g$  - расход греющей воды через ЗМ для компенсации потерь тепловой мощности может быть найден из уравнения теплового баланса

$$m'_g = \frac{Q_{ном}}{C_g|_{t_g} \cdot (t_{вход} - t_{вых})}, \text{ кг/с,} \quad (2.56)$$

где  $C_g|_{t_g}$  - удельная теплоемкость воды при ее средней температуре в ЗМ, кДж/(кг·К);

$t_{вход}, t_{вых}$  - температура теплоносителя на входе и на выходе из ЗМ, °С.

Критериальное уравнение конвективного теплообмена между греющей водой и внутренней стенкой ЗМ имеет вид [88]

$$Nu_{\epsilon} = 0,021 \cdot Re_{\epsilon}^{0,8} \cdot \left( Pr \Big|_{t_{\epsilon}} \right)^{0,43} \cdot \left( \frac{Pr \Big|_{t_{\epsilon}}}{Pr \Big|_{t_{cm}}} \right)^{0,25} \cdot \varepsilon_R, \quad (2.57)$$

где  $Nu_{\epsilon} = \frac{\alpha_1 \cdot \lambda_{\epsilon} \Big|_{t_{\epsilon}}}{d_{\epsilon}}$  - число Нуссельта;

$Re_{\epsilon} = \frac{w_{\epsilon} \cdot d_{\epsilon}}{\nu_{\epsilon} \Big|_{t_{\epsilon}}}$  - число Рейнольдса;

$\varepsilon_R = 1 + 1,77 \cdot \frac{d_{\epsilon}}{R_{3M}}$  - поправочный коэффициент для изогнутых труб;

$\alpha_1$  - коэффициент теплоотдачи от греющей воды к внутренней стенке трубы ЗМ, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$\lambda_{\epsilon} \Big|_{t_{\epsilon}}$  и  $\nu_{\epsilon} \Big|_{t_{\epsilon}}$  - коэффициенты теплопроводности и кинематической вязкости воды при ее средней температуре в змеевике, Вт/(м·К) и м<sup>2</sup>/с;

$R_{3M}$  - радиус ЗМ, м;

$Pr \Big|_{t_{\epsilon}}$  и  $Pr \Big|_{t_{cm}}$  - критерии Прандтля для воды при ее средней температуре в змеевике и температуре внутренней стенки змеевика.

Температура внутренней стенки  $t_{ст.вн.}$  практически равна средней температуре воды. Поэтому  $Pr \Big|_{t_{\epsilon}} \cong Pr \Big|_{t_{cm}}$

### 2.3.2 Теплоотдача от змеевика при механическом перемешивании сбрасываемой массы

Рассмотрим режим передачи тепла от ЗМ к СМ при ее механическом перемешивании. Перемешивание СМ производится два раза в сутки. Для определения интенсивности теплоотдачи от ЗМ к СМ были приняты следующие условия.

Змеевиковый нагреватель СМ представляет собой ряд витков, каждый из которых можно рассмотреть как замкнутое кольцо, омываемое тремя составляющими потока движущейся СМ: окружной, радиальной и осевой с соответствующими скоростями  $w_T$ ,  $w_p$ ,  $w_a$ .

На рисунке 2.3 представлены схема одного кольца ЗМ и направления движения составляющих потока СМ.

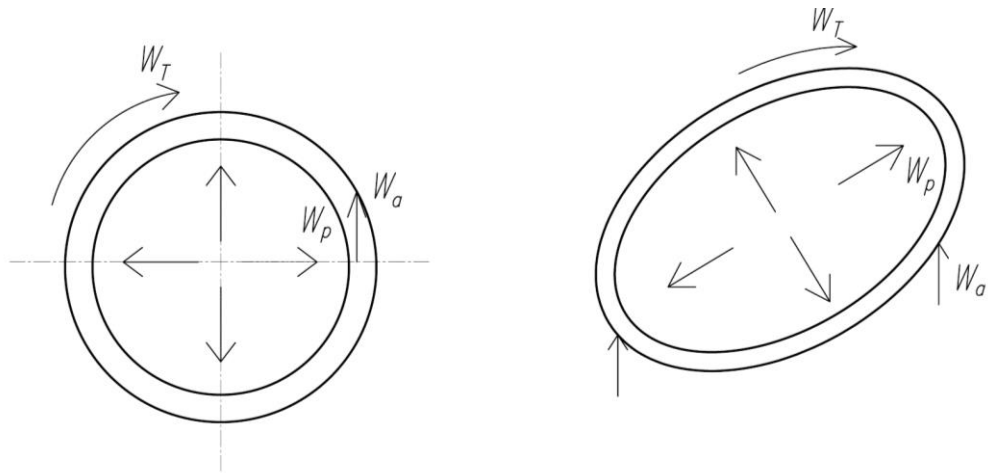


Рисунок 2.3 - Схема омывания витка ЗМ потока СМ:

$w_T$  - окружная составляющая скорости потока СМ, м/с,  $w_p$  - радиальная составляющая скорости потока СМ, м/с,  $w_a$  - осевая составляющая скорости потока СМ, м/с

Как следует из рисунка 2.3, окружная составляющая направлена параллельно образующей витка, радиальная – перпендикулярно, осевая – вертикально ей.

В работе [100] установлено

$$|w_m| = 2|w_p| = 10|w_a|. \quad (2.58)$$

С учетом соотношения (2.58) были определены значения скоростей  $w_T$ ,  $w_p$ ,  $w_a$  и отмечено, что вклад осевой составляющей в результирующую весьма незначителен, и в дальнейшем анализе ее не учитывали.

На рисунке 2.4 схематически представлено направление окружной и радиальной составляющих потока на фрагмент кольца ЗМ.

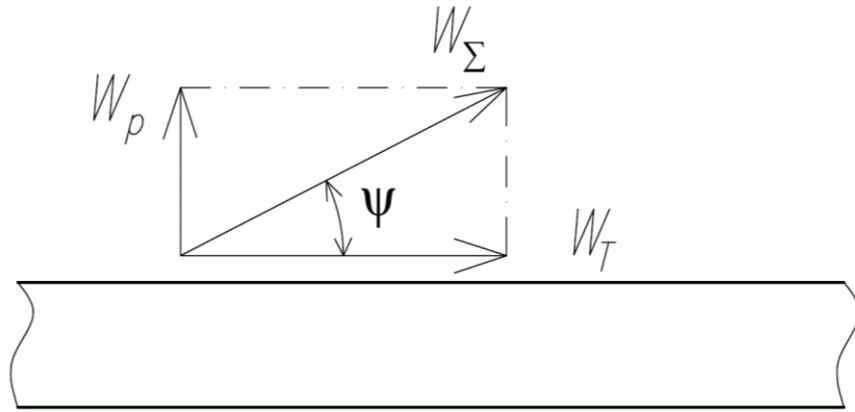


Рисунок 2.4 - Схема направлений скоростных потоков СМ относительно трубы ЗМ:

$w_\Sigma$  - суммарный поток СМ;  $\Psi$  - угол омывания трубы ЗМ;  $w_t, w_p$  – то же, что на рисунке 2.3

Анализ распределения скоростей (Рис. 2.4), выполненный для фрагмента кольца ЗМ, с учетом правила сложения векторов, показал, что суммарный поток СМ, имеющий скорость:

$$w_\Sigma = \sqrt{w_m^2 + w_p^2}, \text{ м/с}, \quad (2.59)$$

омывает трубу ЗМ под углом:

$$\psi = \arctg \left( \frac{w_p}{w_m} \right). \quad (2.60)$$

Следовательно, теплообмен между наружной стенкой ЗМ и СМ можно рассматривать как теплоотдачу при омывании одиночной трубы потоком жидкости под углом атаки  $\psi$ , для которого критериальное уравнение имеет вид [88]

$$Nu_n = 0,28 \cdot Re_{cm}^{0,6} \cdot Pr_{cm}^{0,36} \left( \frac{Pr_{жс}}{Pr_{cm}} \right)^{0,25} \cdot \varepsilon_\psi, \quad (2.61)$$



где  $Nu_n = \frac{\alpha_2 \cdot d_n}{\lambda_{cm}|_{t_{сб}}}$  - число Нуссельта;

$Re = \frac{w_{\Sigma} \cdot d_n}{\nu_{cm}|_{t_{сб}}}$  - число Рейнольдса;

$Pr_{cm}$  и  $Pr_{cm}$  - числа Прандтля для СМ при температуре сбраживания и температуре наружной стенки трубы ЗМ, принимаемой равной средней температуре воды;

$d_n$  - наружный диаметр трубы ЗМ, м ;

$\lambda_{cm}|_{t_{cm}}$  и  $\nu_{cm}|_{t_{cm}}$  - коэффициенты теплопроводности и кинематической вязкости СМ при температуре сбраживания  $t_{cm}$ , Вт/(м·К) и м<sup>2</sup>/с;

$\alpha_2 = \frac{Nu_n \cdot \lambda_{cm}|_{t_{cm}}}{d_n}$  - коэффициент теплоотдачи от наружной стенки трубы ЗМ к

СМ, Вт/(м<sup>2</sup>·К) ;

$\varepsilon_{\psi}$  - поправочный коэффициент, учитывающий изменение интенсивности теплоотдачи в зависимости от угла атаки.

В результате обработки табличных и графических данных [86, 88] получена математическая зависимость для определения  $\varepsilon_{\psi} = f(\psi)$  в виде

$$\varepsilon_{\psi} = 0,423 + 2,453 \cdot 10^{-3} \cdot \psi + 3,35 \cdot 10^{-4} \cdot \psi^2 - 5,238 \cdot 10^{-6} \cdot \psi^3, \quad (2.62)$$

при коэффициенте корреляции  $r = 0,9905$ .

Результаты экспериментальных данных, приведенные в работе [100], показали, что взаимное влияние окружной и радиальной составляющих потока на замкнутую трубу способствуют интенсивной турбулизации с увеличением интенсивности теплоотдачи в 1,5 раза. Поэтому расчетное значение коэффициента теплоотдачи от ЗМ к СМ принято

$$\alpha_2^p = 1,5 \cdot \alpha_2, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}. \quad (2.63)$$

Для условий переноса теплоты от греющей воды к СМ через стенку ЗМ при условии, что у тонкостенных труб отношение  $\frac{d_n}{d_g}$  практически всегда меньше 1,4.

Коэффициент теплопередачи  $K$  может быть рассчитан по уравнению, характерному для плоской стенки

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{ЗМ}}{\lambda_{ЗМ}} + \frac{\delta_{отл}}{\lambda_{отл}} + \frac{1}{\alpha_2}}; \quad (2.64)$$

где  $\delta_{ЗМ}$  - толщина стенки трубы ЗМ, м;

$\lambda_{ЗМ}$  - коэффициент теплопроводности материала стенки трубы ЗМ, Вт/(м·К).

### 2.3.3 Теплоотдача от змеевика при естественном перемешивании сбрасываемой массы

Во время работы МТ когда выключена лопастная мешалка механизм переноса теплоты в СМ изменяется. Это связано с тем, что возникающие пузырьки БГ при всплытии перемешивают СМ, а также способствуют распространению теплоты и конвективному переносу масс по всему объему СМ.

Решение данной задачи выполняется с учётом состава биогаза, теплофизических характеристик СМ в зависимости от температуры и размеров МТ. Биохимические процессы образования биогаза в работе не рассматривались.

Пузырьки биогаза образуются на днище, стенках МТ и твердых частицах СМ, на которых имеются поры радиусом  $R_n$ , являющиеся центрами зарождения пузырьков биогаза.

Отрыв пузырьков биогаза от мест образования возможен при условии, что его диаметр  $d_o$  превышает критический  $d_{кр}$ .

Для определения величины  $d_o$ , м, использовали уравнения [101,102-105]:

$$d_0 = 2 \cdot \left[ \frac{2}{3} \cdot \frac{R_n \cdot \sigma}{g \cdot (\rho_{см} - \rho_{био})} \right]^{\frac{1}{3}}; \quad (2.65)$$

$$d_0 = 0,0201 \cdot \theta \cdot \sqrt{\frac{\sigma}{g \cdot (\rho_{см} - \rho_{био})}}, \quad (2.66)$$

где  $R_n$  - радиус кромки микровпадины, м;

$\sigma$  - поверхностное натяжение СМ, Н/м;

$\rho_{см}$  - плотность СМ при температуре сбраживания, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_{био}$  - плотность биогаза в пузырьке, кг/ м<sup>3</sup>;

$g$  - ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>;

$\theta$  - угол смачивания, град.

Для расчета поверхностного натяжения СМ, Н/м, использовали зависимость, полученную автором [106]:

$$\sigma \cdot 10^3 = 119,96 - 1,69CB - 0,02T, \quad (2.67)$$

где СВ - содержание сухого вещества в СМ, %;

$T$  - абсолютная температура сбраживания, К.

Плотность биогаза  $\rho_{био}$ , пузырьки которого образуются на днище МТ, может быть определена из уравнения состояния идеального газа

$$\frac{\bar{P}_{био}}{\rho_{био}} = R_{био} \cdot T, \quad (2.68)$$

где  $R_{био}$  - газовая постоянная биогаза, Дж/кг·К;

$\bar{P}_{био}$  - давление в пузырьке.

Давление  $\bar{P}_{био}$  включает в себя барометрическое давление  $B$  и давление столба жидкости над пузырьком  $\rho_{см} \cdot g \cdot H$ , т. е.

$$\bar{P}_{\text{био}} = B + \rho_{\text{см}} \cdot g \cdot H_{\text{см}}, \text{Па} \quad (2.69)$$

В первом разделе указано, что БГ состоит в основном из двух газов  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$ . Тогда

$$R_{\text{био}} = r_{\text{CH}_4} \cdot \mu_{\text{CH}_4} + r_{\text{CO}_2} \cdot \mu_{\text{CO}_2}, \quad (2.70)$$

где  $r_{\text{CH}_4}, r_{\text{CO}_2}$  - объёмные доли  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$  в биогазе;

$\mu_{\text{CH}_4} = 16$  и  $\mu_{\text{CO}_2} = 44$  - молярная масса  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$ , кг/кмоль.

Угол смачивания СМ поверхностей МТ принят таким же, как для воды ( $\theta=50^\circ$ ) [92].

Подъемная сила пузырька биогаза при его всплытии расходуется на преодоление вязких сил СМ. В процессе всплытия пузырька в изотермических условиях давление столба СМ уменьшается, а его объём увеличивается массообмена с жидкой фазой.

Изменение объема пузырька определяется соотношением [107]

$$\rho_{\text{био}} \frac{dV}{d\tau} = \frac{\beta}{R_{\text{био}} \cdot T} \Delta P_{\text{био}} S_{\text{био}}, \quad (2.71)$$

где  $\beta$  – коэффициент массоотдачи от СМ к биогазу;

$T$  – абсолютная температура биогаза;

$\Delta P_{\text{био}}$  - разница парциальных давлений газа, Па;

$S_{\text{био}}$  – площадь поверхности пузырька,  $\text{м}^2$ .

Коэффициент массоотдачи от СМ к пузырьку биогаза можно определить по уравнению Буссинеска [107, 108]

$$Sh = 1,13 \cdot \text{Re}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{Sc}^{\frac{1}{2}}, \quad (2.72)$$

где  $Sh$  – число Шервуда, определяется по выражению

$$Sh = \frac{\beta \cdot \bar{d}}{D}, \quad (2.73)$$

$\bar{d}$  – средний диаметр биогаза, м;

$D$  – коэффициент диффузии биогаза в СМ;

$Sc$  – число Шмидта, определяется по формуле

$$Sc = \frac{\nu_{cm}}{D}, \quad (2.74)$$

$\nu_{cm}$  – коэффициент кинематической вязкости СМ.

Диаметр пузырька в момент всплытия может быть определён по уравнению [102]

$$d_{всп} = 2 \cdot \left( \frac{m_{пуз} \cdot R_{био} \cdot T}{0,34 \cdot \pi \cdot P_{био}} \right)^{\frac{1}{3}}, \text{ м}, \quad (2.75)$$

где  $m_{пуз}$  – масса пузырька биогаза, кг.

Масса пузырька может быть рассчитана по формуле

$$m_{пуз} = \rho_{био} \cdot V_{био}, \text{ кг}. \quad (2.76)$$

При условии, что

$$V_{пуз} = \frac{\pi}{6} \cdot d_0^3; \quad (2.77)$$

$$\rho_{био} = \frac{P_{био}}{R_{био} \cdot T}. \quad (2.78)$$

Принимая средний диаметр пузырька биогаза за время всплытия

$$\bar{d} = 0,5 \cdot (d_0 + d_{вспл}), \text{м}; \quad (2.79)$$

Практические исследования показали, что средний диаметр пузырька биогаза составляет до 2 мм.

Скорость всплытия можно оценить по уравнению [102]

$$W_{вспл} = \left[ g \cdot \frac{\bar{d}}{2} \cdot \frac{\rho_{см} - \rho_{био}}{\rho_{см} + \rho_{био}} + \frac{2 \cdot \sigma}{\bar{d} \cdot (\rho_{см} + \rho_{био})} \right]^{\frac{1}{2}}, \text{м/с}; \quad (2.80)$$

или по зависимости [106]:

$$W_{вспл} = \frac{\mu_{см} \cdot Ar \cdot \sqrt{We}}{d_0 \cdot \rho_{см} \cdot (18 \cdot \sqrt{We} + 0,6 \cdot \sqrt{Ar})}, \text{м/с}, \quad (2.81)$$

где  $Ar = \frac{g \cdot d_0^3}{\nu_{см}^2} \cdot \frac{\rho_{см} - \rho_{био}}{\rho_{см}}$  - число Архимеда;

$We = \frac{\sigma}{g \cdot (\rho_{см} - \rho_{био}) \cdot d_0^2}$  - число Вебера;

$\mu_{см}$  и  $\nu_{см}$  - коэффициенты динамической и кинематической вязкости СМ.

В процессе всплытия в изотермических условиях каждый пузырёк совершает работу [92, 102, 109]

$$L = m_{пуз} \cdot R_{био} \cdot T \cdot \ln \frac{B}{P_{био}}, \text{Дж}. \quad (2.82)$$

Тогда количество пузырьков, покидающих СМ,  $n_\tau$  будет равно

$$n_{\tau} = \frac{V_{\text{био}}^I}{V_{\text{вспл}}}, \text{ шт}, \quad (2.83)$$

где  $V_{\text{вспл}} = \frac{\pi}{6} \cdot d_{\text{вспл}}^3$  - объём одного пузырька биогаза, покидающего СМ, м<sup>3</sup>.

Общая суммарная работа пузырьков биогаза, затраченная в единицу времени на перемешивание СМ, составит

$$L_{\Sigma\tau} = n_{\tau} \cdot L, \text{ Дж}. \quad (2.84)$$

Работа, совершаемая подъемной силой пузырьков биогаза, расходуется на увеличение кинетической энергии СМ, т.е. ее перемешивание.

Удельная мощность перемешивания СМ будет равна

$$\bar{L} = \frac{L_{\Sigma\tau}}{M_{\text{см}}}, \text{ Дж/кг}, \quad (2.85)$$

где  $M_{\text{см}}$  - масса сбрасываемой массы в МТ.

Ранее было отмечено, что работа всплывающих пузырьков затрачивается на перемешивание жидкости и изменение скорости её движения. При этом изменение кинетической энергии 1 кг СМ будет соответствовать

$$\bar{L} = \frac{w_2^2 - w_1^2}{2}, \text{ Вт}. \quad (2.86)$$

Если принять, что без барботажа скорость движения СМ  $w_1=0$ , то при движении пузырьков биогаза скорость перемещения СМ составит

$$\bar{w}_2 = \sqrt{2 \cdot \bar{L}}, \text{ м/с}. \quad (2.87)$$

Эту скорость целесообразно принять для расчетов интенсивности теплообмена в МТ в условиях перемешивания СМ пузырьками биогаза.

При омывании ЗМ СМ, движущейся со скоростью всплытия пузырьков биогаза режим движения определяется по величине числа Рейнольдса

$$Re_{зм} = \frac{w_{всп} \cdot d_3}{\nu|_{40}}. \quad (2.88)$$

В условиях  $Re_{зм} = 1 \cdot 10^3 - 2 \cdot 10^5$  режима при омывании одиночной трубы критериальное уравнение имеет вид [88]

$$Nu_{зм}^{//} = 0,28 \cdot Re^{0,6} \cdot Pr_{см}^{0,36} \cdot \left( \frac{Pr_{жс}}{Pr_{см}} \right)^{0,25}. \quad (2.89)$$

По значению числа  $Nu_{зм}^{//}$  определяется коэффициент теплоотдачи  $\alpha_{зм}^{//}$  при барботаже СМ.

Согласно уравнениям 2.49-2.52 температура греющего теплоносителя определяется по формуле

$$\overline{t_{cp}} = \frac{Q_{нагр}}{K \cdot F_{нагр}}, \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (2.90)$$

Температура на выходе из змеевика определяется по следующей формуле [110]

$$t_2 = \frac{t_{см} - e^{-\frac{K \cdot F_{нагр}}{W}} \cdot t_{см} - 2 \cdot t_{см} - 2 \cdot \overline{t_{cp}}}{e^{-\frac{K \cdot F_{нагр}}{W}} - 1}, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (2.91)$$

где  $W$  – водяной эквивалент греющего теплоносителя.



Зная температуру греющего теплоносителя на выходе из ЗМ, по формуле (2.53) можно определить необходимую температуру воды на входе в ЗМ.

Разработанная методика определения тепловых потерь МТ и определение мощности нагрева СМ дает возможность на стадии проектирования МТ определить мощность теплогенерирующей установки. С целью экономии топливно-энергетических ресурсов, сжигаемых в теплогенерирующей установке, необходимо качественное регулирование температуры греющего теплоносителя в зависимости от температуры наружного воздуха.

В процессе сбраживания на наружной поверхности змеевика, по которому движется греющий теплоноситель, образуются отложения СМ, имеющие довольно низкий коэффициент теплопроводности. Слой отложений на наружной поверхности, представляющий значительное термическое сопротивление будет снижать теплопередачу от греющего теплоносителя к сбраживаемой массе.

Необходимо экспериментальное исследование влияния этих двух факторов на изменение температурного режима сбраживаемой массы.

## 2.4 Определение времени нагрева свежей порции биомассы

При анализе технологических процессов сбраживания выявлено, что 2 раза в сутки в метантенк загружается часть свежей биомассы, при этом такая же часть сброженной массы удаляется (уравнения 2.6- 2.7).

За одну операцию смены сырья из МТ одновременно удаляется и вводится СМ, равная

$$m_{уд} = m_{вв} = \frac{M}{n \cdot \tau_{сб}}, \quad (2.92)$$

где  $m_{уд} = m_{вв}$  - количество СМ, удаляемое из МТ, и свежая порция, вводимая в него, кг;

$M$  - количество СМ в МТ при нормальном режиме сбраживания, кг.

Начальная энтальпия СМ в МТ составляет

$$H_n = M \cdot C \Big|_{t_{сбр}} \cdot t_{сбр}, \quad (2.93)$$

где  $C \Big|_{t_{сб}}$  - удельная теплоемкость СМ при температуре сбраживания, кДж/(кг·К).

Энтальпия удаляемой части СМ

$$H_{yд} = m_{yд} \cdot C \Big|_{t_{сб}} \cdot t_{сб}. \quad (2.94)$$

Энтальпия вводимой свежей порции, имеющей температуру  $t_{вв} < t_{сбр}$ , составит

$$H_{вв} = m_{вв} \cdot C \Big|_{t_{вв}} \cdot t_{вв}, \quad (2.95)$$

где  $t_{вв}$  - температура вводимой порции, °С;

$C \Big|_{t_{вв}}$  - удельная теплоемкость сырья при  $t_{вв}$ , кДж/(кг · К).

Поскольку  $t_{вв}$  всегда меньше рабочей температуры сбраживания  $t_{сбр}$ , общая температура СМ в МТ понизится и составит  $t_x$ .

Энтальпия смеси  $H_x$  может быть вычислена по уравнению

$$H_x = M \cdot C \Big|_{t_x} \cdot t_x = H_n - H_{yд} + H_{вв}, \quad (2.96)$$

где  $C \Big|_{t_x}$  - удельная теплоемкость СМ при температуре  $t_x$ , кДж/(кг · К).

Температуру  $t_x$  и соответствующее значение  $C \Big|_{t_x}$  можно определить методом последовательных приближений, задавшись для начала условием, что  $C \Big|_{t_x} = C \Big|_{t_{сб}}$ .

В этом случае из уравнений (2.92-2.95) вытекает

$$t_x = \frac{C \Big|_{t_{сб}}}{C \Big|_{t_{сб}}} \cdot t_{сб} \left( 1 - \frac{1}{n \cdot \tau_{сб}} \right) + \frac{1}{n \cdot \tau_{сб}} \cdot \frac{C \Big|_{t_{вв}}}{C \Big|_{t_{сб}}} \cdot t_{вв}. \quad (2.97)$$

Определенная по (2.96) величина  $t_x$  дает возможность уточнить значение  $C|_{t_x}$  и повторным расчетом получить более точное значение температуры СМ в МТ. Цикл необходимо продолжать до достижения заданного различия  $\Delta t_x$  двух последовательных значений  $t_x$ , т.е.

$$t_x|_{n+1} - t_x|_n \leq \Delta t_x. \quad (2.98)$$

Для компенсации охлаждения и обеспечения оптимального температурного режима к СМ нужно подвести дополнительную теплоту в количестве

$$Q = H_n - H_x, \quad (2.99)$$

для чего кратковременно увеличить тепловой поток от наружной поверхности змеевика к СМ, что соответствует увеличению коэффициента теплопередачи «К» от греющего теплоносителя (воды, движущейся в змеевике) через стенку к СМ.

Из анализа теплообмена внутри МТ, следует, что основное влияние на величину « $K_{зм}$ » оказывает коэффициент теплоотдачи  $\alpha_2$  от наружной стенки змеевика к СМ, т.к. интенсивность теплоотдачи от греющего теплоносителя к внутренней стенки змеевика  $\alpha_1$  на порядок выше.

Поэтому целесообразно увеличивать значение  $\alpha_2$  путем перемешивания СМ с помощью мешалки. Следовательно, количество дополнительной теплоты, передаваемой к СМ в единицу времени составит

$$\Delta Q_\tau = (\alpha_{2пер} - \alpha_2) \cdot (t_{нов} - t_x) \cdot F_{зм}. \quad (2.100)$$

Процесс нагрева СМ после смешивания со свежей порцией биомассы до температуры сбраживания рассматривается как нестационарный процесс конвективного теплообмена между греющим элементом и массой сырья [111,112].

Введем допущение, что СМ в МТ нагревается при полном перемешивании, а греющий теплоноситель в конце некоторого участка  $f$  поверхности понизит свою температуру от  $t_{61}$  до  $t_{62}$ .

Для элемента поверхности  $df$  можно написать следующее уравнение теплопередачи

$$dQ = -W_1 \cdot dt_{\text{в2}} = K_{\text{зм}} (t_{\text{в2}} - t_{\text{см}}) df, \quad (2.101)$$

откуда

$$\frac{dt_{\text{в2}}}{(t_{\text{в2}} - t_{\text{см}})} = - \left( \frac{K_{\text{зм}}}{W_1} \right) df, \quad (2.102)$$

где  $W_1$  – водяной эквивалент греющего теплоносителя, Дж/(с·К).

Интегрируя уравнение (2.102) в пределах от  $t_{\text{в1}}$  до  $t_{\text{в2}}$  и от 0 до  $f$ , находим

$$\ln \left[ \frac{(t_{\text{в2}} - t_{\text{см}})}{(t_{\text{в1}} - t_{\text{см}})} \right] = - \left( \frac{K_{\text{зм}}}{W_1} \right) f. \quad (2.103)$$

Среднее значение  $t_{\text{в}} - t_{\text{см}}$  для любого момента времени по всей поверхности теплообмена  $F$  выразится

$$(t_{\text{в2}} - t_{\text{см}})_{\text{ср}} = \frac{1}{F} \int_0^F (t_{\text{в2}} - t_{\text{см}}) \cdot df = \frac{1}{F} \int_0^F (t_{\text{в1}} - t_{\text{см}}) \cdot e^{\frac{-K_{\text{зм}} f}{W_1}} df = (t_{\text{в1}} - t_{\text{см}}) \cdot \frac{W_1}{K_{\text{зм}} F} \cdot \left( 1 - e^{\frac{-K_{\text{зм}} F}{W_1}} \right). \quad (2.104)$$

Количество теплоты, передаваемого через всю поверхность теплообмена  $F$  за время  $d\tau$ , составит:

$$dQ = W_2 \cdot dt = K_{\text{зм}} F \cdot (t_{\text{в2}} - t_{\text{см}})_{\text{ср}} \cdot d\tau = W_1 (t_{\text{в1}} - t_{\text{см}}) \cdot \left( 1 - e^{\frac{-K_{\text{зм}} F}{W_1}} \right) \cdot d\tau, \quad (2.105)$$

откуда

$$\int_0^\tau d\tau = \frac{W_2}{W_1 \cdot \left( 1 - e^{\frac{-K_{\text{зм}} F}{W_1}} \right)} \int_{t_{\text{см}}}^{t_{\text{в}}} \frac{dt}{t_{\text{в1}} - t_{\text{см}}}. \quad (2.106)$$

Следовательно, продолжительность нагрева СМ в МТ от температуры после смешивания до температуры сбраживания выразится так

$$\tau = \left\{ \frac{W_2}{W_1 \cdot \left( 1 - e^{\frac{-K_{3M} F}{W_1}} \right)} \right\} \cdot \ln \left[ \frac{t_{\text{с1}} - t_x}{t_{\text{с1}} - t_{\text{см}}} \right], \text{ с.} \quad (2.107)$$

Определение времени нагрева СМ после загрузки свежей порции биомассы до температуры сбраживания позволит узнать необходимое время работы мешалки для составления температурного режима работы МТ.

## 2.5 Выводы по второму разделу

1. В результате аналитического обзора составлен тепловой баланс потоков теплоты в метантенке, согласно которому теплота подводимая к субстрату затрачивается на компенсацию теплопотерь и нагрев свежей биомассы.

2. Предложена математическая модель тепломассообмена в метантенке, учитывающая наличие отложений СМ на наружной поверхности греющего змеевика и влияние барботажа выделяющегося газа.

3. На основе математической модели тепломассообмена в метантенке предлагается выполнить численные исследования влияния температуры окружающей среды и толщины отложений на змеевике на интенсивность теплообмена в установке.

4. Достоверность разработанной математической модели процессов тепломассообмена в МТ должна быть подтверждена экспериментальными исследованиями.

## РАЗДЕЛ 3

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОООБМЕНА В МЕТАНТЕНКЕ

С целью подтверждения адекватности проведенного математического моделирования процессов теплообмена в МТ, проведены экспериментальные исследования. Определены основные задачи данных исследований:

1. Экспериментальные исследования необходимой температуры теплоносителя в змеевике в зависимости от колебаний температура наружного воздуха и толщины отложений на змеевике.
2. Получение регрессионной математической модели, позволяющей определять температуру теплоносителя в зависимости от температуры окружающей среды и толщины отложений на змеевике.

## 3.1 Физическое моделирование объекта исследования

Поскольку объектом исследования являются тепловые процессы в метантенке, существует необходимость доказательства адекватности разработанных во втором разделе математических моделей. Поэтому в качестве средства получения экспериментальных данных была создана экспериментальная установка МТ (Рис.3.1).

Согласно первой теореме подобия [113], два явления считаются физически подобными, если по характеристикам одного явления можно получить характеристики другого простым умножением на коэффициенты, зависящими только от размерностей. Таким образом, при физическом подобии природа процесса в сопоставимых явлениях сохраняется. Отсюда можно сделать вывод, что для проверки адекватности разработанной математической модели процессов тепломассообмена, экспериментальные исследования следует провести на опытной установке, сохраняющей геометрическое и физическое подобие объекту моделирования [114-116].



Рисунок 3.1 – Экспериментальная установка МТ

Обозначим условия натурные индексом - Н, а экспериментальные (модель) – индексом Э. Тогда можно записать отношения габаритных размеров следующим образом

$$\frac{D_n}{D_э} = \frac{H_n}{H_э} = \frac{D_{нЗМ}}{D_{эЗМ}} = m = const, \quad (3.1)$$

где  $D_n$  и  $D_э$  – внутренние диаметры натурной установки и экспериментальной установки, м;

$H_n$  и  $H_э$  – общая высота метантенка натурной установки и экспериментальной установки, м;

$D_{нЗМ}$  и  $D_{эЗМ}$  – диаметры витков змеевика натурной установки и экспериментальной установки, м;

$m$  - линейный масштаб, показывающий во сколько раз размеры экспериментальной установки уменьшены по сравнению с размерами натурной установки.

Подставим значения габаритных размеров в формулу (3.1) получим следующее

- внутренние диаметры метантенков

$$m = \frac{D_n}{D_3} = \frac{4,885}{0,285} = 17,14 ;$$

- общая высота метантенка

$$m = \frac{H_n}{H_3} = \frac{5,880}{0,345} = 17,04 ;$$

- диаметры витков змеевика

$$m = \frac{D_{нЗМ}}{D_{3ЗМ}} = \frac{1,390}{80} = 17,37 .$$

Так как значения линейного масштаба практически равны по всем характерным размерам метантенка, то согласно первой теореме подобия можно считать экспериментальную установку геометрически подобной.

Данная экспериментальная установка позволяет определять температуру СМ внутри МТ и регулировать температуру греющего теплоносителя в зависимости от температуры окружающей среды и толщины отложений на ЗМ. Исследования проводились с отходами КРС.

Для обеспечения температурного режима внутри МТ смонтирован ЗМ, по которому циркулировал греющий теплоноситель (вода). Внутри смонтирована лопастная мешалка для перемешивания сбрасываемой массы. Скорость перемешивания СМ составляла 2 м/с.



Объем МТ составляет 19 л, греющий ЗМ выполнен из латунной трубы с наружным диаметром 3,5 мм, площадь поверхности нагрева 0,86 м<sup>2</sup>, коэффициент теплопроводности стенки МТ 0,1 кДж/м<sup>2</sup>·К, плановая влажность субстрата 90%.

На рисунке 3.2 представлена схема экспериментальной установки.

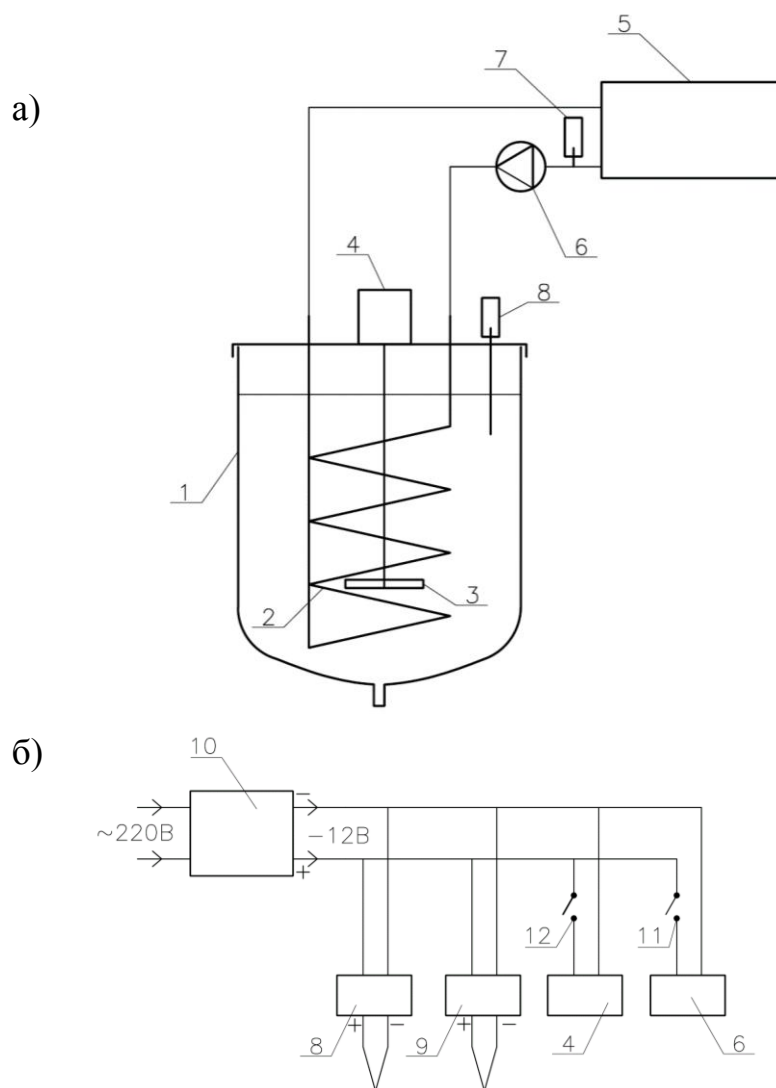


Рисунок 3.2 – Схема экспериментальной установки с электрической схемой подключения приборов:

а) схема экспериментальной установки; б) электрическая схема подключения приборов

1 – метантенк; 2 – греющий змеевик; 3 – лопастная мешалка; 4 – электродвигатель вала мешалки; 5 – бак с греющей водой; 6 – насос для подачи греющего теплоносителя; 7 – ртутный термометр; 8, 9 – термометры электрические; 10 – электрический блок питания

В период проведения эксперимента установка находилась в неотапливаемом помещении, температура в котором равнялась температуре наружного воздуха.

Для измерения температуры греющего теплоносителя использовались лабораторный ртутный термометр (ГОСТ 2823-73), для замеров температуры СМ в МТ использовался термометр электронный Т-0,36DS во влагозащищенном корпусе. Для измерения температуры окружающего воздуха использовался электронный термометр Т-0,36DS.

Согласно техническому паспорту электронных термометров Т-0,36DS погрешность измерения составляет  $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ .

Два раза в сутки включался электродвигатель вала лопастной мешалкой, и сбрасываемая масса перемешивалась.

За время проведения опытов (9 месяцев) на поверхности ЗМ наблюдалось образование отложений твердой фракции субстрата. Причем образование слоя отложений происходило даже когда сбрасываемая масса не нагревалась. Это наблюдение позволяет сделать вывод, что в процессе эксплуатации на нагревательном элементе будет образовываться слой отложений. Однако, как известно ни одна физическая модель не может быть полностью тождественна объекту моделирования. Поэтому и толщина равномерной не была. На рисунке 3.3 показано фото отложений на змеевике.



Рисунок 3.3 - Отложения на наружной стенке змеевика

По результатам замеров определена средняя толщина отложений на наружной стенке змеевика твердой фракции субстрата и она составляла в среднем 2 мм.

### 3.2 Ход проведения эксперимента

В МТ 1 загружалась СМ и по пропорции разбавлялась водой до влажности 90%. В баке 5 находилась горячая вода, температура которой замерялась термометром 7. Выключателем 11 включался насос 6 для подачи горячей воды в ЗМ. Вода, прошедшая ЗМ, по шлангам попадала обратно в бак 5. В баке 5 поддерживалась постоянная температура воды. Когда температура СМ в МТ достигала 40°C, температура греющего теплоносителя оставалась на одном уровне и заносилась в журнал наблюдений. Опыт проводился при следующих температурах наружного воздуха -25, -20, -15, -10, -5, 0, 5, и 10°C. При каждой температуре наружного воздуха измерялась толщина отложений на поверхности ЗМ от 0 до 2 мм с шагом 0,5 мм. Толщину отложений определяли с помощью толщинометра. Для исключения ошибки опыта (ошибка воспроизводимости), проводились параллельные три опыта при одинаковых условиях [117-118].

Был проведен полный двухфакторный эксперимент с равностоящими уровнями. В таблице 3.1 приведены данные, полученные в результате проведения эксперимента, а также средние значения по каждой группе из трех опытов. Таким образом, определялась действительная температура греющего теплоносителя в зависимости от двух факторов. Это та температура греющего теплоносителя, которую необходимо поддерживать для стабильного температурного режима сбраживаемой массы.

Таблица 3.1- Результат проведения эксперимента

X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub>															
	-25		-20		-15		-10		-5		0		5		10	
0	42,9		43,5		43,2		42,5		42,4		42,0		41,8		41,0	
	42,9	43,4	42,7	43,7	42,4	43,0	42,9	43,0	42,6	42,6	42,4	42,3	42,1	42,0	41,8	41,6
	44,5		44,8		43,5		43,5		43,5		42,7		42,3		42,0	
0,5	47,6		48,5		47,1		46,3		45,5		44,9		44,3		43,5	
	49,2	49,0	47,3	48,6	47,8	47,8	47,1	47,0	46,4	46,3	45,7	45,6	45,0	45,1	44,3	44,2
	50,3		50,0		48,4		47,8		47,0		46,3		46,1		44,8	
1	52,3		52,4		50,8		50,0		49,0		47,8		46,7		45,5	
	54,6	54,2	53,5	53,4	52,4	52,2	51,2	51,2	50,1	50,1	49,0	48,9	47,9	47,8	46,8	46,7
	55,7		54,3		53,5		52,3		51,3		50,0		48,9		47,8	
1,5	57,1		56,5		55,3		53,9		52,3		50,8		49,2		47,5	
	60,0	59,4	58,5	58,2	56,9	56,8	55,4	55,3	53,9	53,8	52,3	52,2	50,8	50,7	49,2	49,1
	61,3		59,8		58,3		56,8		55,3		53,5		52,3		50,6	
2,0	62,3		61,5		59,1		57,1		55,5		53,7		51,7		49,8	
	65,4	64,5	63,5	63,2	61,5	61,3	59,5	59,3	57,6	57,4	55,6	55,5	53,7	53,8	51,7	51,6
	65,8		64,5		63,3		61,3		59,3		57,3		55,4		53,5	

По результатам эксперимента построены зависимости влияния температуры окружающего воздуха и толщины отложений на действительную температуру греющего теплоносителя (Рис. 3.4).

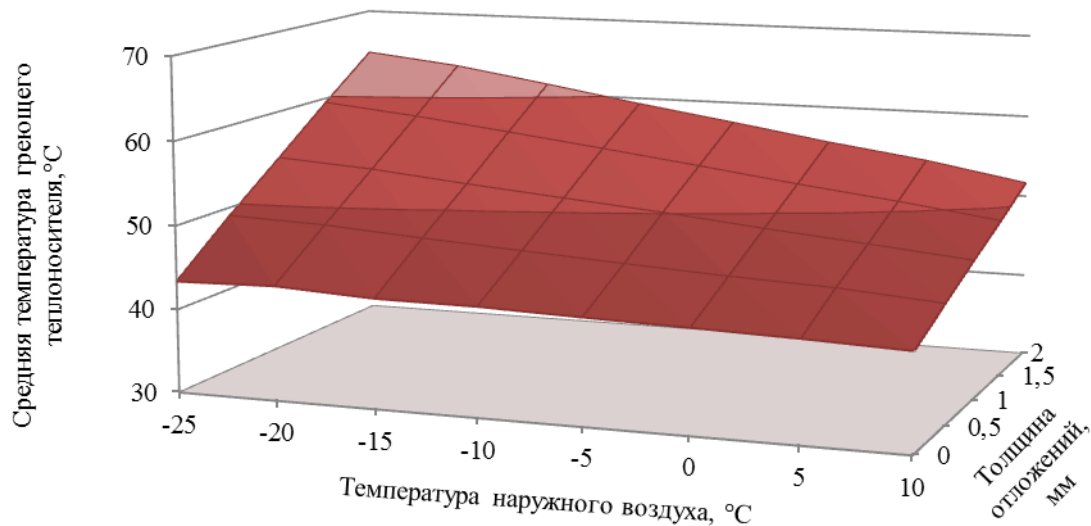


Рисунок 3.4 - Зависимость температуры греющего теплоносителя от толщины отложений и температуры окружающего воздуха

Как следует из приведенной зависимости, чем ниже температура окружающего воздуха и больше толщина отложений, тем выше должна быть температура греющего теплоносителя на входе в ЗМ.

Так как слой отложений приводит к значительному термическому сопротивлению, то температура на поверхности отложений не превышает 50°C, что не угнетает жизнедеятельность бактерий.

Целью регулирования температуры греющего теплоносителя является поддержание температурного режима внутри МТ, поэтому в ходе эксперимента замерялась температура СМ. Результаты зависимости температуры СМ от толщины отложений и температуры окружающего воздуха приведены на рисунке 3.5.

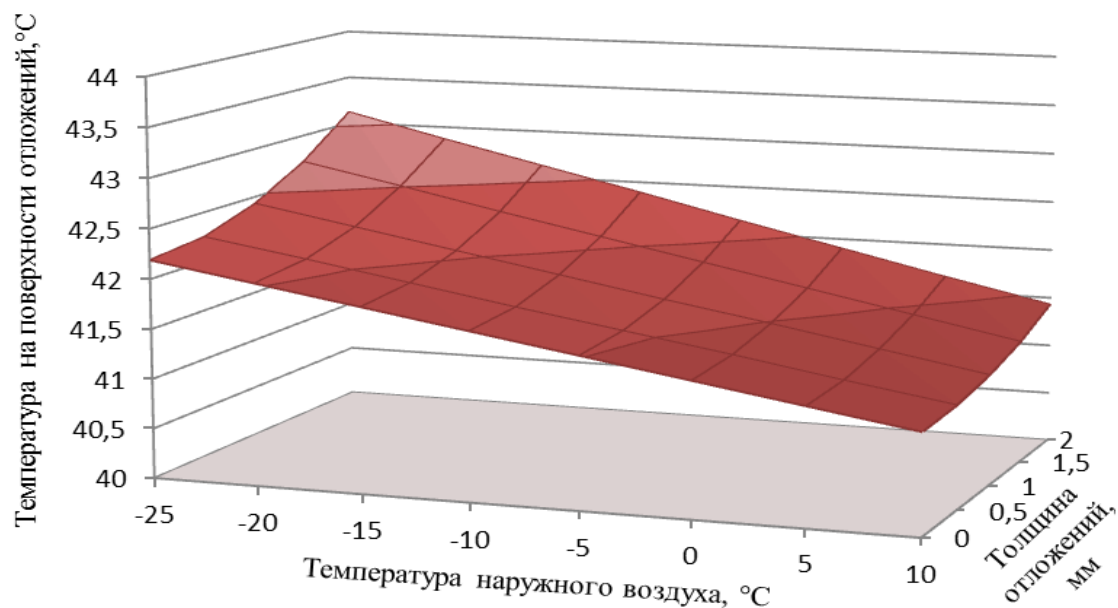


Рисунок 3.5 - Зависимость температуры СМ от толщины отложений и температуры окружающего воздуха

Из рисунка 3.5 видно, что температура СМ при повышении средней температуры греющего теплоносителя до  $65^{\circ}\text{C}$  не превышает  $41,5^{\circ}\text{C}$ . Это связано с тем, что толщина отложений на греющем ЗМ препятствует нагреву СМ. В свою очередь это изменение температуры СМ на  $1-2^{\circ}\text{C}$  не влияет на жизнедеятельность метаногенных бактерий и как следствие не уменьшает количества получаемого биогаза в течение всего цикла сбраживания.

### 3.3 Планирование и обработка результатов эксперимента

Составлено факторное пространство проводимого полного двухфакторного эксперимента первого порядка с равностоящими уровнями (Рис. 3.6).

Фактор  $x_1$  –температура наружного воздуха, на восьми уровнях  $-25, -20, -15, -10, -5, 0, 5, \text{ и } 10^{\circ}\text{C}$ .

Фактор  $x_2$  –толщина отложений, изменяется на пяти уровнях, принимая значения  $0, 0,05, 0,1, 0,15, 0,2 \text{ мм}$ .

В каждой узловой точке факторного пространства было рандомизированно проведено по три опыта, по каждому из 2-х факторов, в итоге имеем 40 опытов.

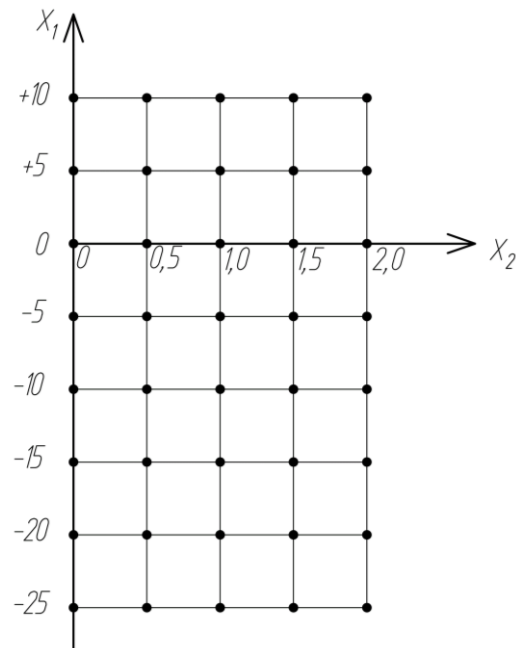


Рисунок 3.6 - Факторное пространство эксперимента

Исходя из вышеперечисленного план является ортогональным.

Проверим гипотезу о воспроизводимости опытов при помощи критерия Кохрена, расчетное значение которого вычислим по формуле

$$G_p = \frac{\max S_j^2}{\sum_{j=1}^N S_j^2}, \quad (3.2)$$

где  $S_j^2$  - оценка дисперсии для каждой  $j$ -й точки факторного пространства, определяется по формуле

$$S_j^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^m (y_j - \overline{y_{j,cp}}), \quad (3.2)$$

где  $m$  - количество параллельных опытов;

$y_j$  - значение выходного параметра в  $j$ -й строке;

$\overline{y_{j,cp}}$  - среднее значение параметра в  $j$ -й строке.

Построчная дисперсия для каждой серии опытов приведена в приложении Б. Критическое значение критерия  $G_p$  определялось для каждой серии опытов с различной толщиной отложений. Определяя по таблице распределения Кохрена при уровне значимости  $\alpha = 0,05$  критическое значение критерия Кохрена, получим  $G_{кр} = 0,516$ . Критическое значение критерия  $G_p$  для опытов без отложений равно  $G_{p1}=0,381$ , для опытов с толщиной отложений 0,5 мм  $G_{p2}=0,270$ , для опытов с толщиной отложений 1,0 мм  $G_{p3}=0,243$ , для опытов с толщиной отложений 1,5 мм  $G_{p4}=0,225$ , для опытов с толщиной отложений 2,0 мм  $G_{p5}=0,156$ . Так как для каждой серии опытов  $G_p < G_{кр}$ , то опыты можно считать воспроизводимыми нет необходимости проводить эксперимент повторно.

Экспериментально-статистическая математическая модель, полученная на основании экспериментов, записывается в виде полинома второй степени [119-123]

$$y_p = a_0 + a_1 \cdot X_1 + a_2 \cdot X_2 + a_{12} \cdot X_1 \cdot X_2 + a_{11} \cdot X_1^2 + a_{22} \cdot X_2^2, \quad (3.2)$$

где  $a_0$  - значение  $y$  в центре плана;

$a_1$  и  $a_2$  - коэффициенты, характеризующие степень влияния факторов  $x_1$  и  $x_2$  на функцию  $y$ ;

$a_{12}$  - коэффициент характеризует весомость этого влияния взаимодействия 1-го и 2-го факторов на  $y$ ;

$a_{11}$  - характеризует весомость влияния  $X_1^2$ ;

$a_{22}$  - характеризует весомость влияния  $X_2^2$ .

Получение статистической модели сводится к нахождению по результатам эксперимента значений неизвестных коэффициентов  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_{12}$ ,  $a_{11}$ ,  $a_{22}$ . Для регрессионного анализа составим таблицу экспериментальных данных с преобразованными координатами узловых точек (Табл. 3.2).



Таблица 3.2 - Исходные данные с преобразованными координатами узловых точек.

U	X <sub>0U</sub>	X <sub>1U</sub>	X <sub>2U</sub>	X <sub>3U</sub>	X <sub>4U</sub>	X <sub>5U</sub>
1	2	3	4	5	6	7
1	1	-25	0	0	625	0
2	1	-25	0,05	-1,25	625	0,0025
3	1	-25	0,1	-2,5	625	0,01
4	1	-25	0,15	-3,75	625	0,0225
5	1	-25	0,2	-5	625	0,04
6	1	-20	0	0	400	0
7	1	-20	0,05	-1	400	0,0025
8	1	-20	0,1	-2	400	0,01
9	1	-20	0,15	-3	400	0,0225
10	1	-20	0,2	-4	400	0,04
11	1	-15	0	0	225	0
12	1	-15	0,05	-0,75	225	0,0025
13	1	-15	0,1	-1,5	225	0,01
14	1	-15	0,15	-2,25	225	0,0225
15	1	-15	0,2	-3	225	0,04
16	1	-10	0	0	100	0
17	1	-10	0,05	-0,5	100	0,0025
18	1	-10	0,1	-1	100	0,01
19	1	-10	0,15	-1,5	100	0,0225
20	1	-10	0,2	-2	100	0,04
21	1	-5	0	0	25	0
22	1	-5	0,05	-0,25	25	0,0025
23	1	-5	0,1	-0,5	25	0,01
24	1	-5	0,15	-0,75	25	0,0225
25	1	-5	0,2	-1	25	0,04
26	1	0	0	0	0	0
27	1	0	0,05	0	0	0,0025
28	1	0	0,1	0	0	0,01
29	1	0	0,15	0	0	0,0225
30	1	0	0,2	0	0	0,04
31	1	5	0	0	25	0
32	1	5	0,05	0,25	25	0,0025
33	1	5	0,1	0,5	25	0,01
34	1	5	0,15	0,75	25	0,0225
35	1	5	0,2	1	25	0,04
36	1	10	0	0	100	0
37	1	10	0,05	0,5	100	0,0025
38	1	10	0,1	1	100	0,01
39	1	10	0,15	1,5	100	0,0225
40	1	10	0,2	2	100	0,04

В таблице 3.2 приняты следующие обозначения

U – количество узловых точек эксперимента, U=1,2,3...N;

N – количество узловых точек, а также число опытов;

$X_{0U}$ — фиктивная переменная, равна 1.

Переменные  $X_{3U}$ ,  $X_{4U}$ ,  $X_{5U}$  определяются по формулам:

$$X_{3U} = X_1 \cdot X_2; \quad (3.3)$$

$$X_{4U} = X_1^2; \quad (3.4)$$

$$X_{5U} = X_2^2. \quad (3.5)$$

Для нахождения неизвестных  $a_0, a_1, a_2, a_{12}, a_{11}, a_{22}$  нужно определить частные производные суммы квадратов

$$\begin{aligned} \frac{\partial SS}{\partial a_0} &= 0 ; \quad \frac{\partial SS}{\partial a_1} = 0 ; \quad \frac{\partial SS}{\partial a_{12}} = 0 ; \quad \frac{\partial SS}{\partial a_{11}} = 0 ; \quad \frac{\partial SS}{\partial a_{22}} = 0 . \\ SS &= \left[ \begin{array}{l} (Y_1 - a_0 X_{01} - a_1 X_{11} - a_2 X_{21} - a_{12} X_{31} - a_{11} X_{41} - a_{22} X_{51})^2 + \\ + (Y_2 - a_0 X_{02} - a_1 X_{12} - a_2 X_{22} - a_{12} X_{32} - a_{11} X_{42} - a_{22} X_{52})^2 + \\ ..... \\ + (Y_{40} - a_0 X_{040} - a_1 X_{140} - a_2 X_{240} - a_{12} X_{340} - a_{11} X_{440} - a_{22} X_{540})^2 \end{array} \right] \end{aligned}$$

Частная производная  $a_0$  для первой строки будет выглядеть

$$2a_0x_{01}x_{01}+2a_1x_{01}x_{11}+2a_2x_{01}x_{21}+2a_{12}x_{01}x_{31}+2a_{11}x_{01}x_{41}+2a_{22}x_{01}x_{51}-2x_{01}Y_1.$$

Для всех остальных строк таблицы 3.2 частная производная  $a_0$  будет выглядеть аналогично. После этого провели суммирование по всем строкам, затем выполнили аналогичные действия по другим производным, и получили систему нормальных уравнений.

Для упрощения записи системы нормальных уравнений введем обозначения

$$\sum_I^N x_{ij} x_{ju} = ij \quad \text{и} \quad \sum_I^N x_{iu} y_u = iy,$$

где  $i$  и  $j$  - счетчики количества членов регрессии,  $i=0,1,2,3,4,5$ ;  $j=0,1,2,3,4,5$ .

Коэффициенты уравнения (3.2) будем находить методом наименьших квадратов. Для чего запишем систему нормальных уравнений в матричной форме  $(ij) = (jy)$

Тогда матрицы  $ij$  и  $jy$  примут следующий вид

$$(ij) = \begin{pmatrix} 00 & 01 & 02 & 03 & 04 & 05 \\ 10 & 11 & 12 & 13 & 14 & 15 \\ 20 & 21 & 22 & 23 & 24 & 25 \\ 30 & 31 & 32 & 33 & 34 & 35 \\ 40 & 41 & 42 & 43 & 44 & 45 \\ 50 & 51 & 52 & 53 & 54 & 55 \end{pmatrix}, (jy) = \begin{pmatrix} 0y \\ 1y \\ 2y \\ 3y \\ 4y \\ 5y \end{pmatrix}.$$

В данном случае нетрудно убедиться, что

$$(ij) = \begin{pmatrix} 40 & -300 & 4 & -30 & 7500 & 0,6 \\ -300 & 7500 & -30 & 750 & -135000 & -4,5 \\ 4 & -30 & 0,6 & -4,5 & 750 & 0,1 \\ -30 & 750 & -4,5 & 112,5 & -13500 & -0,75 \\ 7500 & -135000 & 750 & -13500 & 311250 & 112,5 \\ 0,6 & -4,5 & 0,1 & -0,75 & 112,5 & 0,0177 \end{pmatrix}; \quad (3.6)$$

$$(iy) = \begin{pmatrix} 2443,09 \\ -20592,7 \\ 275,51 \\ -2376,31 \\ 491385 \\ 42,87 \end{pmatrix}.$$

Систему (3.5) можно решить с помощью обратной матрицы  $(C_{ij})$

$$(C_{ij}) = \begin{pmatrix} 0,153 & 0,00214 & -2,1429 & -0,02857 & -0,000143 & 7,1429 \\ 0,00214 & 0,001 & -0,02857 & -0,00381 & 2,9 \cdot 10^{-5} & -7,4764 \cdot 10^{-12} \\ -2,1429 & -0,02857 & 64,2857 & 0,2857 & -1,3646 \cdot 10^{-15} & -285,7143 \\ -0,02857 & -0,00381 & 0,2857 & 0,0381 & 4,84019 \cdot 10^{-18} & 8,1678 \cdot 10^{-9} \\ -0,000143 & 2,9 \cdot 10^{-5} & -2,539 \cdot 10^{-16} & 3,02 \cdot 10^{-18} & 2,0 \cdot 10^{-6} & 1,38291 \cdot 10^{-13} \\ 7,1429 & 9,453 \cdot 10^{-11} & -285,7143 & 6,23 \cdot 10^{-9} & 7,09012 \cdot 10^{-13} & 1428,5714 \end{pmatrix}$$

Тогда неизвестные коэффициенты регрессии можно рассчитать по формуле

$$a_i = \sum_{j=0}^m [(C_{ij})(jy)]. \quad (3.7)$$

Получим регрессионную модель

$$y_{\text{мод}} = 44,65 - 0,14 \cdot X_1 + 134,59 \cdot X_2 - 3,16 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,004 \cdot X_1^2 - 11,57 \cdot X_2^2. \quad (3.8)$$

Проведем дисперсный анализ построенной регрессионной модели. Для чего предварительно рассчитаем дисперсии воспроизводимости и адекватности по формулам

$$S_{\text{восн}}^2 = \frac{\sum_1^N \sum_1^n (y_i - \bar{y})}{N(n-1)}, \quad (3.9)$$

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{\sum_1^N (\bar{y} - y_{\text{мод}})^2}{f}, \quad (3.10)$$

где  $\bar{y}$  - среднее арифметическое значение параметра оптимизации из трех повторных опытов (значения приведены в табл. 3.1).

$f$  - число степеней свободы, определяется по формуле

$$f = N - (K + 1), \quad (3.11)$$

$K$  - число членов регрессии.

В данном случае  $S_{\text{восн}}^2 = 15,33$ ,  $S_{\text{ад}}^2 = 1,27$ .

Проверим адекватность полученного уравнения регрессии (3.8) экспериментальным данным при помощи критерия Фишера

$$F_{\text{расч}} = \frac{S_{\text{ад}}^2}{S_{\text{восн}}^2} = 0,0831. \quad (3.12)$$

Для проверки гипотезы об адекватности модели сравним полученное значение  $F_{\text{расч}}$  с табличным значением при 5% уровне значимости [124-127].

$$F_{\text{табл}} = F_{(0,05;5;34)} = 2,4932.$$

Так как рассчитанное значение критерия Фишера не превышает табличное  $F_{\text{расч}} < F_{\text{табл}}$ , то с соответствующей доверительной вероятностью модель (3.8) можно считать адекватной.

При сравнении значений по уравнению (3.8) с экспериментальными данными, можно сделать вывод, что значения температуры греющего теплоносителя полученные по уравнению (3.8) являются недостаточно точными. Поэтому следует повторить эксперименты при переносе центра плана в другую точку факторного пространства [119,121]. Для этого воспользуемся формулой

$$x_i^* = \frac{x_{i,n} - 0,5(x_{i,\max} + x_{i,\min})}{0,5\Delta x_i}, \quad (3.13)$$

где  $x_i^*$  - новая координата;

$x_{i,n}$  - старая координата  $x_1$  и  $x_2$ ;

$x_{i,\max}, x_{i,\min}$  – максимальный и минимальный уровни факторов  $x_i$ .

Найдены новые переменные по формуле

$$\begin{aligned} x_1^* &= \frac{x_{1,n} - 0,5(10 + (-25))}{0,5 \cdot (10 - (-25))} = \frac{x_{1,n} + 7,5}{17,5}; \\ x_2^* &= \frac{x_{2,n} - 0,5(2 + 0)}{0,5 \cdot (2 - 0)} = \frac{x_{2,n} - 1}{1}. \end{aligned} \quad (3.14)$$

Согласно (3.2) пересчитаем значения уровней в новых переменных

$$\begin{aligned} x_1^* &= -1; -\frac{5}{7}; -\frac{3}{7}; -\frac{1}{7}; \frac{1}{7}; \frac{3}{7}; \frac{5}{7}; +1; \\ x_2^* &= -1; -0,5; 0; 0,5; 1. \end{aligned}$$

Тогда исходные данные с преобразованными координатами узловых точек после переноса центра плана приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3- Исходные данные с преобразованными координатами узловых точек после переноса центра плана.

U	X <sub>0U</sub>	X <sub>1U</sub>	X <sub>2U</sub>	X <sub>3U</sub>
1	2	3	4	5
1	1	-1	-1	1
2	1	-1	-0,5	0,5
3	1	-1	0	0
4	1	-1	0,5	-0,5
5	1	-1	1	-1
6	1	$-\frac{5}{7}$	-1	$\frac{5}{7}$
7	1	$-\frac{5}{7}$	-0,5	$\frac{5}{14}$
8	1	$-\frac{5}{7}$	0	0
9	1	$-\frac{5}{7}$	0,5	$-\frac{5}{14}$
10	1	$-\frac{5}{7}$	1	$-\frac{5}{7}$
11	1	$-\frac{3}{7}$	-1	$\frac{3}{7}$
12	1	$-\frac{3}{7}$	-0,5	$\frac{3}{14}$
13	1	$-\frac{3}{7}$	0	0
14	1	$-\frac{3}{7}$	0,5	$-\frac{3}{14}$
15	1	$-\frac{3}{7}$	1	$-\frac{3}{7}$
16	1	$-\frac{1}{7}$	-1	$\frac{1}{7}$
17	1	$-\frac{1}{7}$	-0,5	$\frac{1}{14}$
18	1	$-\frac{1}{7}$	0	0
19	1	$-\frac{1}{7}$	0,5	$-\frac{1}{14}$
20	1	$-\frac{1}{7}$	1	$-\frac{1}{7}$
21	1	$\frac{1}{7}$	-1	$-\frac{1}{7}$
22	1	$\frac{1}{7}$	-0,5	$-\frac{1}{14}$
23	1	$\frac{1}{7}$	0	0

Продолжение табл. 3.3

1	2	3	4	5
24	1	$\frac{1}{7}$	0,5	$\frac{1}{14}$
25	1	$\frac{1}{7}$	1	$\frac{1}{7}$
26	1	$\frac{3}{7}$	-1	$-\frac{3}{7}$
27	1	$\frac{3}{7}$	-0,5	$-\frac{3}{14}$
28	1	$\frac{3}{7}$	0	0
29	1	$\frac{3}{7}$	0,5	$\frac{3}{14}$
30	1	$\frac{3}{7}$	1	$\frac{3}{7}$
31	1	$\frac{5}{7}$	-1	$-\frac{5}{7}$
32	1	$\frac{5}{7}$	-0,5	$-\frac{5}{14}$
33	1	$\frac{5}{7}$	0	0
34	1	$\frac{5}{7}$	0,5	$\frac{5}{14}$
35	1	$\frac{5}{7}$	1	$\frac{5}{7}$
36	1	1	-1	-1
37	1	1	-0,5	-0,5
38	1	1	0	0
39	1	1	0,5	0,5
40	1	1	1	1

Значения переменных  $X_{3U}$ ,  $X_{4U}$ ,  $X_{5U}$  определяются по формулам (3.2-3.4)

Нормальная матрица  $ij$  и матрица  $iy$  в таком случае будет иметь вид

$$(ij) = \begin{pmatrix} 40 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{840}{49} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 20 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1680}{196} \end{pmatrix}, (iy) = \begin{pmatrix} 2443,09 \\ -129,68 \\ 312 \\ -47,45 \end{pmatrix}. \quad (3.15)$$

В ортогональной матрице  $(ij)$  все коэффициенты ковариации  $I(ai, aj)=0$ , значит коэффициенты регрессии будем вычислять по формуле

$$a_i = \frac{\sum_{U=1}^N x_{iU} y_U}{\sum_{U=1}^N x_{iU}^2}. \quad (3.16)$$

Воспользовавшись выражением (3.14), вычислим коэффициенты регрессии

$$a_0=61,1, a_1=-7,62, a_2=15,55, a_{12}=-5,42.$$

Подставив найденные значения коэффициентов  $a_i$  в экспериментально-статистическую математическую модель получим

$$y_p = 61,1 - 7,62x_1' + 15,55x_2' - 5,42x_1'x_2'. \quad (3.17)$$

Проверяем адекватность полученного уравнения регрессии (3.17) экспериментальным данным при помощи критерия Фишера [124-127]. Дисперсия адекватности равна

$$S_{ad}^2 = 0,0868.$$

И экспериментальное значение критерия Фишера тогда будет равно  $F_{эксп} = 0,0056$ .

При уровне значимости  $\alpha=0,05$   $F_{табл}=F_{(0,05;3;36)}=2,8666$ . И поскольку  $F_{эксп} < F_{табл}$ , следовательно, полученная статистическая модель является адекватной.

Для записи экспериментально-статистической математической модели в реальных физических величинах произведем переход от стандартизированного к натуральному масштабу

$$y_p = 61,1 - 7,62 \frac{x_{1,n} + 7,5}{17,5} + 15,55 \frac{x_{2,n} - 1}{1} - 5,42 \frac{x_{1,n} + 7,5}{17,5} \cdot \frac{x_{2,n} - 1}{1}. \quad (3.18)$$



Проведя в формуле (3.18) элементарные математические преобразования, получим

$$y_p = 44,62 - 0,12x_1 + 13,18x_2 - 0,31x_1 \cdot x_2. \quad (3.19)$$

Математическая модель в реальных физических величинах

$$y_p = 44,62 - 0,12t_{окр} + 13,18\delta_{отл} - 0,31t_{окр} \cdot \delta_{отл}.$$

Для каждой серии опытов с различной толщиной отложений, была произведена гипотеза о нормальности распределения данных.

Математическое ожидание нормально распределенной случайной величины, а мы можем полагать, что в нашем случае мы имеем дело с нормальным распределением согласно центральной теоремы, которая применима, так как объем выборки велик ( $n=40$ ), доверительный интервал вычисляется по формуле

$$\bar{y} - t_y \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \leq a \leq \bar{y} + t_y \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \quad (3.20)$$

где  $\bar{y}$  - выборочное среднее значение;

$t_y$  - квантиль распределения Стьюдента уровня значимости  $\alpha=0,95$ , при уровне степеней свободы  $f=n-1$  принимается  $t_y=4,30$ ;

$a$  - среднее значение генеральной совокупности;

$\sigma$  - среднеквадратичное отклонение;

$n$  - число опытов.

Результаты проводимых исследований температур греющего теплоносителя при различной температуре наружного воздуха и толщине отложений на ЗМ, приведены в приложении Б.

С целью проверки адекватности аналитической математической модели проведем сравнение данных полученных по уравнению (3.19) с данными, полученными при расчете по аналитической математической модели и экспериментальными данными. Результаты приведены на рисунках 3.7-3.11.

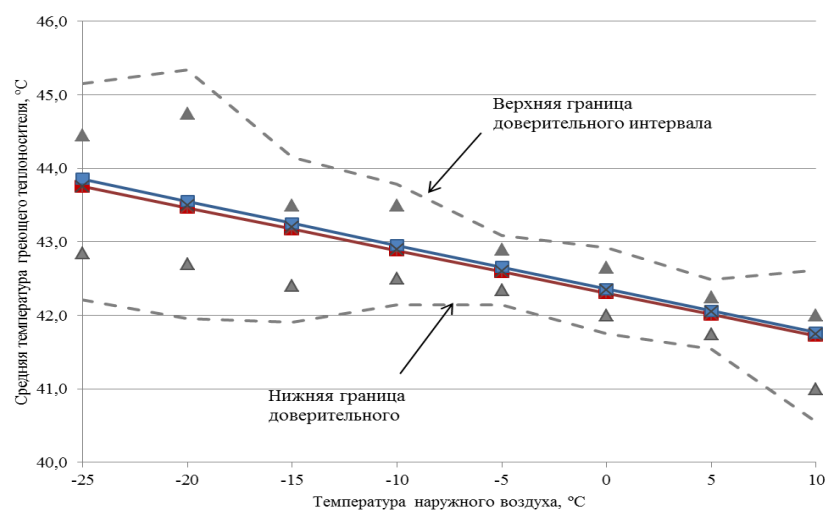


Рисунок 3.7 - Сравнение расчетных и опытных значений температуры греющего теплоносителя без отложений:

- ▲ опытные данные;
- данные, полученные по экспериментально-статистической математической модели;
- данные, полученные по аналитической модели

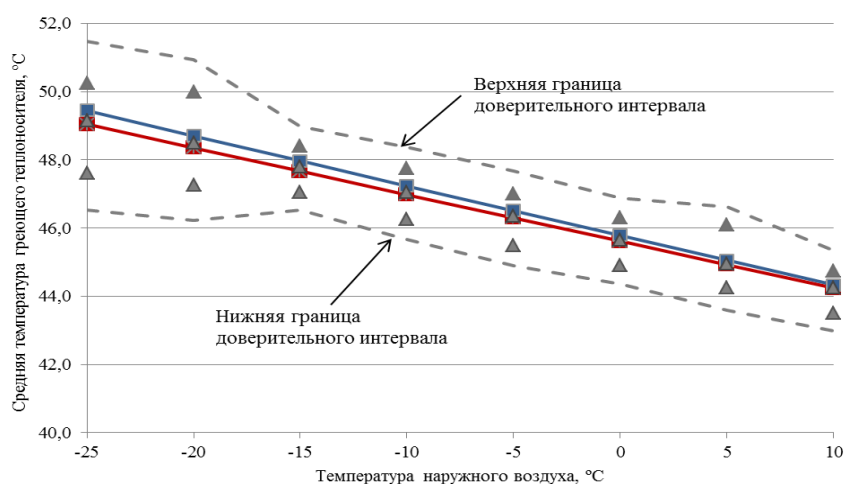


Рисунок 3.8 - Сравнение расчетных и опытных значений температуры греющего теплоносителя при толщине отложений 0,5 мм:

- ▲ опытные данные;
- данные, полученные по экспериментально-статистической математической модели;
- данные, полученные по аналитической модели

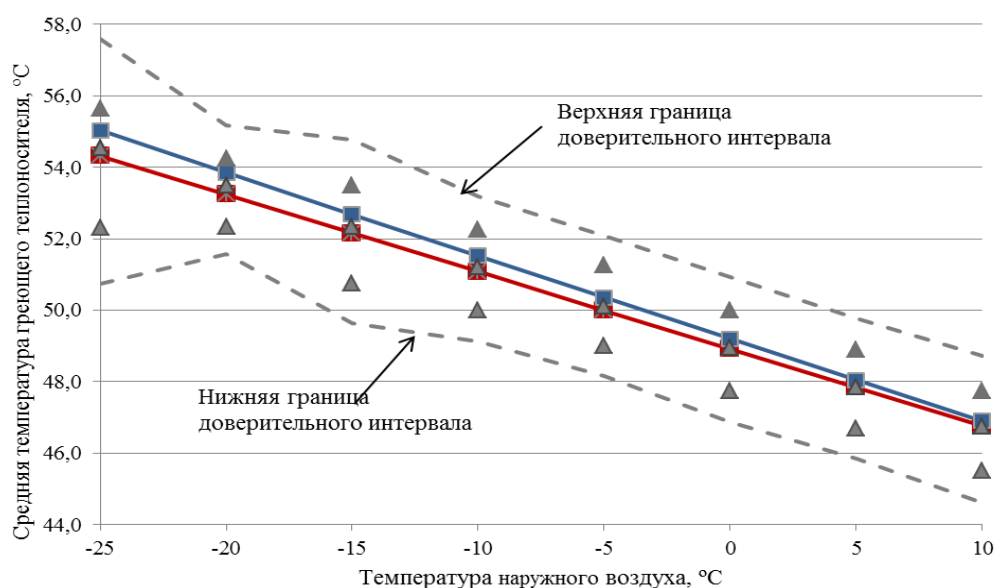


Рисунок 3.9 - Сравнение расчетных и опытных значений температуры греющего теплоносителя при толщине отложений 1,0 мм:

- ▲ опытные данные;
- данные, полученные по экспериментально-статистической математической модели;
- данные, полученные по аналитической модели

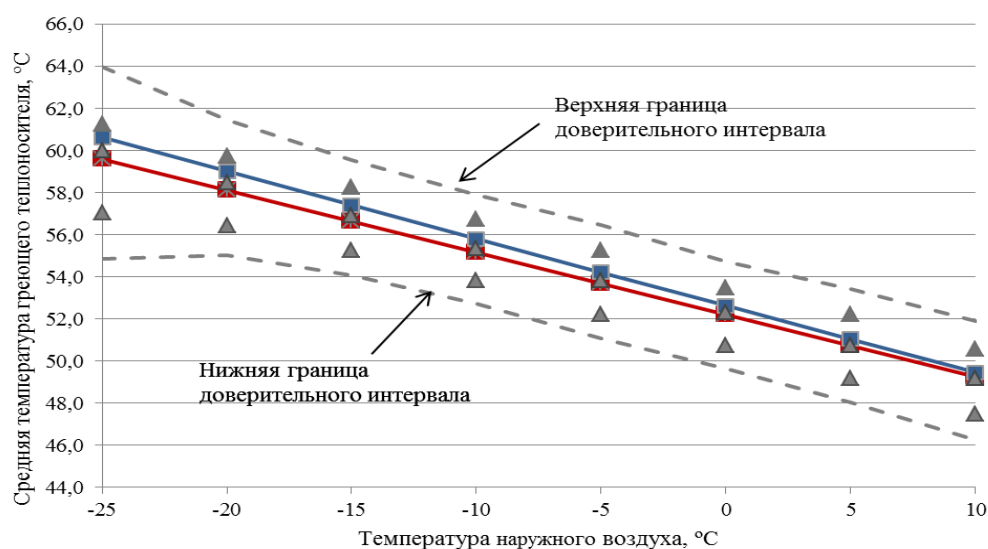


Рисунок 3.10 - Сравнение расчетных и опытных значений температуры греющего теплоносителя при толщине отложений 1,5 мм:

- ▲ опытные данные;
- данные, полученные по экспериментально-статистической математической модели;
- данные, полученные по аналитической модели

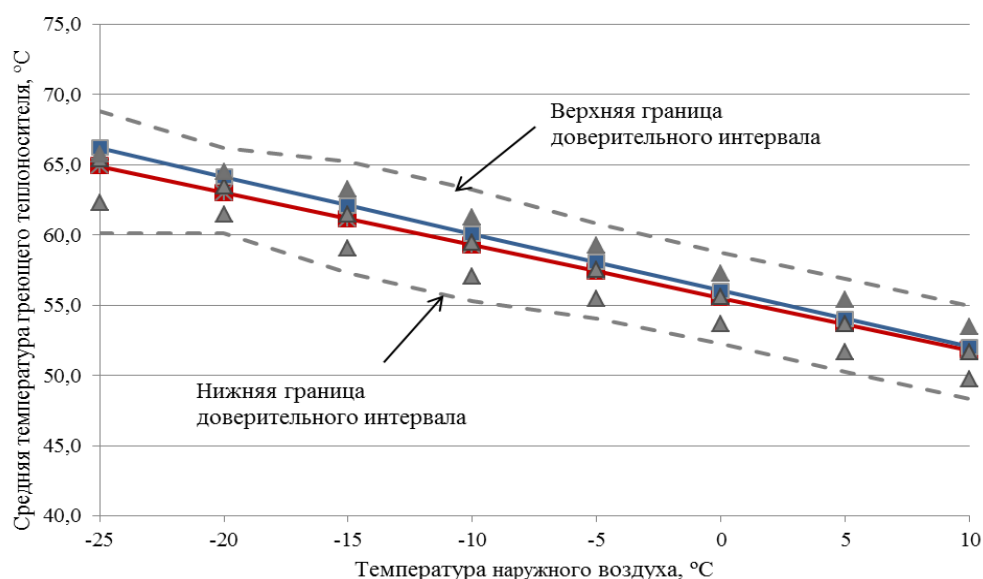


Рисунок 3.11 - Сравнение расчетных и опытных значений температуры греющего теплоносителя при толщине отложений 2,0 мм:

▲ опытные данные;

+ данные, полученные по экспериментально-статистической математической модели.

× данные, полученные по аналитической модели

Из графиков, приведенных на рисунках 3.7 – 3.11 видно, что значения температуры греющего теплоносителя, полученные по аналитической математической модели и по экспериментально-статистической математической модели (3.19), попадают в доверительный интервал и сходятся со значениями полученными опытным путем.

По результатам проведенных экспериментальных исследований и значению числа Фишера можно сделать следующий вывод, что полученная математическая зависимость (3.19), после переноса центра плана, описывающая влияние двух факторов на температуру греющего теплоносителя, является более адекватной, чем модель (3.8).

Также из графиков 3.7-3.11 видно, что линии температур греющего теплоносителя близки, что говорит о сходимости экспериментальных и теоретических значений, а разница между значениями не превышает 5,8%. Это говорит об адекватности аналитической математической модели, разработанной во втором разделе.

### 3.4 Программа автоматизированного расчета параметров МТ

Для проведения практических расчетов разработана компьютерная программа «Метантенк» для определения габаритных размеров и теплотехнических параметров МТ, а так же количества получаемого биогаза в зависимости количества голов животных и технологических факторов. Программа основана на формулах аналитической модели, разработанной в разделе 2. Алгоритм программы «Метантенк» приведен на рисунке 3.12.

Программа создана на базе программного пакета Microsoft Office Excel с использованием элементов языка программирования Visual Basic.

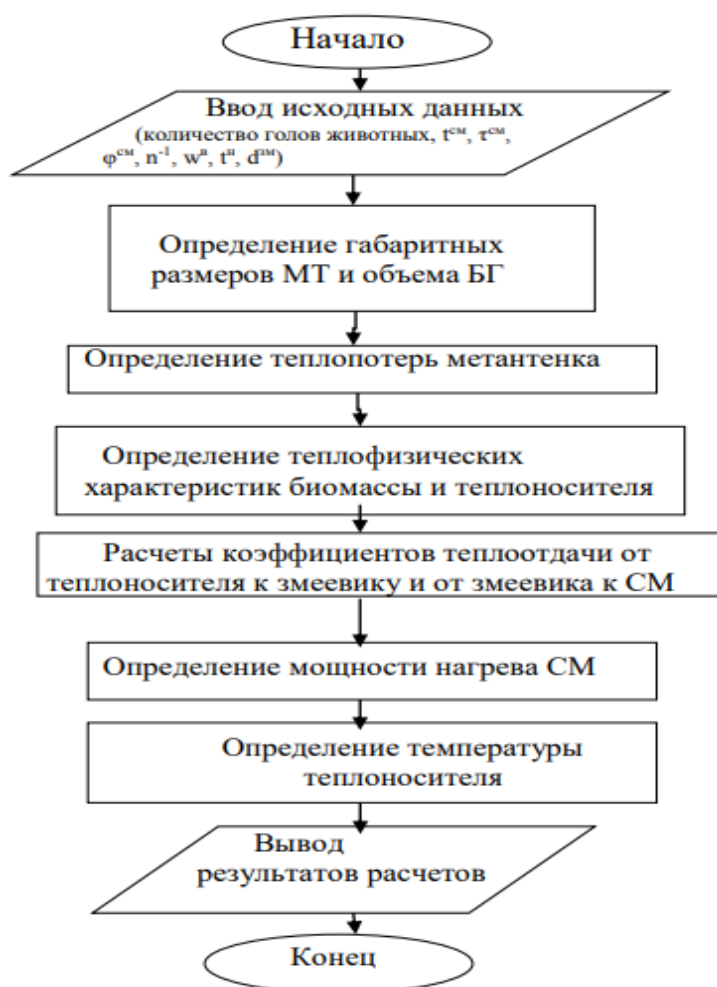


Рисунок 3.12 - Алгоритм программы расчета

Интерфейс программы «Метантенк» приведен на рисунке 3.13.

**Метантенк**

Исходные данные для расчета		Характеристика биогаза	
Количество голов животных	KРС: 100	Количество получаемого биогаза в сутки, м³/сутки	284,6
Свиньи		Количество получаемого биогаза за год, м³/год	105205,2
Куры		Содержание метана, %	51,8
Температура сбраживания (35-45°C)	40	Низшая теплота сгорания, МДж/м³	17,6
Длительность сбраживания, суток (5-20)	15	Габаритные размеры метантенка	
Плановая влажность сбраживаемой массы (85-97%)	90	Объем рабочей части МТ при тсб, Vр, м³	117,9
Время работы МТ в течении года (340-355 суток)	350	Рабочий внутренний диаметр МТ, D, мм	4886
Частота замены СМ в сутки	1	Общая высота цилиндрической части, Hцил, мм	5883
Скорость движения воды в ЗМ, м/с	1.5	Диаметр змеевика, мм	3490
Температура наружного воздуха, °C	-5.2		
Наружный диаметр трубы ЗМ, м	0.032		
Внутренний диаметр трубы ЗМ, м	0.028		

Тепловая мощность нагрева, Вт: 16734

Температура греющего теплоносителя в змеевике, °C: 65,8

Коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·град): 86,8

Расчет

Выход

Рисунок 3.13 - Интерфейс программы «Метантенк»

Программа «Метантенк» решает следующие задачи:

- позволяет рассчитать основные габаритные размеры МТ в зависимости от количества голов животных и технологических факторов, поддерживающихся в процессе сбраживания;
- определить количество и качество получаемого биогаза;
- определить количество теплоты необходимое для нагрева сбраживаемой массы и температуру греющего теплоносителя в зависимости от температуры окружающей среды и толщины отложений.

### 3.5 Выводы по третьему разделу

1. Проведенные экспериментальные исследования значений температуры греющего теплоносителя в зависимости от температуры окружающей среды и толщины отложений на ЗМ позволили получить статистические (регрессионные) модели, учитывающие влияние этих двух факторов.

2. Значения, полученные по экспериментально-статистической модели после переноса центра плана в другую точку факторного пространства, не выходят за рамки доверительного интервала. Поэтому, для определения температуры греющего теплоносителя принята экспериментально-статистическая модель после переноса центра плана.

3. Проведенный эксперимент показал, что повышение температуры греющего теплоносителя выше  $60^{\circ}\text{C}$  при наличии отложений не приводит к угнетению жизнедеятельности метаногенных бактерий, так как температура СМ не превышает  $42^{\circ}\text{C}$ .

4. Сравнение значений, полученных по формулам аналитической математической модели основных процессов тепломассообмена, происходящих в биогазовой установке, со значениями, посчитанными по статистической модели, имеют высокую сходимость, поэтому можно считать разработанную аналитическую математическую модель адекватной.

5. На основании аналитической модели основных процессов тепломассообмена, происходящих в биогазовой установке, разработаны методика и программа расчета «Метантенк», позволяющая определять конструктивные, технологические и теплотехнические параметры предложенного МТ с интенсификацией теплообмена.

6. Разработанные методики и программа расчета действительной температуры греющего теплоносителя в цикле сбраживания в зависимости от температуры окружающей среды и толщины отложений на греющем змеевике позволят регулировать подачу теплоты для биогазовых установок различных конструктивных исполнений МТ.

7. Необходимо выполнить технико-экономическое обоснование предложенной методики интенсификации теплообмена между греющим теплоносителем и сбраживаемой биомассой.

## РАЗДЕЛ 4

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАЗРАБОТАННОГО МТ И  
ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ АНАЭРОБНОЙ  
ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ БИОМАССЫ4.1 Экономическое обоснование разработанной интенсификации  
регулирования температуры греющего теплоносителя

С целью экономического обоснования предложенной интенсификации процессов теплообмена в МТ путем регулирования температуры греющего теплоносителя и обеспечения стабильного температурного режима был произведен сравнительный расчет двух вариантов. В соответствии с данными литературы [41,79,128] температура воды в ЗМ не должна превышать  $60^{\circ}\text{C}$ , чтобы не угнетать жизнедеятельность метаногенных бактерий. В то же время, температура воды на выходе не должна быть ниже температуры сбраживания. Поэтому для первого варианта анализа принят режим работы МТ без регулирования температуры теплоносителя: температура воды на входе в ЗМ  $t_{\text{вх}}=60^{\circ}\text{C}$ , на выходе из ЗМ  $t_{\text{вых}} = 40^{\circ}\text{C}$ . В варианте 2 температура греющего теплоносителя будет определяться по аналитической модели предложенной во втором разделе, в зависимости от температуры наружного воздуха и толщины отложений на ЗМ.

Для каждого варианта определялся расход получаемого биогаза, используемый на нужды биогазовой установки (для нагрева греющего теплоносителя), путем сжигания в теплогенераторе [129].

Расчет производился для фермерского хозяйства, расположенного в Амвросиевском районе, в котором имеется 100 голов КРС.

Исходными данными для расчета являются:

- количество голов КРС – 100;
- температура сбраживания:  $t_{\text{сб}}=40^{\circ}\text{C}$ ;
- длительность сбраживания: 15 суток;



- плановая влажность сбраживаемой массы 90%;
- время работы МТ в течении года 350 суток;
- частота замены СМ - 1 раз в сутки;
- габаритные размеры МТ:
  - объем рабочей части МТ при  $t_{сб}, V_p=117,9 \text{ м}^3$ ;
  - рабочий внутренний диаметр МТ,  $D=4,8 \text{ м}$ ;
  - общая высота цилиндрической части,  $H_{цил}=5,8 \text{ м}$ ;
  - диаметр мешалки  $d_m=1,4 \text{ м}$ ;
  - диаметр ЗМ  $d_{зм}=3,5 \text{ м}$ ;
  - площадь поверхности ЗМ  $F=19 \text{ м}^2$ ;
  - диаметры трубы ЗМ  $d_n=32 \text{ мм}$  и  $d_v=28 \text{ мм}$ .

Расчет производился для среднемесячной температуры наружного воздуха в соответствии с климатическими данными [130].

Результаты расчетов двух вариантов сведены в таблицы 4.1 и 4.2.

Таблица 4.1 - Вариант 1. Температура теплоносителя в ЗМ не регулируется

Месяц	Средне- месячная темпе- ратура наруж- ного воздуха, °C	Температура греющего теплоно- сителя на входе в ЗМ, °C	Средняя температура внутри МТ, °C	Суточный объем биогаза, м³/сутки	Месячный объем биогаза, м³/месяц	Тепловая мощность нагрева ЗМ, Дж/с	Количество сжигаемого биогаза, м³/месяц
январь	-5,2	60	35,9	241,18	7476,58	12949	2007,40
февраль	-4,4	60	36,3	246,5	6902	12949	2007,40
март	0,7	60	38,9	276,41	8568,71	12949	2007,40
апрель	9,4	60	43,3	279,59	8387,7	12949	2007,40
май	15,4	60	46,3	223,36	6924,16	12949	2007,40
июнь	19	60	48,1	151,8	4554	12949	2007,40
июль	21,2	60	49,2	82,3	2551,3	12949	2007,40
август	19,8	60	48,5	108,4	3360,4	12949	2007,40
сентябрь	14,9	60	46,1	220,25	6607,5	12949	2007,40
октябрь	8	60	42,6	285,39	8847,09	12949	2007,40
ноябрь	1,8	60	39,5	281,32	8439,6	12949	2007,40
декабрь	-2,9	60	37,1	256,83	7961,73	12949	2007,40
				Σ	80580,77		24088,9

Таблица 4.2 - Вариант 2. Температура теплоносителя в ЗМ регулируется в зависимости от толщины отложений на ЗМ и температуры наружного воздуха

Месяц	Средне- месячная темпе- ратура наруж- ного воздуха, °C	Температура греющего теплоно- сителя на входе в ЗМ, °C	Средняя температура внутри МТ, °C	Суточный объем биогаза, м³/сутки	Месячный объем биогаза, м³/месяц	Тепловая мощность нагрева ЗМ, Дж/с	Количество сжигаемого биогаза, м³/месяц
январь	-5,2	65,8	41,37	288,88	8955,28	16734	2594,2
февраль	-4,4	65,4	41,34	288,87	8088,36	16435	2547,8
март	0,7	62,4	41,19	288,76	8951,56	14530	2252,5
апрель	9,4	57,4	40,93	288,34	8650,2	11295	1751,0
май	15,4	54	40,75	287,87	8923,97	9071	1406,2
июнь	19	52	40,64	287,53	8625,9	7740	1199,9
июль	21,2	50,7	40,57	287,28	8905,68	6927	1073,9
август	19,8	51,5	40,61	287,42	8910,02	7444	1154,0
сентябрь	14,9	54,3	40,76	287,9	8637	9256	1434,9
октябрь	8	58,2	40,97	288,42	8941,02	11814	1831,5
ноябрь	1,8	61,8	41,16	288,73	8661,9	14120	2188,9
декабрь	-2,9	64,5	41,3	288,85	8954,35	15874	2460,8
				Σ	105205,2		21895,6

На рисунках 4.1 и 4.2 представлены графики средней температуры греющего теплоносителя и средней температуры внутри МТ в зависимости от месяца года.

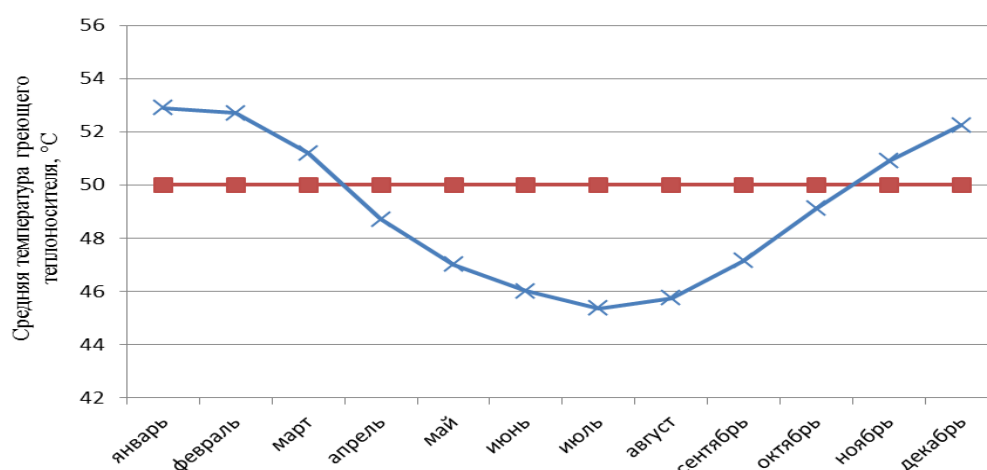


Рисунок 4.1 - Зависимость средней температуры греющего теплоносителя от месяца года:

- - без регулирования температуры теплоносителя;
- × - с регулированием температуры теплоносителя

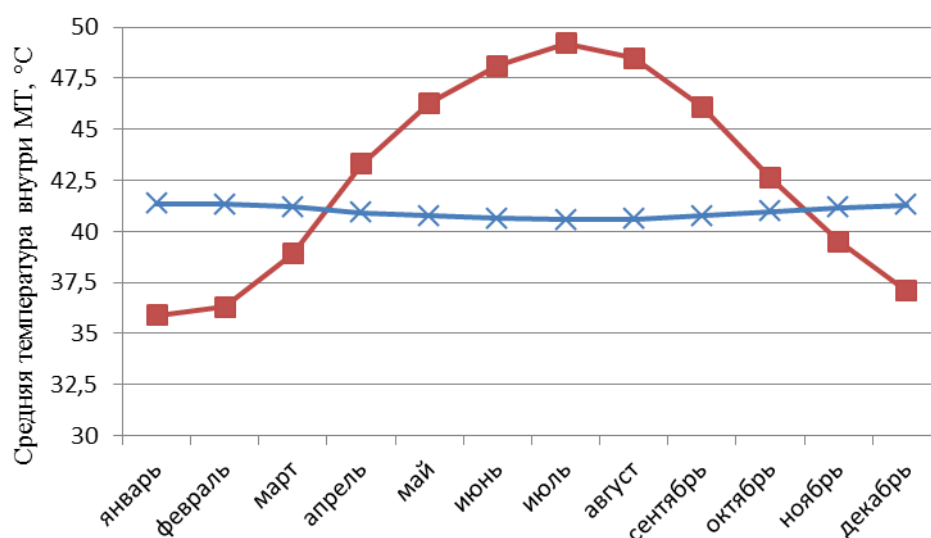


Рисунок 4.2 - Зависимость средней температуры внутри МТ от месяца года:

- - без регулирования температуры теплоносителя;
- × - с регулированием температуры теплоносителя

Из графика из рисунке 4.2 видно, что в варианте 2 изменение температуры в МТ колеблется на 1-2°C за весь год, что обеспечивает стабильно продуктивную жизнедеятельность метаногенных бактерий и, следовательно, стабильный выход биогаза. В варианте 1 наблюдается изменение средней температуры в МТ от 27 до 41°C за весь год. Данное изменение температуры сопровождается нестабильным объемом получаемого биогаза.

На рисунках 4.3 и 4.4 представлены графики соответственно среднесуточного объема получаемого биогаза и среднемесячного объема получаемого биогаза в зависимости от средней температуры в МТ на протяжении всего года.

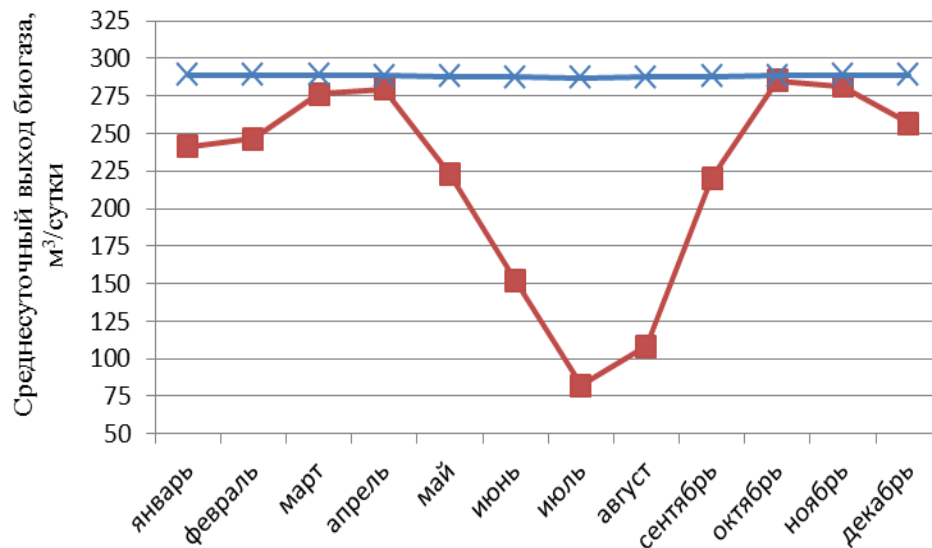


Рисунок 4.3 - Зависимость среднесуточного объема биогаза от месяца года:

- - без регулирования температуры теплоносителя;
- × - с регулированием температуры теплоносителя

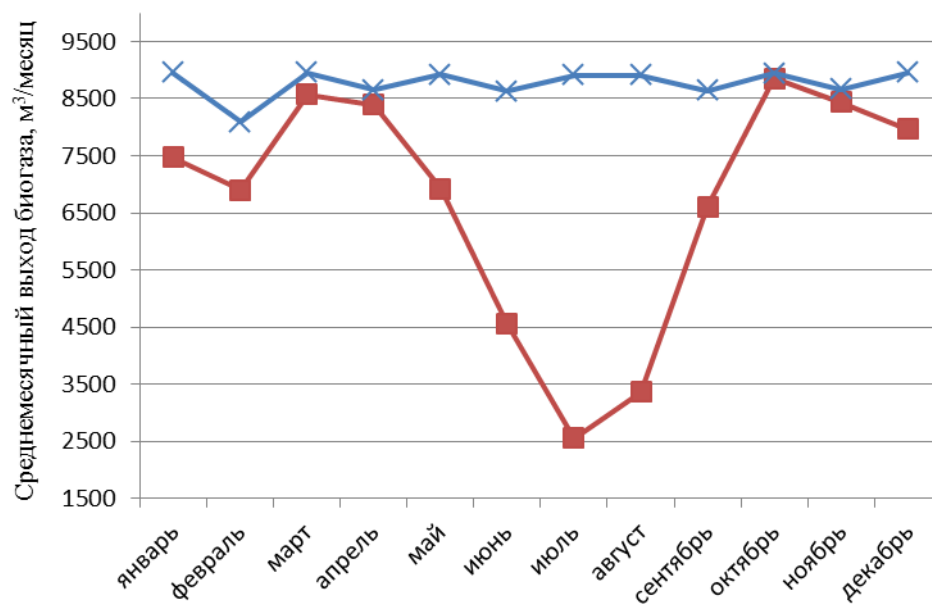


Рисунок 4.4 - Зависимость среднемесячного объема биогаза от месяца года:

- - без регулирования температуры теплоносителя;
- × - с регулированием температуры теплоносителя

Из графиков видно, что в предлагаемом варианте с регулированием температуры греющего теплоносителя обеспечивает стабильное образование биогаза в течении всего годового цикла эксплуатации.

На рисунке 4.5 представлен график тепловой мощности нагрева в зависимости от месяца года. В первом варианте постоянное поддержание температуры греющего теплоносителя в ЗМ сопровождается постоянной тепловой мощностью нагрева и составит 12,9 кВт. Регулирование температуры греющего теплоносителя во втором варианте приводит к увеличению тепловой мощности нагрева в осенне-весенний и зимний периоды года.

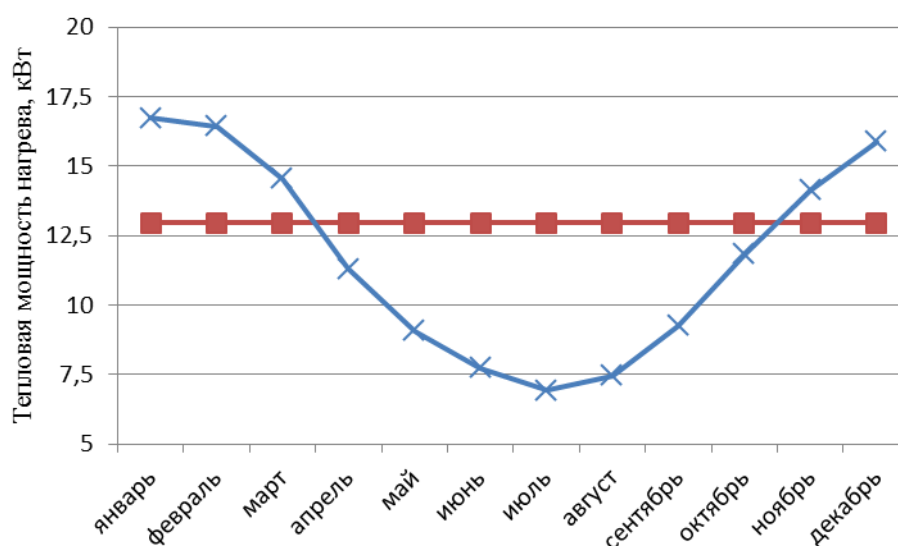


Рисунок 4.5 - Зависимость тепловой мощности нагрева от месяца года:

- - без регулирования температуры теплоносителя;
- × - с регулированием температуры теплоносителя

На рисунке 4.6 приведена зависимость среднемесячного расхода получаемого биогаза на нагрев теплоносителя.

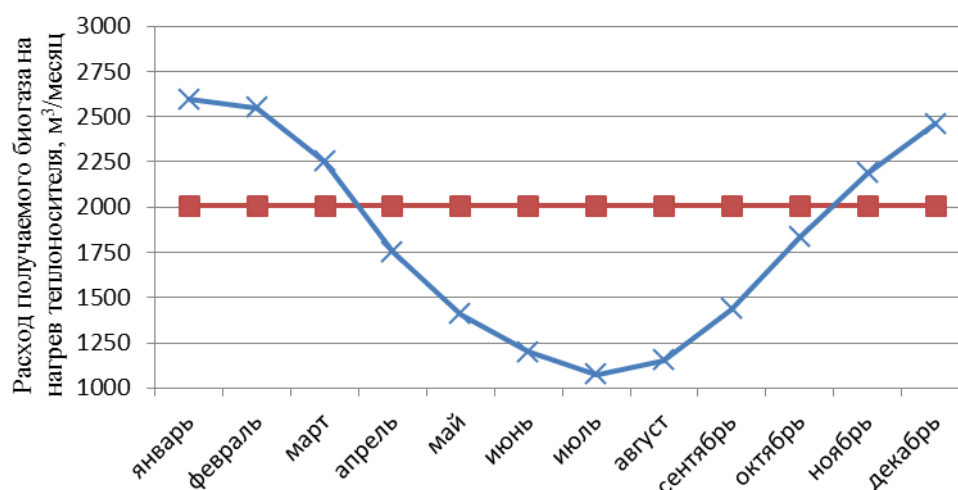


Рисунок 4.6 - Зависимость среднемесячного расхода получаемого биогаза на нагрев теплоносителя от месяца года:

- - без регулирования температуры теплоносителя;
- × - с регулированием температуры теплоносителя

Для получения теплоты на нагрев сбраживаемой массы в предложенном варианте с интенсификацией теплообмена, 21895,6 м³/год получаемого биогаза сжигается в котлоагрегате. Количество сжигаемого биогаза для получения теплоты определяется по формуле

$$V'_{БГ} = \frac{Q_{нагр}}{Q_{нБГ} \cdot \eta_k}, \text{ м}^3/\text{с},$$

где  $V'_{БГ}$  - расход биогаза сжигаемый в котлоагрегате, м³/с;

$Q_{нагр}$  — необходимая мощность нагрева, Вт;

$Q_{нБГ}$  — низшая теплота сгорания биогаза, Дж/м³;

$\eta_k$  — КПД котлоагрегата.

Для определения экономического эффекта от предлагаемой интенсификации греющего теплоносителя определена разница между годовым объемом получаемого биогаза и годовым расходом биогаза на выработку теплоты по двум вариантам.

Таким образом, товарный объем биогаза по каждому из вариантов составит:

- вариант без регулирования температуры теплоносителя

$$V_{БГ1}^T = V_{БГ} - V_{БГ1}' = 80580,77 - 24088,9 = 56491,9 \text{ м}^3/\text{год};$$

- вариант с регулированием температуры теплоносителя

$$V_{БГ2}^T = V_{БГ} - V_{БГ2}' = 105205,2 - 21895,6 = 83309,7 \text{ м}^3/\text{год}.$$

Разница между товарными объемами биогаза по двум вариантам составляет

$$V_{БГ}^T = V_{БГ2}^T - V_{БГ1}^T = 83309,7 - 56491,9 = 26817,7 \text{ м}^3/\text{год}.$$

Увеличение объема товарного биогаза по второму варианту составит

$$\frac{V_{БГ}^T}{V_{БГ2}^T} \cdot 100\% = \frac{26817,7}{83309,7} = 32,2\%.$$

Экономический эффект второго варианта с предлагаемым регулированием температуры теплоносителя составляет

$$V_{m.y.m} = V_{БГ2}^T \cdot \left( \frac{Q_{нБГ}}{29,3} \right) = 83309,7 \cdot \frac{17,6}{29,3} = 50042,7 \text{ т.у.т.}$$

Можно сделать вывод, что предложенный метод интенсификации температуры греющего теплоносителя увеличивает объем биогаза на 32,2% в год и составляет 83309,7 м<sup>3</sup>/год.

Получаемый БГ аккумулируется в газгольдере для выравнивания колебаний объема выхода биогаза. Предложенная методика регулирования температуры греющего теплоносителя позволяет добиться стабильности образования биогаза и еще на стадии проектирования биогазовой установки и определить необходимый объем газгольдера.

## 4.2 Технико-экономическая оценка применения метода регулирования температуры греющего теплоносителя

Экономическое обоснование применения предлагаемого метода регулирования температуры греющего теплоносителя заключается в определении экономического эффекта достигаемого в результате экономии получаемого биогаза, расходуемого на нужды биогазовой установки.

Для определения сметной стоимости строительства биогазовой установки были произведены расчеты локальной сметы на строительно-монтажные работы и сводного сметного расчета (Приложение В).

Сметы были составлены с использованием программного комплекса «Смета-Профи» в соответствии с действующей нормативной базой [131].

Годовые эксплуатационные затраты определялись по формуле

$$\mathcal{Z}_g = \mathcal{Z}_e + A_o + \mathcal{Z}_{TO}, \text{ руб.} \quad (4.1)$$

где  $\mathcal{Z}_e$  – годовые затраты на электроэнергию;

$A_o$  – амортизационные отчисления;

$\mathcal{Z}_{TO}$  – затраты на техническое обслуживание.

Годовые затраты на электроэнергию определяются по формуле

$$\mathcal{Z}_e = M_d \cdot t_c \cdot t_z \cdot T_n, \text{ руб.} \quad (4.2)$$

где  $M_d$  – мощность электродвигателей, кВт;

$t_c$  – время работы двигателя за сутки, ч;

$t_z$  – время работы двигателя в году, дни;

$T_n$  – тариф за потребляемую энергию, руб./кВт·ч.

1. Годовые затраты на электроэнергию насосов на загрузку и выгрузку биомассы

$$\mathcal{Z}_{e1} = 3,8 \cdot 1 \cdot 350 \cdot 2,63 = 3,498 \text{ тыс.руб.}$$



2. Годовые затраты на электроэнергию работы мешалки

$$Z_{\text{э}2} = 2,0 \cdot 4 \cdot 350 \cdot 2,63 = 7,364 \text{ тыс.руб.}$$

3. Годовые затраты на электроэнергию насоса подачи теплоносителя

$$Z_{\text{э}3} = 2,0 \cdot 15 \cdot 350 \cdot 2,63 = 1,132 \text{ тыс.руб.}$$

4. Годовые затраты на электроэнергию автоматики

$$Z_{\text{э}4} = 5,0 \cdot 24 \cdot 350 \cdot 2,63 = 110,46 \text{ тыс.руб.}$$

Суммарные годовые затраты на электроэнергию составят

$$Z_{\text{э}} = Z_{\text{э}1} + Z_{\text{э}2} + Z_{\text{э}3} + Z_{\text{э}4} = 3,498 + 7,364 + 1,132 + 110,46 = 122,454 \text{ тыс.руб.}$$

Годовые амортизационные отчисления, определяем по формуле

$$A_o = K \cdot \frac{1}{T}, \quad (4.3)$$

где  $K$  – капитальные вложения в строительную часть, тыс.руб;

$T$  – срок эксплуатации оборудования, лет.

$$A_o = 1209,266 \cdot \frac{1}{10} = 120,927 \text{ тыс.руб.}$$

Годовые затраты на техническое обслуживание составляют 8% от капитальных затрат определяем по формуле

$$\begin{aligned} Z_{\text{ТО}} &= 0,08 \cdot K; \\ Z_{\text{ТО}} &= 0,08 \cdot 1209,266 = 96,741 \text{ тыс.руб.} \end{aligned} \quad (4.4)$$

Себестоимость биогаза определяется по формуле

$$C = \frac{\mathcal{E}_3}{V_2}, \quad (4.5)$$

где  $\mathcal{E}_3$  – годовые эксплуатационные затраты;

$V_2$  – годовой объем выработанного биогаза.

Ежегодные затраты и себестоимость БГ сведены в таблицу 4.3.

Таблица 4.3 – Ежегодные затраты и себестоимость

Затраты	Годы эксплуатации				
	1	2	3	4	5
Затраты на электроэнергию	122,454	128,577	135,006	141,756	148,844
Амортизационные отчисления	120,927	120,927	120,927	120,927	120,927
Затраты на техническое обслуживание	96,741	101,578	106,657	111,990	117,589
Полная себестоимость	217,668	222,505	227,584	232,917	238,516
Годовой объем биогаза, м <sup>3</sup>	131600	131600	131600	131600	131600
Стоимость, руб/м <sup>3</sup>	1,65	1,69	1,73	1,77	1,81

Для приближения расчетов к реальным условиям производим ежегодное увеличение всех статей затрат на 5%, что позволяет частично компенсировать влияние инфляции.

Сравнивались годовые затраты на расходуемое топливо для нагрева теплоносителя по двум вариантам. Первый вариант предусматривает, что нагрев греющего теплоносителя осуществляется природным газом, а второй вариант – это нагрев теплоносителя получаемым биогазом. В предложенном методе регулирования температуры греющего теплоносителя для производства теплоты затрачивается 21895,6 м<sup>3</sup> биогаза в год, что эквивалентно 11010,4 м<sup>3</sup> природного газа. Тогда годовые затраты на топливо определяются по формуле

$$Z_m = P_m \cdot C_m, \quad (4.6)$$

где  $P_m$  – годовой расход топлива, м<sup>3</sup>;

$C_m$  – стоимость топлива, руб./м<sup>3</sup>.

В условиях нагрева теплоносителя природным газом годовые затраты равны

$$Z_{m1} = 11010,4 \cdot 7,29 = 80265,8 \text{ руб.}$$

Нагрев теплоносителя получаемым биогазом

$$Z_{m2} = 21895,6 \cdot 1,65 = 36127,7 \text{ руб.}$$

Экономический эффект использования биогаза для собственных нужд биогазовой установки определяем по формуле

$$\mathcal{E} = Z_{m1} - Z_{m2}, \quad (4.7)$$

где  $\mathcal{E}$  – экономический эффект от применения оптимального варианта;

$Z_{m1}, Z_{m2}$  – затраты на топливо по 1-му и 2-му вариантам.

$$\mathcal{E} = 80265,8 - 36127,7 = 44138,1 \text{ руб.}$$

Таким образом, нагрев греющего теплоносителя для метантенка получаемым биогазом в отличие от сжигания природного газа позволяет сэкономить 44138,1 руб. в год.

Оставшимся товарным биогазом в количестве 83309,7 м<sup>3</sup>/год возможно частичное замещение природного газа, расходуемого на нужды данного фермерского хозяйства, что эквивалентно 41892,8 м<sup>3</sup> природного газа.

Тогда при нагреве теплоносителя путем сжигания природного газа годовые затраты равны

$$Z_{m1} = 41892,8 \cdot 7,29 = 301628,2 \text{ руб.},$$

а при сжигании биогаза

$$Z_{m2} = 83309,7 \cdot 1,65 = 137461,0 \text{ руб.}$$

Экономический эффект использования биогаза для собственных нужд фермерского хозяйства определяем по формуле

$$Z_m = 301628,2 - 137461,0 = 164167,2 \text{ руб.}$$

Таким образом, нагрев греющего теплоносителя для нужд фермерского хозяйства получаемым биогазом в отличие от сжигания природного газа позволяет сэкономить 208,3053 руб. в год.

Срок окупаемости оборудования для производства биогаза потребляемого для технологических целей составит

$$CO = 1209,266 / (44,1381 + 164,167) = 5,8 \text{ лет.}$$

Был выполнен сравнительный анализ варианта с постоянной температурой греющего теплоносителя с предлагаемым вариантом регулирования температуры греющего теплоносителя. Количество сжигаемого биогаза на нагрев теплоносителя в варианте с постоянной температурой греющей воды составляет 24088,9 м<sup>3</sup>/месяц, а в варианте с регулированием температуры греющего теплоносителя 21895,6 м<sup>3</sup>/месяц.

Тогда при нагреве теплоносителя с постоянной температурой годовые затраты равны

$$Z_1 = 24088,9 \cdot 1,65 = 39746,7 \text{ руб.}$$

При регулировании температуры греющего теплоносителя годовые затраты равны

$$Z_1 = 21895,6 \cdot 1,65 = 36127,7 \text{ руб.}$$

Экономический эффект от применения метода регулирования температуры греющего теплоносителя составит

$$Z_m = 39746,7 - 36127,7 = 3619 \text{ руб/год.}$$

#### 4.3 Экологический расчет применения анаэробной технологии переработки биомассы

Как уже было отмечено в первом разделе, животноводство является источником выбросов парниковых газов в атмосферу. Системы уборки и хранения биомассы способствуют возникновению анаэробных условий и выделяют метан ( $\text{CH}_4$ ) и закись азота ( $\text{N}_2\text{O}$ ).

Для рассматриваемого фермерского хозяйства выполнен расчет выбросов  $\text{CH}_4$  и  $\text{N}_2\text{O}$  по методике, приведенной в работах [132, 133].

Эмиссия метана от систем хранения навоза определяется по формуле

$$M_{\text{CH}_4} = EF_{\text{CH}_4} \cdot n, \quad (4.8)$$

где  $M_{\text{CH}_4}$  – эмиссия метана от систем хранения навоза, кг  $\text{CH}_4$ /год;

$EF_{\text{CH}_4}$  – коэффициент эмиссии метана от навоза для сельскохозяйственных животных, (кг/(гол. год)). Принимается по [132] и равняется 4,6 кг  $\text{CH}_4$ /(гол. в год);

$n$  - количество животных в группе.

Оценка эмиссии  $\text{N}_2\text{O}$  при хранении и использовании навоза рассчитывается по следующей формуле

$$M_{\text{N}_2\text{O}} = N_{\text{ex}} \cdot EF_{\text{N}_2\text{O}} \cdot n, \quad (4.9)$$

где  $M_{\text{N}_2\text{O}}$  – эмиссия  $\text{N}_2\text{O}$  от систем хранения и использования отходов животных (кг /год);

$N_{\text{ex}}$  – поступление азота, содержащегося в навозе при данной системе хранения и использования отходов животных (кг  $\text{N}_2\text{O}$ /гол. в год). Принимается по [132] и составляет 89,64 кг  $\text{N}_2\text{O}$  /гол. в год;

$EF_{N_2O}$  – коэффициент эмиссии  $N_2O$  для различных систем хранения навоза (кг  $N_2O$  в год).

Коэффициент эмиссии  $N_2O$  жидкостной системы хранения отходов животных равен 0,001 [132, 133].

По формуле (4.8) определена эмиссия метана от систем хранения биомассы КРС на животноводческой ферме -  $M_{CH_4}=460$  кг/год. В пересчете на  $CO_2$ -эквивалент эмиссия метана составляет 9,66 тонн в год.

Эмиссия  $N_2O$  при хранении и использовании биомассы для рассматриваемой животноводческой фермы равна  $M_{N_2O}=8,96$  кг/год. В пересчете на  $CO_2$ -эквивалент это составляет 2,7 тонн в год.

Суммарный годовой выброс  $CH_4$  и  $N_2O$  в  $CO_2$ -эквиваленте от систем сбора и хранения биомассы для рассматриваемой фермы составляет 12,4 тонн  $CO_2$ -эквивалента.

Выполненный экологический расчет показал, что применение анаэробной технологии переработки биомассы с целью получения биогаза приводит к снижению выбросов  $CH_4$  и  $N_2O$  в атмосферу, тем самым уменьшая парниковый эффект.

#### 4.4 Выводы по четвертому разделу

1. Применение метода регулирования температуры греющего теплоносителя приводит к постоянному поддержанию температуры внутри МТ в течение всего года, что сопровождается равномерным газовыделением. Постоянный объем получаемого биогаза позволяет подобрать рациональный объём газгольдера.

2. Установлено, что при использовании метода регулирования температуры греющего теплоносителя выход товарного биогаза повышается на 32,2% для данного фермерского хозяйства.

3. Сжигание биогаза в теплогенерирующей установке для нагрева греющего теплоносителя, расходуемого на нужды фермерского хозяйства и биогазовой установки, позволит заменить 52903,2 м<sup>3</sup> природного газа, что приводит к экономическому эффекту 208,305 тыс. руб. в год. Срок окупаемости биогазовой установки с МТ предложенной конструкции составит 5,8 лет.

4. Проведенный расчет экологической эффективности применения анаэробной технологии переработки биомассы с целью получения биогаза доказывает, что применение такой технологии приводит к снижению выбросов CH<sub>4</sub> и N<sub>2</sub>O в атмосферу, тем самым уменьшая парниковый эффект.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена прикладная научно-техническая задача по интенсификации процессов тепломассообмена в биогазовой установке.

1. Проведенные аналитические исследования конструкций МТ и технологических параметров процесса сбраживания показали, что влияние отложений на поверхности греющего элемента и колебаний температуры наружного воздуха на интенсивность теплообмена в метантенке в настоящее время малоизучены.

2. Разработана математическая модель теплообменных процессов в метантенке биогазовой установки, позволяющая корректировать интенсивность теплообмена при изменении температуры наружного воздуха и образовании отложений на наружной поверхности греющего змеевика.

3. Разработана математическая модель процессов тепломассообмена в условиях отсутствия механического перемешивания сбраживаемой массы и барботаж выделяющегося биогаза.

4. Создана экспериментальная установка и проведены экспериментальные исследования влияния колебаний температуры наружного воздуха и толщины слоя отложений на стенке змеевика на интенсивность теплообмена в метантенке и температуру сбраживаемой массы. По результатам исследования получена экспериментально-статистическая математическая модель, позволяющая определять температуру греющего теплоносителя в зависимости от величины термического сопротивления отложений и теплотерь МТ в окружающую среду.

5. Разработано программное обеспечение для проектирования метантенков и расчета технологических карт подачи греющего теплоносителя при их эксплуатации. Разработанное программное обеспечение внедрено в процесс проектирования и расчета температурного



режима метантенков биогазовых установок с предложенной интенсификацией теплообмена между греющим теплоносителем и сбраживаемой массой в ООО «Альянс Строй» г. Рязани, РФ.

6. Расчет определения количества товарного биогаза для животноводческой фермы в Амвросиевском районе на 100 голов КРС показал, что предложенный метод регулирования температуры теплоносителя экономически выгоден в сравнении с вариантом без регулирования температуры теплоносителя. Увеличение выхода товарного биогаза составляет 32,2%. Экономический эффект от сжигания получаемого биогаза для производства теплоносителя, расходуемого на нужды фермерского хозяйства и биогазовой установки, в сравнении с природным газом составляет 208,305 тыс. руб. в год. Срок окупаемости биогазовой установки составляет 5,8 лет.

7. Экологический эффект от применения анаэробной технологии переработки биомассы для животноводческой фермы в Амвросиевском районе на 100 голов КРС составляет 12,4 тонн CO<sub>2</sub>-эквивалента в год.

## ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

МТ – метантенк;

ЗМ – змеевик;

БГ – биогаз;

БГУ – биогазовая установка;

СМ – сбраживаемая масса;

ОВ – органическое вещество;

КРС – крупный рогатый скот;

СВ – сухое вещество;

СОБ – станция очистки биогаза.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Эдер, Б. Биогазовые установки [Текст]: практическое пособие /Б. Эдер , Х. Шульц — Издано в 1996г. Перевод с нем. выполнен компанией Zorg Biogas в 2011г. Под научной редакцией И.А. Реддих. – 268 с.
2. Развитие биогазовых технологий в Украине и Германии: нормативно-правовое поле, состояние и перспективы Киев – Гюльцов: Специальное агентство по возобновляемым ресурсам (FNR), 2013. – 72 с.
3. Гриднев, П.И. Эмиссия парниковых газов и аммиака из навоза в процессе уборки и подготовки его к использованию [Текст] / П.И. Гриднев, Т.Т. Гриднева // Journal of VNIIMZH. – 2017. - №1(25). – С. 25-33.
4. Веденев, А.Г. Биогазовые технологии в Кыргызской Республике [Текст] / А.Г. Веденев, Т.А. Веденева, ОФ «Флюид». – Бишкек: Типография «Полиграфоформление», 2006. – 90 с.
5. Бойлс, Д. Биоэнергетика: технология, термодинамика, издержки [Текст] / Д. Бойлс; пер. с англ. М.Ф. Пушкарева; под ред. Е.А. Бирюковой. – М.: Агропромиздат, 1987. – 152 с.
6. Биомасса как источник энергии: пер. с англ. [Текст]/ Под ред. С. Соуфере, О. Заборски.- М.: Мир, 1985. – 368 с.
7. Ратушняк, Г.С. Інтенсифікація біоконверсії коливальним перемішуванням субстрату: монографія [Текст] / Г.С. Ратушняк. – Вінниця: Універсум-Вінниця, 2008. – 117 с.
8. Баадер, В. Биогаз: теория и практика [Текст] / В. Баадер, Е. Доне, М. Бренндерфе. Перевод с нем. и предисловие М.И. Серебряного. М.: Колос, 1982. – 148 с.
9. Environmentally Conscious Alternative Energy Production / под ред. Myer Kutz John Wiley & Sons, 2007. – 308 p.
10. Белых, Е.А. Особенности производства биогаза в Германии [Текст] / Белых Е.А. // Сборник научных трудов Всероссийского научно-

исследовательского института овцеводства и козоводства. – 2016. – Т.2, №9. – С. 106–109.

11. Друзьянова, В.П. Биогазовая технология за рубежом [Электронный ресурс] / В.П. Друзьянова, В.В. Горбунова // СтройМного. – 2016. - №4(5). Режим доступа:

<http://stroymnogo.com/science/tech/biogazovaya-tekhnologiya-za-rubezho/>

12. Куріс, Ю.В. Науково-технічні аспекти світового раціонального використання біогазів [Текст] / Ю.В. Куріс, Н.В. Семененко // Енергетика и электрификация. – 2011. – № 3. – С. 40–50.

13. Гелетуха, Г.Г. Современные технологии анаэробного сбраживания биомассы (Обзор) [Текст] / Г.Г. Гелетуха., С.Г. Кобзарь // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2002. – №4. – С. 3–9.

14. Achinas, S. A technological overview of biogas production from biowaste [Текст] / S. Achinas, V. Achinas, G. j W. Euverink // Engineering. - 2017. – №3(3), – p. 299–307.

15. Мазур, К.В. Розвиток альтернативної енергетики в АПК [Текст] / К.В. Мазур // Збірник наукових праць ВНАУ. Серія: Економічні науки. – 2012. - Т.2, №12. – С. 181–186.

16. Матвеев, Ю. Біогазова станція: український досвід [Текст] / Ю. Матвеев, Г. Гелетуха // Зелена енергетика. – 2004. – №1(13). – С. 4–6.

17. Гелетуха, Г. «Підготовка та впровадження проектів заміщення природного газу біомасою при виробництві теплової енергії в Україні»: практичний посібник [Текст] / Г. Гелетуха. – К.: «Поліграф плюс», 2015. – 72 с.

18. Клепикова, С. Альтернативная утилизация. [Электронный ресурс] / С. Клепикова // Агротехника и технологии. – 2013. – Режим доступа: <https://www.agroinvestor.ru/technologies/article/15078-alternativnaya-utilizatsiya/>

19. Батлущая, И.В. Влияние целлюлозоразрушающих ферментов на активность метанообразующих бактерий в условиях лабораторной

биогазовой установки АО «Белгородский институт альтернативной энергетики» на субстрате действующей биогазовой станции «Лучки» ООО «АльтЭнерго» [Текст] / И.В. Батлуцкая, В.П. Бредихин, И.К. Мейлах и др. // Научные ведомости БелГУ: Естественные науки. – 2016. – Вып. 37, №25 (246). – С.56–62.

20. Мейлах, И.К. Опыт эксплуатации и увеличения мощности первой в России промышленной БГС. Выгода от переработки отходов посредством брожения на биогазовой станции [Текст] / И.К. Мейлах // Инновационная Россия, 2015. - №12(206). – С. 66–69.

21. Гудкова, Е.А. Зарубежный опыт использования возобновляемых источников энергии как основа повышения энергоэффективности российских регионов [Текст] / Е.А. Гудкова, Л.Н. Чернышов // Вестник МГСУ. – 2010. – № 4. – С. 84 – 91.

22. Караева, Ю.В. Обзор биогазовых технологий и методов интенсификации процессов анаэробного сбраживания [Текст] / Ю.В. Караева, И.А. Трахунова // Труды Академэнерго. – 2010. – №3. – С. 109–127.

23. Васильев, Р.Г. Биотопливо: биодизель, биоэтанол, биогаз. Перспективы развития производства биотоплива в России. Сообщение 3: биогаз [Текст] // Вестник биотехнологии и физико-химической биологии им. Ю.А. Овчинникова. – 2007. – Т. 3, № 3. – С. 54–61.

24. Прокопенко, А.А. Аспекты экономического расходования ресурсов на примере применяемых биогазовых установок [Текст] / А. А. Прокопенко, А. В. Козлов, Г. Н. Мартыненко // Градостроительство. Инфраструктура. Коммуникации. – 2016. – №1(1). – С. 9–15.

25. Виноградова, А.В. Биотехнология топлива: учебное пособие [Текст] / А.В. Виноградова, Г.А. Козлова, Л.В. Аникина. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. – 212 с.

26. Караева, Ю.В. Использование биомассы в энергообеспечении агропромышленного комплекса республики Татарстан [Текст] /

Ю.В. Караева, Ю.Г. Назмеев // Альтернативная энергетика и экология. – 2007. – №3. – С. 126–133.

27. Lehner, A. Optimierung der Verfahrenstechnik landwirtschaftlicher Biogasanlagen [Электронный ресурс] / A. Lehner, M. Effenberger, A. Gronauer. - Bayern: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, 2010. – 82 p. – Режим доступа: [www.LfL.bayern.de](http://www.LfL.bayern.de).

28. Mandy Gerber An analysis of available mathematical models of anaerobic digestion of organic substances for production of biogas [Текст] / Mandy Gerber, Roland Span // International Gas Union Research Conference Paris, 2008. – p. 30.

29. Anaerobic Digestion Process of Food Waste for Biogas Production: A Simulation Approach [Текст] / Noorlisa Harun, Zuraini Hassan, Norazwina Zainol, Wan Hanisah, Wan Ibrahim, Haslenda Hashim // Chemical Engineering and Industrial. – 2019. – V.42, №9. – p. 1834–1839.

30. Волова, Т.Г. Биотехнология [Текст] / Т.Г. Волова. – Новосибирск: Сибирского отделения Российской Академии наук, 1999. – 252 с.

31. Дубровский, В.С. Метановое сбраживание сельскохозяйственных отходов [Текст] / В.С. Дубровский, У.Э. Виестур. – Рига: Зинатне, 1988. – 204 с.

32. Комина, Г.П. Получение и использование биогаза в решении задач энергосбережения и экологической безопасности: учебное пособие [Электронный ресурс] / Г.П. Комина, А.В. Сауц. – СПб.: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. – 2017. – 96 с. – Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/80737.html>.

33. Добрынина, О.М. Технологические аспекты получения биогаза [Текст] / О.М. Добрынина, Е.В. Калинина // Охрана окружающей среды, транспорт, безопасность жизнедеятельности. – 2010. – № 2. – С. 33 – 40.

34. Форстер, К.Ф. Экологическая биотехнология [Текст] / К.Ф. Форстер Д.А, Дж. Вейза. – Л: Химия, Ленинградское отделение, 1990. – 384 с.

35. Майстренко, А.О. Общая характеристика метагенеза и обоснование технологических схем получения биогаза [Текст] / А.Ю. Майстренко, Ю.В. Курис, В.В. Ярмош и др. // Энергетика и электрификации. – 2009. – № 3. – С. 52–59.
36. Ножевникова, А.Н. Биотехнология и микробиология анаэробной переработки органических коммунальных отходов [Текст]: коллективная монография / общая ред. и составл. А.Н. Ножевниковой, А.Ю. Каллистова, Ю.В. Литти, М.В. Кевбрина. – М.: Университетская книга, 2016. – 320 с.
37. Прокопенко, А.А. Физические и био-химические процессы при переработке мусора [Текст] / А. А. Прокопенко, А. В. Козлов, Г. Н. Мартыненко // Градостроительство. Инфраструктура. Коммуникации. – 2016. – №2(3). – С. 34–39.
38. Суслов, Д.Ю. Интенсификация процесса получения биогаза барботажным перемешиванием субстрата: монография [Электронный ресурс] / Суслов Д.Ю. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2016. – 95 с. – Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/80463.html>.
39. Кущев, Л.А. Математическое моделирование процесса получения биогаза при переработке органических отходов [Текст] / Л.А. Кущев, Д.Ю. Суслов, А.И. Алифанов, Н.Ю. Никулин // Энерго- и ресурсосбережение. Переработка отходов. – 2011. - №3. – С. 81 – 84.
40. Олексюк, А.О. Енергосбереження при використанні нетрадиційних джерел. Навчальний посібник для студентів економічних спеціальностей в галузі теплогазопостачання та вентиляції [Текст] / А.О. Олексюк, В.А. Сербін, Н.Ф. Радько. – Донецьк: Держжитлокомунгоспу України, 2004. – 156 с.
41. Ратушняк, Г.С. Енергозбереження в системах біоконверсії. Начальний посібник. [Текст] / Г.С. Ратушняк. – Вінниця: ВНТУ, 2006. – 83 с.

42. Ратушняк, Г.С. Біогазові установки з відновлюваними джерелами енергії термо-стабілізації процесу ферментації біомаси [Текст] / Г.С. Ратушняк, О. Г. Лялюк, І. А. Кошечев. – Вінниця: ВНТУ, 2017. – 110 с.
43. Трахунова, И.А. Повышение эффективности анаэробной переработки органических отходов в метантенке с гидравлическим перемешиванием на основе численного эксперимента: дис. канд. тех. наук : 05.20.01 / Трахунова Ирина Александровна. – Казань, 2014. – 121 с.
44. Лизунов, Н.Ю. Теплотери и тепловая изоляция метантенка мобильного биогазового комплекса в климатических условиях Казахстана [Текст] / Н.Ю. Лизунов // Известия ПГУПС. Современные технологии – транспорту. – 2014. - № 1. – С. 11–16.
45. Курис, Ю.В. Описание расчета потерь теплоты биогазовой установки [Текст] / Ю.В. Курис, С.И. Ткаченко // Энергетика та електрифікація. – 2008. – № 9. – С. 51–54.
46. Васенев, В.В. Тепловой баланс метантенка биогазовой установки [Текст] / В.В. Васенев, Ю.П. Ильин, Г.А. Круглов // АПК России. – 2015. – Т. 72, №2. – С. 29–33.
47. Зарыкбаева, К.С. Определение энергетической эффективности метантенка биогазовой установки [Текст] / К.С. Зарыкбаева, О.А. Степанова, М.В. Ермоленко, А.Д. Золотов // Молодой ученый. – 2014. – №6(65). – С. 161–164.
48. Исламова, С.И. Исследование тепловой эффективности процесса анаэробной ферментации органических ТБО [Текст] / С.И. Исламова // Энергетика: Эффективность, надежность, безопасность: материалы трудов XIX Всероссийской научно-технической конференции (Томск, 4-6 декабря 2013г.). – Томск: ООО «Скан». – 2013 – Т. II. – С. 296–299.
49. Ковалев, А.А. Материальный и тепловой баланс биогазовой установки с применением газификации смеси твердой фракции навоза с растительными отходами [Текст] / А.А. Ковалев, Д.А. Ковалев // Инновации в сельском хозяйстве. – 2014. – №3(8). – С. 190–194.



50. Семененко, И.В. Оборудование и процессы метанового сбраживания органических отходов: монография [Текст] / И.В. Семененко, М.Г. Зинченко. – Х.: НТУ «ХПИ», 2012. – 272 с.
51. Fleming J.G. Novel simulation of anaerobic digestion using computational fluid dynamics [Текст] / J.G. Fleming // Department of Mechanical Engineering North Carolina State University. – 2002.
52. Ковалев, А.А. Повышение энергетической эффективности биогазовых установок: дис. ... канд. тех. наук: 05.20.01 / Ковалев Андрей Александрович. М., 2014. – 120 с.
53. Гюнтер, Л.И. Метантенки [Текст] / Л.И. Гюнтер, Л.Л. Гольдфарб. – М.: Стройиздат, 1991. – 128 с.
54. Калюжный, С.В. Биогаз: проблемы и решения [Текст] / С.В. Калюжный, А.Г. Пузанков, С.Д. Варфаламеев // Биотехнология (Итоги науки и техники ВИНТИ АН СССР). – 1988. - № 21. – С. 1–189.
55. Ратушняк, Г.С. Енергозберігаючі відновлювальні джерела теплопостачання: навчальний посібник [Текст] / Г.С. Ратушняк, В.В. Джеджула, К.В. Анохіна. – Вінниця: ВНТУ, 2010. – 170 с.
56. Воронова, Ю.В. Учебное пособие для студентов заочного отделения факультета «Водоснабжение и водоотведение»: учеб. пособие [Текст] // Ю.В. Воронова, А.Л. Ивчатов. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2008. – 488 с.
57. Эль, М.А. Наладка и эксплуатация очистных сооружений городской канализации, Технология очистки сточных вод [Текст]: учебное пособие. / М.А. Эль, А.П. Карманов, И.Н. Полина. – М.: Инфра-Инженерия, 2018. – 212 с.
58. Янко, В.Г. Обработка сточных вод и осадка в метантенках [Текст] / В.Г. Янко, Ю.Г. Янко. – Киев: «Будівельник», 1978. – 120 с.
59. Ратушняк, Г.С. Моделювання теплового режиму на початковій фазі бродіння в біогазовій установці з пропелерною мішалкою [Текст] /

Г.С. Ратушняк, К.В. Анохіна // Вісник Хмельницького національного університету. – 2010. – №4. – С.19–22.

60. Кудряшова, А.Г. Обоснование и разработка средств повышения энергоэффективности работы трехстадийного метантенка: дис. ... канд. тех. наук.: 05.20.02 / Кудряшова Анастасия Геннадьевна. - Ижевск, 2011. – 120 с.

61. Вохмин, В.С. Разработка энергосберегающей электротехнологии сбраживания навоза с использованием индукционного нагрева: автореф. дисс. ...канд. тех. наук: 05.20.02 / Вохмин Вячеслав Сергеевич. - Ижевск, 2011. – 20 с.

62. Жучков, А.В. Математическое моделирование тепло-и массообменных процессов в реакторе анаэробного сбраживания [Текст] / А.В. Жучков, И.Е. Шабанов, А.А. Чернецкая, Ю.Н. Смолко // Вестник ВГУИТ. – 2013. – №4 – С. 50–55.

63. Землянкина, А.А. Математическая модель гидродинамики и теплообмена в цилиндрическом ферментаторе биогазовой установки с погружным в его цилиндрическим теплообменником [Текст] / А.А. Землянкина // Вопросы химии и химической технологии. – 2004. – №1. – С. 181–187.

64. Ковалев А.А. Повышение энергетической эффективности биогазовых установок: дис. ... канд. тех. наук: 05.20.01 / Ковалев Андрей Александрович. М., 2014. – 120 с.

65. Богданов, П.В. Система подогрева жидкого свиного навоза в технологиях анаэробного сбраживания: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.20.01 /Богданов Павел Викторович. М., 1990. – 18 с.

66. Вачагина, Е.К. Математическая модель теплообмена в системе поддержания температурного режима в реакторе метанового брожения [Текст] / Е.К. Вачагина, Г.Р. Халитова, Ю.В. Караева, И.А. Трахунова // Вестник Казанского технологического университета. – 2012. - №19. – С. 33–36.

67. Суслов, Д.Ю. Получение биогаза в биореакторе с барботажным перемешиванием: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08 / Суслов Денис Юрьевич. – Иваново, 2013. – 16 с.
68. Ратушняк, Г.С. Інтенсифікація теплообміну та термостабілізація біореакторів [Текст] / Г.С. Ратушняк, В.В. Джеджула // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2006. – №2. – С. 26–30.
69. Ратушняк, Г.С. Тепловтрати в біогазових установках при різних температурних режимах анаеробного бродіння [Текст] / Г.С. Ратушняк, К.В. Анохіна // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2008. – №5. – С. 20–24.
70. Марунчак, Р. Альтернативне паливо для села [про переваги виробництва і використання у сільському господарстві біопалива, біогазу тощо] [Текст] / Р. Марунчак // Екоінформ. - 2011. – № 10. – С. 8–10.
71. Шеръязов, С.К. Пути повышения эффективности биогазовой установки [Текст] / С.К. Шеръязов, В.В. Васенев, Ж.Б. Телюбаев // Инновации в сельском хозяйстве. – 2018. – №3(28). – С. 238–252.
72. Liebetrau, J. Messmethodensammlung Biogas: Methoden zur Bestimmung von analytischen und prozessbeschreibenden Parametern im Biogasbereich [Текст] / J. Liebetrau, D. Pfeiffer, D. Thrän. – Leipzig: DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH, 2015. – p. 212.
73. Karakashev, D. Influence of environmental conditions on methanogenic compositions in anaerobic biogas reactors [Текст] / D. Karakashev, D.J. Bastone, I. Angelidaki // Appl Environ Microbiol. – 2005. – №71(1). – p. 331–338.
74. B. Wu Three-dimensional numerical simulation model of biogas production for anaerobic digesters [Текст] / B. Wu, E.L. Bibeau, K.G. Gebremedhin. // Canadian biosystems engineering. – 2009. – №51. – p. 8.1–8.7
75. Ferrer, I. Increasing biogas production by thermal (70 °C) sludge pre-treatment prior to thermophilic anaerobic digestion [Текст] / I. Ferrera, S. Ponsa,

F. Vazquez, X. Font // Biochemical Engineering Journal. – 2008. – №42. – p. 186–192.

76. Chen, Y.R. Energy requirements for anaerobic fermentation of livestock wastes [Текст] / Y.R. Chen, A.G. Hashimoto // Livestock waste: a renewable source; proceedings, 4th International Symposium on Livestock Wastes. Livestock Waste. – 1980, p. 117–121.

77. Zábranská, M. Thermophilic process and ~ enhancement of excess activated sludge degradability—two ways of intensification sludge treatment in Prague Central Wastewater Treatment Plant [Текст] / J. Zábranská, M. Dohányos, P. Jeníček, J. Kutil // Water Sci. Technol. – 2000. – №41. – p. 265–272,

78. Teleszewski, T.J. Analysis of Heat Loss of a Biogas Anaerobic Digester in Weather Conditions in Poland [Текст] / T.J. Teleszewski, M. Żukowski // Journal of Ecological Engineering. – 2018. – №19. – p. 242–250.

79. Rynkowski, P. Heat loss analysis in the semi-buried anaerobic digester in Northeast Poland [Электронный ресурс] / P. Rynkowski // 10<sup>th</sup> Conference on Interdisciplinary Problems in Environmental Protection and Engineering EKO-DOK. – 2018. – №44. – Режим доступа:

<https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184400156>

80. Gebremedhin, K. G. Heat transfer model for plug-flow anaerobic digesters [Текст] / K. G. Gebremedhin, B. Wu, C. Gooch, P. Wright, S. Inglis // American Society of Agricultural Engineers. – 2005. – №48(2). – p. 777–785.

81. Lindorfer, H. Self-heating of anaerobic digesters using energy crops [Текст] / H. Lindorfer, R. Kirchmayr, R. Braun // Water Sci Technol. – 2006. – №53(8). – p. 159–166.

82. Васильцов, Э.А. Аппараты для перемешивания жидких сред. Справочное пособие [Текст] / Э.А. Васильцов, В.Г. Ушаков. – Л.: Машиностроение, 1979. – 272 с.

83. Стренк, Ф. Перемешивание и аппараты с мешалками [Текст]: пер. с англ. / Ф. Стренк. – Л.: Химия, 1975. – 384 с.

84. Колосова, Н.В. Патент на полезную модель №90880 Украина, F24H 4/00. Біогазова установка з системою утилізації тепла [Текст] / Н.В. Колосова, С.И. Монах, Д.В. Выборнов; заявл. 27.01.2014; опубл. 10.06.2014, бюл. № 11.
85. Друзьянова, В.П. Энергосберегающая технология переработки навоза крупного рогатого скота: дис. ... д-ра техн. наук: 05.20.01 / Друзьянова Варвара Петровна. – Улан – Удэ, 2017. – 281 с.
86. Кутателадзе, С.С. Теплопередача и гидравлические сопротивления. Справочное пособие [Текст] / С.С. Кутателадзе. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 367 с.
87. Недопекин, Ф.В. Тепломассоперенос: учебное пособие [Текст] / Ф.В. Недопекин – Донецк: ДонНУ, 2007. - 174 с.
88. Михеев, М.А. Основы теплопередачи [Текст] / М.А. Михеев, И.М. Михеева. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.
89. Григорьев, В.В. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент. Справочник [Текст] / В.В. Григорьев, В.М. Зорин. – М.: Энергоиздат, 1982. – 512 с.
90. Бронштейн, И.Н. Справочник по математике: для инженеров и учащихся вузов [Текст] / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. – М.: Гос. узд. технико- теоретик. лит., 1956 – 608 с.
91. Лыков, А.В. Тепломассообмен. Справочник [Текст] / А.В Лыков. – М.: Энергия, 1971. – 560 с.
92. Луканин В.Н. Теплотехника: учебн. для вузов [Текст] / В.Н. Луканин и др. – М.: Высш. шк., 1999. – 671 с.
93. Недопекин, Ф.В. Процессы переноса импульса, энергии и массы в сплошных средах / Ф.В. Недопекин – Донецк: ДонНУ, 2013. - 462 с.
94. Краснощеков, Е.А. Задачник по теплопередаче [Текст] / Е.А. Краснощеков, А.С. Сукомел. – М.: Энергия, 1980. – 288 с.
95. Остапенко, Д.В Тепловые процессы в метантенке при сбраживании биомассы [Текст] / Д.В. Остапенко, О.В. Чеботарева, В.А. Сербин //

Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2007. – 6/5(30). – С. 18–20.

96. Димніч, А.Х. Теплотехніка. Навчальний посібник [Текст] / А.Х. Димніч, О.А. Троянський. – Донецьк, Норд-прес, 2004. – 370 с.

97. Колосова, Н.В. Влияние толщины отложений на змеевике метантенка на интенсивность теплоотдачи к сбраживаемой биомассе [Текст] / Н.В. Колосова, С.И. Монах // Энергетические системы: сб. трудов II Междунар. науч.-техн. конф. БГТУ им В.Г. Шухова. – Белгород: БГТУ, - 2017. - С 50-53.

98. Штербачек, З. Перемешивание в химической промышленности [Текст]: перевод с чешского / З. Штербачек, П. Тауск. – Л.: Ленинградское отделение Госхимиздата, 1963. – 416 с.

99. Брагинский, Л.Н Перемешивание в жидких средах [Текст] / Л.Н. Брагинский, В.И. Бегачев, В.М. Барабаш. – Л.: Химия, 1984. – 336 с.

100. Остапенко, Д.В. Анализ гидродинамики сбраживаемой массы при перемешивании в метантенке [Текст] / Д.В. Остапенко, В.А. Сербин // Вісник ДонНАБА. Збірник наукових праць. Інженерні системи та техногенна безпека у будівництві. –2006.– Вип. 2006-2(58). – С. 24–27.

101. Кутепов, А.М. Гидродинамика и теплообмен при парообразовании: учебное пособие для вузов . – 3-е изд., искр. [Текст] / А.М. Кутепов, Л.С. Стерман, Н.Г. Стюшин. – М.: Высш. шк., 1986. – 448 с.

102. Меджибожский, М.Я. Основы термодинаміки и кинетики плавильных процессов: учебн. пособие для вузов [Текст] / М.Я. Меджибожский. – Киев-Донецк: Вища школа, Главное издательство, 1979. – 280 с.

103. Бакластов, А.М. Помышленные тепломассообменные процессы и установки: Учебник для вузов [Текст] / А.М. Бакластов, В.А. Горбенко, О.Л. Данилов и др. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 328 с.

104. Делайе, Дж. Теплообмен и гидродинамика двухфазных потоков в атомной и тепловой энергетике [Текст]: пер. с англ. / Дж. Делайе, М. Гио, М. Ритмюллер. – М.: Энергоиздат, 1984. – 424с.

105. Новиков, И.И. Теория подобия в термодинамике и теплопередаче [Текст] / И.И. Новиков, В.М. Боришанский. – М.: Атомиздат, 1979. – 184 с.

106. Костромин, Д.В. Анаэробная переработка органических отходов животноводства в биореакторе с барботажным перемешиванием: автореф. дисс. ...канд. тех. наук: 05.20.01 / Костромин Денис Владимирович. – Йошкар-Ола, 2010. – 17 с.

107. Соколов, В.Н. Газожидкостные реакторы [Текст] / В.Н. Соколов, И.В. Доманский. / Газожидкостные реакторы. – Л.: Машиностроение, 1976. – 216 с.

108. Броунштейн, Б.И. Гидродинамика, массо- и теплообмен в колонных аппаратах [Текст] / Б.И. Броунштейн, В.В. Щеголев. – Л.: Химия, 1988. – 336 с.

109. Явойский, В.И. Теория продувки сталеплавильной ванны [Текст] / В.И. Явойский, Г.А. Дорофеев, И.Л. Повх. – М.: Metallurgy, 1974. – 496 с.

110. Гельперин, Н.И. Основные процессы и аппараты химической технологии. В двух книгах. [Текст] / Н.И. Гельперин. – М.: Химия, 1981 – 812 с.

111. Дытнерский, Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии: Учебник для вузов. Изд. 2-е. В 2-х кн. Часть 2. Массообменные процессы и аппараты. [Текст] / Ю.И. Дытнерский. – М.: Химия, 1995 – 368 с.

112. Айнштейн, В.Г. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии [Текст] / В.Г. Айнштейн, М.К. Захаров, Г.А. Носов и др.. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2014. – 1758 с.

113. Гухман, А.А. Введение в теорию подобия: учеб. пособие для вузов. Изд. 2-е доп. и перераб. [Текст] / А.А. Гухман. - М.: Высшая школа, 1973. – 328 с.

114. Еронько, С.П. Физическое моделирование процессов внепечной обработки и разлива стали [Текст] / С.П. Еронько, С.В. Быковских. – К.: Техника, 1998 – 136 с.
115. Веников, В.А. Теория подобия и моделирования [Текст]: учеб. пособие для вузов. Изд. 2-е доп. и перераб. / В.А. Веников. – М.: Высшая школа, 1976. – 479 с.
116. Седов, Л.И. Методы подобия и размерности в механике [Текст]. 9-е изд., перераб. / Л.И. Седов. – М.: Наука (Главная редакция физико-математической литературы), 1981. – 448 с.
117. Адлер, Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий [Текст] / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 279 с.
118. Новицкий, П.В. Оценка погрешностей результатов измерений [Текст] / П.В. Новицкий, И.А. Зограф. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 248 с.
119. Спиридонов, А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов [Текст] / А.А. Спиридонов. – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.
120. Барабашук, В.И. Планирование эксперимента в технике [Текст] / В.И. Барабашук, Б.П. Креденцер, В.И. Мирошниченко. – К.: Техника, 1984. – 200 с.
121. Реброва, И.А. Планирование эксперимента: учебное пособие [Текст] / И.А. Реброва. – Омск: СиБАДИ, 2010. – 105 с.
122. Кононюк, А.Е. Основы научных исследований (общая теория эксперимента) В 4-х кн. - К.2. [Текст] / А.Е. Кононюк. – К.: 2011. – 452 с.
123. Налимов, В. В. Планирование эксперимента [Текст] / В.В. Налимов. – М.: Наука, 1971. – 208 с.
124. Хартман, К. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов [Текст] / К. Хартман, Э. Лецкий, В. Шефер. – М.: Мир, 1977. – 552с.



125. Сидняев, Н.И. Введение в теорию планирования эксперимента: учебное пособие [Текст] / Н.И. Сидняев, Н.Т. Вилисова. – М. Из-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – 463 с.
126. Румшицкий, Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента [Текст] / Л.З. Румшицкий. – М.: Наука, 1971. – 192 с.
127. Абомелик, Т.П. Методология планирования эксперимента: сборник лабораторных работ [Текст] / Т.П. Абомелик. – Ульяновск: УлГТУ, 2006. – 36 с.
128. Fleming J.G. Novel simulation of anaerobic digestion using computational fluid dynamics [Текст] / J.G. Fleming // Department of Mechanical Engineering North Carolina State University. – 2002.
129. Седнин, В.А. Повышение энергетического потенциала биогаза [Текст] / В.А. Седнин, О.Ф. Краецкая, И.Н. Прокопеня // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2012. - №1. – С.73-76.
130. ДСТУ – Н Б В. 1.1 – 27:2010. Будівельна кліматологія [Текст]. – К.: Міністерство регіонального розвитку та будівництва України. 2010.
131. ДСТУ Б Д.1.1-1:2013. Правила определения стоимости строительства [Текст]. – введ. 01-01-2014. – К.: Минрегион Украины. 2013.
132. Методические указания по расчету выбросов парниковых газов в атмосферу от домашнего скота: внутренняя ферментация и навоз [Текст] / Система нормативных документов по охране окружающей среды Руководящий нормативный документ, составитель РГП «КазНИИЭК» МООС РК – Астана, 2010. – 17 с.
133. Методика расчета выделений (выбросов) загрязняющих веществ в атмосферу от животноводческих комплексов и звероферм (по величинам удельных показателей). Научно-исследовательский институт охраны атмосферного воздуха (НИИ Атмосфера) [Текст], СПб: Интеграл, 1999 г. – 32 с.

134. Александровская, З. И. Организация службы и уборки городов [Текст] / З.И. Александровская, А.М. Кузьменкова, Я.Н. Крхамбаров. – М.: Стройиздат, 1976. – 127 с.
135. Вилсон Д. Утилизация твёрдых отходов [Текст]: пер. с англ. / Д. Вилсон. – М.: Стройиздат, 1985. – 336 с.
136. Ривкин, С. Л. Термодинамические свойства воды и водяного пара. Справочник. [Текст] / С.Л. Ривкин, А.А. Александров. – М.: Энерггоатомиздат, 1984. – 80 с.
137. Розробка методики і програми розрахунків гідравлічного і теплового режимів зброджування біомаси у метантенку: звіт про НДР К-3-03-06/ДонНАБА. – Макіївка, 2010. – С. 16–43.
138. Холланд, Ф. Химические реакторы и сметители для жидкофазных процессов [Текст] / Ф. Холланд, Ф. Чапман. – М.: Химия, 1974. – 208 с.

## Приложение А

## Практический расчет габаритных размеров метантенка и количества биогаза

Основным компонентом процесса сбраживания биомассы является навоз животных различных групп. К вспомогательным составляющим биомассы относятся отходы кормов, которыми кормят животных, остатки подстилочного материала. От объема сбраживаемой массы зависят габаритные размеры МТ. Разработана методика расчета режима сбраживания биомассы. Основой для расчета режима сбраживания биомассы является определение теплофизических характеристик сбраживаемого субстрата.

В зависимости от перерабатываемого навоза и других составляющих биомассы изменяется качественное и количественное образование биогаза.

Обработка данных разных авторов, приведенных в работе [16] позволила установить предельные значения характеристик навоза различных групп животных (табл. А.1) [40,134,135].

Таблица А.1- Характеристика навоза различных групп животных

Группа животных	Выход навоза на 1 голову за сутки		Содержание, кг		Объем биогаза на 1 кг СВ, м <sup>3</sup>	Содержание СН <sub>4</sub> , %.
	V', л	m', кг	СВ	органич. масса		
КРС	30,8	31,8-40,0	3,3-4,9	2,8-4,1	0,2-0,4	55-65
Свиньи	4,2	4,5-6,0	0,7-1,2	0,6-0,9	0,3-0,6	60-80
Овцы, козы	2,5	2,7-3,3	0,95	0,73	0,63	70
Домашняя птица	0,19	0,17-0,25	0,03-0,04	0,02-0,03	0,37-0,5	54-62

Для определения количества получаемого биогаза необходимо знать, какое количество сухого вещества и органической массы находится в составе биомассы, а также количество биогаза, который выделяется из 1 кг сухого вещества, и содержание в нем СН<sub>4</sub>.

При транспортировке навоза от фермы к метантенку и при подготовке его к сбраживанию возможны потери сырья до 5% от общей массы. Для дальнейших расчетов доля потерь принята  $\gamma = 0,05$ .

Масса навоза, которая образуется за сутки при наличии разных групп животных, рассчитывается по формуле

$$G_r = \sum_{i=1}^n n_i \cdot m_i \cdot (1 - \gamma), \quad (\text{A.1})$$

где  $n_i$  - количество голов скота соответствующей группы животных;

$m_i$  - усредненная масса навоза от одной головы скота соответствующей группы, кг/сутки.

В таблице А.2 приведены значения усреднённых величин, необходимых для расчета объема получаемого биогаза.

Таблица А.2 - Усреднённые величины суточного объема получаемого биогаза и содержание в нем сухого вещества, доля отходов кормов и подстилочного материалы от каждой группы животных

Группы животных	Кол. голов, шт.	Суточный выход навоза, (кг/сутки), $m_i$	Доля сухого вещества в навозе, $g_i$	Потеря кормов, $\leq 10\%$ , от массы навоза, $s_i$	Потери подстилочного материалы, $\leq 3\%$ от массы навоза, $\delta_i$
КРС	$n_1$	34	0,2(20%)	0,07	0,02
Свиньи	$n_2$	5	0,25(25%)	0,09	0,03
Птица	$n_3$	0,2	0,2(20%)	0,05	0,01

Содержание сухого вещества (СВ) в навозе определяется по формуле

$$M_{CB}^z = \sum_{i=1}^n n_i \cdot m_i \cdot (1 - \gamma) \cdot r_i, \quad (\text{A.2})$$

где  $r_i$  - доля СВ в навозе  $i$ -той группы животных (табл. А.2).

Содержание СВ в отходах кормов, которые удаляются вместе с навозом определяется по формуле

$$M_{CB}^k = \sum_{i=1}^n n_i \cdot m_i \cdot s_i (1 - w_i), \quad (\text{A.3})$$

где  $s_i$  - доля потерь кормов от массы навоза (табл. А.2);

$w_i$  – влажность кормов, рекомендуется 70% (0,7).

Содержание сухого вещества в подстилочном материале определяется по формуле

$$M_{CB}^n = \sum_{i=1}^n n_i \cdot m_i \cdot (1 - w_i) \cdot \delta_i, \quad (\text{A.4})$$

где  $\delta_i$  - доля подстилочного материала от массы навоза животных соответствующей группы.

Общая суточная масса сухого вещества будет равняться сумме всех трех составляющих

$$M_{CB} = M_{CB}^e + M_{CB}^k + M_{CB}^n. \quad (A.5)$$

Установлено, что количество СВ, которое вносится с отходами кормов и подстилочного материала от общей массы СВ составляет до 10%. Таким количеством СВ в расчетах определения габаритных размеров МТ пренебрегать не целесообразно.

Суточный объем биогаза при полном сбраживании составляет [40]

$$V_{\text{бг}} = V_{\text{бг}}^n + V_{\text{бг}}^k + V_{\text{бг}}^e = \sum m_{\text{сви}} \cdot V_i + m_{\text{сви}}^k \cdot V_i^k + m_{\text{сви}}^n \cdot V_i^n, \quad (A.6)$$

где  $V_{\text{бг}}^n$  - объем биогаза, получаемого при сбраживании навоза, м<sup>3</sup>/сутки;

$V_{\text{бг}}^k$  - объем биогаза, получаемого при сбраживании отходов кормов, м<sup>3</sup>/сутки;

$V_{\text{бг}}^e$  - объем биогаза, получаемого при сбраживании подстилочного материала, м<sup>3</sup>/сутки;

$m_{\text{сви}}$  - масса СВ в навозе  $i$ -той группы животных, отходов кормов, подстилочных материалов;

$V_i$  - объем биогаза, получаемого при сбраживании навоза  $i$ -той группы животных, м<sup>3</sup>/сутки.

Аналитические исследования показали, что объем биогаза, получаемого при сбраживании навоза зависит от температуры сбраживания. По данным литературы [31] построены зависимости объема получаемого биогаза от температуры для навоза КРС, свиней соответственно

$$V_{\text{КРС}} = -2,92 + 0,45 \cdot t - 0,02 \cdot t^2 + 5,84 \cdot 10^{-4} \cdot t^3 - 5,05 \cdot 10^{-6} \cdot t^4, \quad (A.7)$$

при коэффициенте корреляции  $r=0,987$ .

$$V_{\text{свиньи}} = -1,47 + 0,124 \cdot t - 8,33 \cdot t^2 - 8 \cdot 10^{-5} \cdot t^3 + 1,33 \cdot 10^{-6} \cdot t^4, \quad (A.8)$$

при коэффициенте корреляции  $r=0,985$ .

Характеристика кормов и подстилочных материалов, [40] принятые для расчетов, приведены в таблице А.3, А.4.

Таблица А.3 - Характеристики кормов

Животные	Корм	Объем биогаза на 1кг СВ, м <sup>3</sup> /кг	Содержание СН <sub>4</sub> %
КРС	Силос	0,250	84
Свиньи	Отходы моркови	0,250	60
Куры	Зерно	0,500	50

Таблица А.4 - Характеристики подстилочных материалов

Животные	Подстилочные материалы	Объем получаемого биогаза на 1кг СВ, м <sup>3</sup> /кг	Содержание СН <sub>4</sub> %
КРС	Опилки древесины	0,220	51
Свиньи	Солома	0,340	58
Куры	Опилки древесины	0,220	51

Сбраживаемая масса представляет смесь воды и ОВ с рекомендуемой влажностью 85-97% [40]. Теплофизические характеристики воды зависят от температуры и приводятся в справочных таблицах [136].

Для удобства расчетов, с помощью программы Curve Expert были выведены зависимости основных характеристик воды от температуры.

Полученные математические уравнения, в общем виде, приведены в зависимости

$$\varphi_i = a_i + b_i \cdot t + c_i \cdot t^2 + d_i \cdot t^3, \quad (\text{A.9})$$

где  $\varphi_i$  - одна из опытных характеристик воды, приведенных в табл. А.5 (кроме коэффициента кинематической вязкости);

$a_i, b_i, c_i, d_i$  - соответствующие коэффициенты.

Коэффициент кинематической вязкости определяется по иному уравнению, чем другие характеристики воды

$$\nu = \frac{1}{a + b \cdot t + c \cdot t^2 + d \cdot t^3}. \quad (\text{A.10})$$

Коэффициенты корреляции для всех полученных уравнений больше 0,99 ( $r > 0,99$ ).

Значения полученных коэффициентов приведены в таблице А.5.

Таблица А.5 - Значения коэффициентов в уравнениях (А.7 и А.8)

Характеристики воды	Обозначение	Размерность	Коэффициенты уравнений			
			a	b	c	d
Плотность	$\rho$	кг/м <sup>3</sup>	999,99	0,019	$-5,896 \cdot 10^{-3}$	$1,552 \cdot 10^{-5}$
Массовая теплоемкость	$C_v$	кДж/ (кг·К)	4,211	$-2,0 \cdot 10^{-3}$	$3,089 \cdot 10^{-5}$	$-9,615 \cdot 10^{-8}$
Коэффициент теплопроводности	$\lambda \cdot 10^2$	Вт/ (м·К)	55,0	0,277	$-1,8 \cdot 10^{-3}$	$3,652 \cdot 10^{-6}$
Коэффициент динам. вязкости	$\mu \cdot 10^6$	Па·с	1758,7	-47,177	0,58	$-2,58 \cdot 10^{-3}$
Коэффициент кинем. вязкости	$\nu \cdot 10^6$	м <sup>2</sup> /с	0,555	$2,031 \cdot 10^{-2}$	$8,672 \cdot 10^{-5}$	- - -
Число Прандтля	Pr	- - -	13,389	-0,401	$5,196 \cdot 10^{-3}$	$-2,36 \cdot 10^{-5}$

Так как сбрасываемая масса образует суспензию воды с частичками ОВ, теплофизические характеристики данной субстанции необходимо определять с учетом ее физических особенностей.

В состав сбрасываемой массы кроме воды входит сухое вещество (СВ) из навоза КРС, свиней, птицы, кормов и подстилочного материала. По данным [31] плотность СВ из навоза КРС равняется  $\rho_{крс} = 1250$  кг/м<sup>3</sup>, из навоза свиней  $\rho_{св} = 1400$  кг/м<sup>3</sup> и из навоза птицы  $\rho_{пт} = 1325$  кг/м<sup>3</sup>. В связи с отсутствием данных о плотности СВ кормов и подстилочного материала было принято ее как среднюю плотность древесины по данным [96]  $\rho_{к+п} = 748$  кг/м<sup>3</sup>.

Массовая доля каждой составляющей сухого вещества  $g_i$  может быть рассчитана по уравнению

$$g_i = \frac{M_i}{M_{св}}, \quad (A.11)$$

где  $M_i$  - масса сухого вещества, которое приходит из навоза КРС, свиней, птицы, кормов, подстилочного материала, кг;

$M_{св}$  - общая масса СВ, кг.

Тогда средняя плотность смеси СВ составляет

$$\bar{\rho}_{CB} = \sum g_i \cdot \rho_i, \quad (\text{A.12})$$

где  $\rho_i$  - соответствующая плотность компонента смеси СВ, кг/м<sup>3</sup>;

$g_i$  - массовая доля соответствующего компонента СВ.

При известной общей массе СВ  $M_{CB}$  и ее средней плотности  $\rho_{CB}$ , можно определить общий объем СВ в СМ

$$V_{CB} = \frac{M_{CB}}{\bar{\rho}_{CB}}. \quad (\text{A.13})$$

Для заданной влажности СМ  $W_{CM}$  и суточного количества СВ необходимое количество воды определяется по формуле

$$M_{\epsilon} = M_{CB} \cdot \frac{W_i}{1 - W_i}, \quad (\text{A.14})$$

где  $W_i$  - влажность СМ, выраженная в массовых долях ( $W_i = 0,85 \dots 0,97$ ).

Объем воды, которая находится в метантенке, будет зависеть от температуры сбраживания  $t$  и может быть найден из уравнения

$$V_{\epsilon} = \frac{M_{\epsilon}}{\rho_{\epsilon}(t)}, \quad (\text{A.15})$$

где  $\rho_{\epsilon}(t)$  - плотность воды, которая зависит от температуры, кг/м<sup>3</sup>.

Объемная доля СВ в СМ составляет

$$\varphi = \frac{V_{CB}}{V_{\epsilon} + V_{CB}}. \quad (\text{A.16})$$

Расчетные формулы были приняты как для суспензий с учетом зависимости характеристик воды от температуры  $\varphi_i(t)$  [82].

Плотность СМ [137]

$$\rho_{CM} = \varphi(t) \cdot \rho_{CB} + [1 - \varphi(t)] \cdot \rho_{\epsilon}(t). \quad (\text{A.17})$$

Коэффициент динамической вязкости

$$\mu_{CM} = \mu_{\epsilon} \cdot [1 + 2\varphi(t)]. \quad (\text{A.18})$$

Коэффициент теплопроводности [83]

$$\lambda_{CM} = \lambda_{\epsilon}(t) \frac{2\lambda_{\epsilon}(t) + \lambda_{CB} - 2[1 - \varphi(t)] \cdot [\lambda_{\epsilon}(t) - \lambda_{CB}]}{2\lambda_{\epsilon}(t) + \lambda_{CB} - [1 - \varphi(t)] \cdot [\lambda_{\epsilon}(t) - \lambda_{CB}]}, \quad (\text{A.19})$$



где  $\lambda_{\text{св}}$  - коэффициент теплопроводности СВ, принятый как средний из известных для древесины [96].  $\lambda_{\text{св}} = 0,248 \text{ Вт/(м·К)} = \text{const.}$

Теплоемкость СМ [137]

$$C_{\text{см}} = \frac{\varphi(t)C_{\text{св}} \cdot \rho_{\text{св}} + [1 - \varphi(t)] \cdot C_{\text{г}}(t) \cdot \rho_{\text{г}}(t)}{\rho_{\text{см}}(t)}, \quad (\text{A.20})$$

где  $C_{\text{св}}$  - теплоемкость сухого вещества, принятая, как для соломы, кДж/(кг·К);

$$C_{\text{св}} = C_{\text{соломы}} = 2,3 \text{ кДж/(кг·К)}.$$

Число Прандтля для СМ:

$$Pr_{\text{см}}(t) = \frac{\mu_{\text{см}}(t) \cdot C_{\text{см}}(t)}{\lambda_{\text{см}}(t)}. \quad (\text{A.21})$$

Рассчитанные теплофизические характеристики СМ при  $W_i = 0,9$  в зависимости от температуры приведены в таблице А.6.

Таблица А.6 - Теплофизические характеристики сбраживаемой массы

Характеристики воды	Обозначения	Размерность	Температура, °С
			40
Объемная доля сухого вещества	$\varphi$	---	0,083
Плотность	$\rho_{\text{см}}$	кг/м <sup>3</sup>	1010,9
Массовая теплоемкость	$C_{\text{см}}$	кДж/ (кг·К)	3,9867
Коэффициент теплопроводности	$\lambda_{\text{см}} \cdot 10^2$	Вт/ (м·К)	30,81
Коэффициент динам. вязкости	$\mu_{\text{см}} \cdot 10^6$	Па·с	761,7
Коэффициент кинем. вязкости	$\nu_{\text{см}} \cdot 10^6$	м <sup>2</sup> /с	0,7525
Число Прандтля	$Pr_{\text{см}}$	---	9,86

Объем метантенка зависит от суточного количества навоза, влажности сбраживаемой массы и запланированной длительности пребывания навоза в метантенке.

Для расчета рабочего объема  $V_p$  метантенка используется уравнение

$$V_p = V_{\text{сут}} \cdot \tau = (V_{\text{св}} + V_{\text{в}}) \cdot \tau, \quad (\text{A.22})$$

где  $V_{\text{сут}}$  - суточный объем СМ, м<sup>3</sup>;

$\tau$  - длительность сбрасывания, сутки;

$V_{CB}$  - объем сухого вещества,  $m^3$ ;

$V_e$  - объем воды,  $m^3$ .

Опыт работы подобных аппаратов позволил принять оптимальные соотношения основных габаритных размеров предлагаемой конструкции [82,99,138]:

- высоты рабочей цилиндрической части  $H_{cm}$  к внутреннему диаметру:

$$H_{cm} : D = 1,00 \dots 1,25; \quad (A.23)$$

- внутреннего диаметра  $D$  к диаметру мешалки  $d_m$  :

$$D : d_m = 3 \dots 4; \quad (A.24)$$

- внутреннего диаметра  $D$  к диаметру ЗМ  $D_{зм}$  :

$$D : D_{зм} = 1,3 \dots 1,5; \quad (A.25)$$

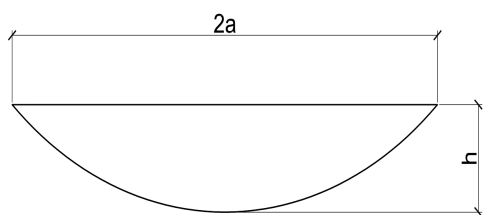
- глубины овального днища  $h_d$  к внутреннему диаметру  $D$  :

$$H_d : D = 0,11 \dots 0,21 \quad (A.26)$$

- расстояния от нижнего края мешалки до нижней точки днища  $h_m$  к диаметру мешалки  $d_m$  :

$$h_m : d_m = 0,4 \dots 1,0 \quad (A.27)$$

Для расчета объема днища  $V_d$  использовались рекомендации [90], где для сегмента сферы будем иметь (Рис. А.1).



$$a = D/2$$

$$h = h_d = (0,11 \dots 0,21) D = l_2 \cdot D$$

Рисунок А.1 - Схема и расчетные размеры сегмента днища

Общий объем  $V_{общ}$  МТ должен быть на 7-10% больше расчетного

$$V_{общ} = (1,07 \dots 1,10) \cdot V_p. \quad (A.28)$$

Запас объема дает возможность учесть объемы ЗМ, лопастной мешалки и ее вала, а также свободного пространства между поверхностью СМ и крышкой МТ.

С учетом схемы МТ и соотношений (А.23...А.28) объем рабочей части будет состоять из объема цилиндрической части  $V_{\text{ц}}$  и объема овального днища

$$V_p = V_{\text{ц}} + V_{\text{д}}. \quad (\text{А.29})$$

Объем цилиндрической части

$$V_{\text{ц}} = \pi D^2 \cdot H = (1,00...1,25)\pi D^3 = l_1 \pi D^3; \quad (\text{А.30})$$

$$V_{\text{д}} = \frac{1}{6} \pi h \cdot (3a^2 + h^2). \quad (\text{А.31})$$

Подставляя в (А.25) величины  $\alpha$  и  $h$ , выраженные через  $D$ , (А.30), (А.31) получим

$$V_{\text{д}} = \frac{1}{6} \pi l_2 \cdot D \left[ 3 \left( \frac{D}{2} \right)^2 + (l_2 D)^2 \right]. \quad (\text{А.32})$$

После упрощения уравнение (А.32) примет вид

$$V_{\text{д}} = \left( \frac{\pi}{6} \cdot l_2^3 + \frac{\pi}{8} l_2 \right) \cdot D^3 = C \cdot D^3, \quad (\text{А.33})$$

где  $C = \frac{\pi}{6} l_2^3 + \frac{\pi}{8} l_2$  - коэффициент, который зависит от принятых для расчетов соотношений (А.26).

Тогда

$$V_p = l_1 \cdot D^3 + C \cdot D^3 = (l_1 + C) \cdot D^3. \quad (\text{А.34})$$

Из уравнения (А.34) находится диаметр цилиндрической рабочей части МТ

$$D = \sqrt[3]{\frac{V_p}{l_1 + C}}, \quad (\text{A.35})$$

что дает возможность рассчитать другие размеры МТ, используя принятые для расчетов соотношения (А.23...А.28).

Зная рабочий объем МТ и задаваясь величиной свободного объема

$\delta = \frac{V_{своб}}{V_p}$  можно рассчитать:

- величину свободного объема

-

$$V_{своб} = \delta \cdot V_p; \quad (\text{A.36})$$

- общую высоту сбраживаемой массы

-

$$H_{см} = H + h_d; \quad (\text{A.37})$$

- расстояние от поверхности СМ к крышке:

$$h_{своб} = \frac{4}{\pi D^2} \cdot V_{своб}; \quad (\text{A.38})$$

- общую высоту внутренней части МТ :

-

$$H_{общ} = H_{см} + h_{своб}. \quad (\text{A.39})$$

На базе приведенной методики разработана программа расчета, учитывающая поступление навоза от различных групп животных и дополнительное количество органической массы (остатки кормов и подстилочных материалов). Программа позволяет определить количество и качество получаемого биогаза при сбраживании.

## Приложение Б

## Расчет температуры греющего теплоносителя

Таблица Б.1- Расчет температуры греющего теплоносителя по аналитической математической модели, экспериментально-статистической модели и значения, полученные по трем опытам при отсутствии слоя отложений

Температура наружного воздуха	Температуры греющего теплоносителя						Пост-рочная дисперсия, $S_j^2$
	По аналитической математической модели	По экспериментально-статистической модели	Опыт 1	Опыт 2	Опыт 3	Среднее значение	
-25	47,7	47,5	45,7	47,5	48,9	47,4	2,573
-20	47,1	46,9	45,4	47	49,5	47,3	4,270
-15	46,5	46,3	44,8	46,4	47	46,1	1,293
-10	45,9	45,8	45	45,8	47	45,9	1,013
-5	45,3	45,2	44,7	45,2	45,8	45,2	0,303
0	44,7	44,6	44	44,7	45,3	44,7	0,423
5	44,1	44,0	43,5	44,1	44,5	44,0	0,253
10	43,5	43,4	42	43,5	44	43,2	1,083

Таблица Б.2 - Расчет доверительного интервала для температуры греющего теплоносителя при отсутствии отложений

Расчет доверительного интервала					
Выборочное среднее значение, $\bar{y}$	Дисперсия, $D_{cp}$	Среднеквадратическое отклонение по выборке, $\sigma$	Квантиль распределения Стьюдента	Нижняя граница доверительного интервала	Верхняя граница доверительного интервала
47,4	1,41	1,19	4,30	44,4	50,3
47,3	2,02	1,42	4,30	43,8	50,8
46,1	0,85	0,92	4,30	43,8	48,4
45,9	0,45	0,67	4,30	44,3	47,6
45,2	0,14	0,38	4,30	44,3	46,2
44,7	0,22	0,47	4,30	43,5	45,8
44,0	0,14	0,38	4,30	43,1	45,0
43,2	0,72	0,85	4,30	41,1	45,3

Таблица Б.3 -Расчет температуры греющего теплоносителя по аналитической математической модели, экспериментально-статистической модели и значения, полученные по трем опытам и толщине слоя отложений 0,5мм

Температура наружного воздуха	Температуры греющего теплоносителя						Пост-рочная дисперсия, $S_j^2$
	По аналитической математической модели	По экспериментально-статистической модели	Опыт 1	Опыт 2	Опыт 3	Среднее значение	
-25	58,9	58,1	55,2	58,3	60,5	58,0	7,090
-20	57,4	56,7	54,5	57	60	57,2	7,583
-15	55,9	55,3	54,1	55,6	56,8	55,5	1,830
-10	54,5	54,0	52,5	54,1	55,5	54,0	2,253
-5	53,0	52,6	51	52,7	54	52,6	2,263
0	51,6	51,2	49,8	51,3	52,6	51,2	1,963
5	50,1	49,9	48,5	49,9	52,2	50,2	3,490
10	48,7	48,5	47	48,5	49,5	48,3	1,583

Таблица Б.4 -Расчет доверительного интервала для температуры греющего теплоносителя при толщине слоя отложений 0,5мм

Расчет доверительного интервала					
Выборочное среднее значение, $\bar{y}$	Дисперсия, $D_{cp}$	Среднеквадратическое отклонение по выборке, $\sigma$	Квантиль распределения Стьюдента	Нижняя граница доверительного интервала	Верхняя граница доверительного интервала
58,0	4,20	2,05	4,30	52,9	63,1
57,2	3,67	1,91	4,30	52,4	61,9
55,5	0,99	0,99	4,30	53,0	58,0
54,0	1,18	1,09	4,30	51,3	56,7
52,6	1,25	1,12	4,30	49,8	55,3
51,2	1,03	1,02	4,30	48,7	53,8
50,2	1,63	1,27	4,30	47,0	53,4
48,3	0,91	0,95	4,30	46,0	50,7

Таблица Б.5 -Расчет температуры греющего теплоносителя по аналитической математической модели, экспериментально-статистической модели и значения, полученные по трем опытам и толщине слоя отложений 1,0мм

Температура наружного воздуха	Температуры греющего теплоносителя						Пост-рочная дис-персия, $S_j^2$
	По аналитической математической модели	По экспериментально-статистической модели	Опыт 1	Опыт 2	Опыт 3	Среднее значение	
-25	70,1	68,6	64,6	69,1	71,3	68,3	11,663
-20	67,7	66,5	64,7	67	68,5	66,7	3,663
-15	65,4	64,3	61,5	64,7	67	64,4	7,630
-10	63,0	62,2	60	62,4	64,5	62,3	5,070
-5	60,7	60,0	58	60,2	62,5	60,2	5,063
0	58,4	57,8	55,5	57,9	60	57,8	5,070
5	56,1	55,7	53,4	55,7	57,8	55,6	4,843
10	53,8	53,5	51	53,5	55,5	53,3	5,083

Таблица Б.6 -Расчет доверительного интервала для температуры греющего теплоносителя при толщине слоя отложений 1,0мм

Расчет доверительного интервала					
Выборочное среднее значение, $\bar{y}$	Дисперсия, $D_{cp}$	Среднеквадратическое отклонение по выборке, $\sigma$	Квантиль распределения Стьюдента	Нижняя граница доверительного интервала	Верхняя граница доверительного интервала
68,3	9,56	3,09	4,30	60,7	76,0
66,7	2,18	1,48	4,30	63,1	70,4
64,4	4,51	2,12	4,30	59,1	69,7
62,3	2,67	1,63	4,30	58,2	66,4
60,2	2,50	1,58	4,30	56,3	64,2
57,8	2,67	1,63	4,30	53,7	61,9
55,6	2,50	1,58	4,30	51,7	59,6
53,3	2,79	1,67	4,30	49,2	57,5

Таблица Б.7- Расчет температуры греющего теплоносителя по аналитической математической модели, экспериментально-статистической модели и значения, полученные по трем опытам и толщине слоя отложений 1,5мм

Температура наружного воздуха	Температуры греющего теплоносителя						Пост-рочная дисперсия, $S_j^2$
	По аналитической математической модели	По экспериментально-статистической модели	Опыт 1	Опыт 2	Опыт 3	Среднее значение	
-25	81,3	79,2	74,1	80	82,5	78,9	18,603
-20	78,0	76,3	72,9	77	79,5	76,5	11,103
-15	74,8	73,3	70,5	73,8	76,5	73,6	9,030
-10	71,6	70,4	67,7	70,7	73,5	70,6	8,413
-5	68,4	67,4	64,5	67,7	70,5	67,6	9,013
0	65,3	64,4	61,5	64,6	67	64,4	7,603
5	62,1	61,5	58,4	61,5	64,5	61,5	9,303
10	58,9	58,5	55	58,4	61,2	58,2	9,640

Таблица Б.8- Расчет доверительного интервала для температуры греющего теплоносителя при толщине слоя отложений 1,5мм

Расчет доверительного интервала					
Выборочное среднее значение, $\bar{y}$	Дисперсия, $D_{cp}$	Среднеквадратическое отклонение по выборке, $\sigma$	Квантиль распределения Стьюдента	Нижняя граница доверительного интервала	Верхняя граница доверительного интервала
78,9	19,84	4,45	4,30	67,8	89,9
76,5	7,67	2,77	4,30	69,6	83,3
73,6	4,97	2,23	4,30	68,1	79,1
70,6	4,32	2,08	4,30	65,5	75,8
67,6	4,78	2,19	4,30	62,1	73,0
64,4	4,30	2,07	4,30	59,2	69,5
61,5	4,71	2,17	4,30	56,1	66,9
58,2	5,30	2,30	4,30	52,5	63,9



Таблица Б.9 -Расчет температуры греющего теплоносителя по аналитической математической модели, экспериментально-статистической модели и значения, полученные по трем опытам и толщине слоя отложений 2,0мм

Температура наружного воздуха	Температуры греющего теплоносителя						Пост-рочная дисперсия $S_j^2$
	По аналитической математической модели	По экспериментально-статистической модели	Опыт 1	Опыт 2	Опыт 3	Среднее значение	
-25	92,4	89,8	84,6	90,8	91,5	89,0	14,423
-20	88,3	86,0	83	87	89	86,3	9,333
-15	84,2	82,3	78,1	83	86,5	82,5	17,803
-10	80,2	78,5	74,1	79	82,5	78,5	17,803
-5	76,1	74,8	71	75,1	78,5	74,9	14,103
0	72,1	71,1	67,3	71,2	74,5	71,0	12,990
5	68,1	67,3	63,4	67,3	70,8	67,2	13,703
10	64,1	63,6	59,5	63,4	66,9	63,3	13,703

Таблица Б.10 -Расчет доверительного интервала для температуры греющего теплоносителя при толщине слоя отложений 2,0мм

Расчет доверительного интервала					
Выборочное среднее значение, $\bar{y}$	Дисперсия, $D_{cp}$	Среднеквадратическое отклонение по выборке, $\sigma$	Квантиль распределения Стьюдента	Нижняя граница доверительного интервала	Верхняя граница доверительного интервала
89,0	20,32	4,51	4,30	77,8	100,2
86,3	7,14	2,67	4,30	79,7	93,0
82,5	11,54	3,40	4,30	74,1	91,0
78,5	11,54	3,40	4,30	70,1	87,0
74,9	7,83	2,80	4,30	67,9	81,8
71,0	7,09	2,66	4,30	64,4	77,6
67,2	7,21	2,69	4,30	60,5	73,8
63,3	7,21	2,69	4,30	56,6	69,9

Приложение В

Определение срока окупаемости биогазовой установки

Таблица В.1- Локальная смета на строительство биогазовой установки для фермерского хозяйства на 100голов КРС

Программный комплекс "Смета Профи", ООО "ККС-Групп", г. Донецк				- 1 -		СТР_116		Форма № 1			
Биогазовая установка											
(наименование объекта строительства)											
Локальная смета на строительные работы № 1											
на строительно-монтажные работы, объект: Биогазовая установка											
(наименование работ и затрат, наименование дома, строения, сооружения, линейного объекта инженерно-транспортной инфраструктуры)											
Основание: чертежи (спецификации) №											
						Сметная стоимость		889,574	тыс. руб.		
						Сметная трудоемкость		3,15175	тыс. чел-ч		
						Сметная заработная плата		112,944	тыс. руб.		
						Средний разряд работ		4,2	разряд		
Составлена в текущих ценах по состоянию на 01.11.2019											
№ п/п	Обоснование (шифр нормы)	Наименование работ и затрат	Единица измерения	Количество	Стоимость единицы, рос. руб.			Общая стоимость, рос. руб.		Затраты труда рабочих, чел-ч,	
					Всего	эксплуатации машин	в том числе заработной платы	Всего	заработной платы	эксплуатации машин	в том числе заработной платы
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	E6-3-5	Устройство железобетонных фундаментов общего назначения объемом до 25 м3	100 м3	0,07	278435,01	21621,67	19490	1158	1514	443,7	31
					16541,14	4864,88			341	89,24	6
2	C124-13	Горячекатаная арматурная сталь периодического профиля, класс А-II, диаметр 14 мм	т	0,8	26390,91	-	21113		-	-	-
3	E6-25-1	Устройство метантенка с толщиной стен 140 мм	100 м3	0,33	497492,92	28648,04	164173	44698	9454	3161	1043
					135448,85	7191,73			2373	143,16	47
4	C124-13	Горячекатаная арматурная сталь периодического профиля, класс А-II, диаметр 14 мм	т	13,3	26390,91	-	350999		-	-	-
5	M7-119-2	Монтаж газгольдера	комплект	1	114195,33	52739,1	114195	10873	52739	235,8	236
					10872,74	9300,19			9300	177,97	178
6	C181-641-6	Мягкий газгольдер для биогазовых установок 25м3	установка	1	45747	-	45747		-	-	-
7	E18-13-1	Установка насосов центробежных с электродвигателем, масса агрегата до 0,1 т	1 насос	2	980,05	97,83	1960	1764	196	21,32	43
					882,22	22,34			45	0,5	1
8	1808-1266-50	Насос фекальный погружной, N=1,9кВт Вектор ВНДф-18/1900Н	шт	2	6740	-	13480		-	-	-
					-	-			-	-	-
9	E16-6-4	Прокладка трубопроводов из стальных труб диаметром 32 мм	100 м трубопровода	3,49	2387,72	323,88	8333	7203	1130	48,71	170
					2063,84	73,37			256	1,65	6

Программный комплекс "Смета Профи", ООО "КС-Групп", г. Донецк												
1	2	3	4	5	6	7	8	СТР_116			Форма № 1	
10	С113-131	Трубы стальные электросварные прямошовные из стали марки 20, наружный диаметр 32 мм, толщина стенки 2,5 мм	м	160	63,08	-	10093	9	10	11	12	-
11	С1545-28-1	Труба латунная диаметр 32мм	м	189	105,02	-	19849	-	-	-	-	-
12	M4-61-1	Система перемешивания с эл. двигателем 2кВт	шт	1	14128,04	5818,61	14128	8281	5819	190,4	190	-
13	M15-100-1	Монтаж фильтра-регулятора и десульфуризатора	т	0,2	8280,5	1782,17	4321	3085	1782	36,13	36	-
14	1905-10056-3-1	Фильтр-регулятор с десульфуризатором	комплект	1	21605,92	6179,92	3025	-	1236	360	72	-
15	E19-6-1	Установка предохранительных клапанов диаметром до 50 мм	1 клапан	1	15426	1173,56	220	153	235	22,76	5	-
16	2308-4197-4-1	Клапан предохранительный	шт	1	3025	-	285	-	-	-	-	-
17	M7-47-1	Монтаж газового компрессора	шт	1	220,01	66,61	4780	2195	67	3,58	4	-
18	1502-2158-1	Компрессор CL 40 HS, мощность двигателя - 1,1 кВт	шт	1	153,4	14,75	46000	-	15	0,34	-	-
19	E19-12-1	Установка счетчика биогаса	1 прибор	1	2194,77	152,47	211	41	739	51,8	52	-
20	1704-30020-5	Счетчик биогаса	шт	1	41,14	0,57	2500	-	152	3,13	3	-
21	E18-2-6	Установка котлов стальных жаротрубных пароводогрейных на газе теплопроиз- водительностью до 0,21 МВт [0,18 Гкал/ч]	1 котел	1	210,95	2,12	6021	2574	2	0,96	1	-
22	2106-4046-31	Котел биогазовый водогрейный проточного типа	шт	1	41,14	0,57	50000	-	1	0,01	-	-
23	E18-4-2	Установка теплообменника	1 секция	4	2500	-	3063	845	1031	61,5	62	-
24	181-2292-1-1	Теплообменник с насосом	шт	1	6021,47	1030,53	40300	-	265	6,03	6	-
25	M8-719-10	Монтаж системы управления автоматического поддержания температуры	1 компл	1	2573,78	265,13	9951	3337	-	-	-	-
					50000	-	9950,9	104,76	-	-	-	-
					40300	-	3336,64	24,26	-	-	-	-
					-	-	-	-	105	78,75	79	-
					-	-	-	-	24	0,5	1	-




Таблица В.2 -Сводный сметный расчет строительства биогазовой установки для фермерского хозяйства на 100голов КРС

Программный комплекс "Смета Профи", ООО "ККС-Групп", г. Донецк		1	Форма № 5				
(наименование утверждающей организации)							
Утверждено:							
Сводный сметный расчет в сумме:		1209,266 тыс.руб.					
В том числе возвратных сумм		0 тыс.руб.					
ссылка на документ об утверждении							
" _ " 20_ _ г.							
Сводный сметный расчет стоимости объекта строительства № 1							
Биогазовая установка							
Составлена в текущих ценах по состоянию на 01.11.2019							
№ п/п	Номера смет и сметных расчетов	Наименование глав, объектов, работ и затрат			Сметная стоимость, тыс. руб.		
				строительных работ	оборудования, мебели и инвентаря	прочие затраты	Общая сметная стоимость
1	2	3	4	5	6	7	
1		Глава 2. Основные объекты строительства					
2	1	Биогазовая установка	889,574	161,700		1051,274	
3		Итого по главе 2	889,574	161,7		1051,274	
4		Итого по главам 1-7	889,574	161,7		1051,274	
5		Итого по главам 1-8	889,574	161,7		1051,274	
6		Итого по главам 1-9	889,574	161,7		1051,274	
7		Глава 10. Содержание службы заказчика и авторский надзор					
8	ДСТУ Б Д.1.1-1:2013 приложение К п.44	Содержание службы заказчика (включая затраты на технический надзор)			15,769	15,769	
9		Итого по главе 10			15,769	15,769	
10		Глава 12. Проектные и изыскательские работы					
11	ДСТУ Б Д.1.1-1:2013 приложение К п.49	Сметная стоимость проектных работ			37,547	37,547	
12		Итого по главе 12			37,547	37,547	
13		Итого по главам 1-12	889,574	161,7	53,316	1104,59	
14	ДСТУ Б Д.1.1-1:2013 п.6.1.5.1	Сметная прибыль	15,757			15,757	
15	ДСТУ Б Д.1.1-1:2013 п.6.1.5.2	Средства на покрытие административных расходов строительно-монтажных организаций			6,492	6,492	
16	ДСТУ Б Д.1.1-1:2013 п.6.1.5.4	Средства на покрытие дополнительных затрат, связанных с инфляционными процессами	58,267	10,591		68,858	
17		Итого	963,598	172,291	59,808	1195,697	
18		Итого	963,598	172,291	59,808	1195,697	
19		Налог на прибыль			13,569	13,569	
20		Всего по сводному сметному расчету	963,598	172,291	73,377	1209,266	

## Приложение Г

## Внедрение результатов диссертационной работы

	<p><b><u>ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ</u></b>  <b><u>«АльянсСтрой»</u></b>          ИНН 6229022541, КПП 623401001,          Юридический адрес: Россия, 390006, г. Рязань, ул. Грибоедова,          д. 58, помещение Н10, офис 223,          р/с 40702810923200000399к/с 30101810000000000201          БИК 044525201 ПАО АКБ «АВАНГАРД» г. Москва          e-mail: <a href="mailto:aliansstroy62@gmail.com">aliansstroy62@gmail.com</a>          тел: 8(4912) 51-16-90</p>
---	---

Исх. № 6/н от «18» октября 2019 г  
 на № \_\_\_\_ от « \_\_\_\_ » \_\_\_\_ 2019 г

Диссертационный совет Д 01.005.01  
 при ГОУ ВПО «Донбасская  
 национальная академия  
 строительства и архитектуры»

## СПРАВКА

о внедрении результатов исследований диссертационной работы  
 Колосовой Н.В. на тему «Интенсификация процессов теплообмена в  
 биогазовой установке для увеличения выхода горючих газов»,  
 представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук  
 по специальности 05.23.03– теплоснабжение, вентиляция,  
 кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение

Результаты диссертационных исследований Колосовой Н.В.  
 представляют практический интерес в части проектирования и разработки  
 технологической карты метантенка биогазовой установки с предложенной  
 автором интенсификацией теплообмена между греющим теплоносителем и  
 сбраживаемой массой.

Материалы диссертационной работы Колосовой Н.В. внедрены в  
 проектирование метантенков для фермерских хозяйств с целью увеличения  
 объема получаемого биогаза.

Генеральный директор  
 ООО «АльянсСтрой»





Гречанюк А.И.

Исполнил:  
 Коваленко Л.В.  
 8-930-783-16-90



Диссертационный совет Д 01.005.01 при  
ГОУ ВПО «Донбасская национальная  
академия строительства и архитектуры»

**«УТВЕРЖДАЮ»**

Проректор по учебной работе  
ГОУ ВПО «Донбасская национальная  
академия строительства и архитектуры»,  
доктор технических наук, профессор  
Нездойминов В.И.  
«» 2019г.

**СПРАВКА**

о внедрении результатов исследований диссертационной работы  
ассистента кафедры «Теплотехника, теплогазоснабжение и вентиляция»

Колосовой Нелли Вадимовны на тему «Интенсификация процессов  
теплообмена в биогазовой установке для увеличения выхода горючих  
газов», представленную на соискание ученой степени кандидата технических  
наук по специальности 05.23.03 – теплоснабжение, вентиляция,  
кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение

Результаты диссертационных исследований Колосовой Н.В., а именно,  
методика определения габаритных размеров метантенка, расчет количества  
получаемого биогаза, математические модели теплообменных процессов в  
метантенке внедрены в учебный процесс в качестве учебного материала в  
курсе дисциплин «Энергосбережение в системах ТГВ», «Автономные  
системы энергоснабжения», «Моделирование процессов ТМО в системах  
теплогазоснабжения», что отражено в учебных программах вышеуказанных  
дисциплин.

Начальник учебного отдела  
ГОУ ВПО «Донбасская национальная  
академия строительства и архитектуры»,  
канд.н.гос.упр., доцент



А.А. Сухина

Заведующий кафедрой  
«Теплотехника, теплогазоснабжение и вентиляция»  
ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия  
строительства и архитектуры»,  
д.т.н., профессор



А.В. Лукьянов