

*В печать
23.10.2019 г.*

Министерство образования и науки
Донецкой Народной Республики
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 ТЕПЛОМАССООБМЕНА В
БИОГАЗОВОЙ УСТАНОВКЕ ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ ВЫХОДА
ГОРЮЧИХ ГАЗОВ**

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена на кафедре теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», г. Макеевка

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Монах Светлана Игоревна

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Недопекин Федор Викторович,
ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», профессор кафедры физики неравновесных процессов, метрологии и экологии им. И.Л. Повха, г. Донецк, ДНР

кандидат технических наук, доцент
Мартыненко Галина Николаевна,
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», доцент кафедры теплогазоснабжения и нефтегазового дела, г. Воронеж, РФ

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», г. Саратов, РФ

Защита состоится «5» марта 2020 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 01.005.01 при ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» по адресу: 286123, г. Макеевка, ул. Державина 2, учебный корпус №1, зал заседаний ученого совета. Тел. факс: +38 (0623) 43-70-33, e-mail: d01.005.01@donnasa.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» по адресу: 286123, г. Макеевка, ул. Державина 2, (<http://donnasa.ru>)

Автореферат разослан « » января 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 01.005.01  Удовиченко Злата Викторовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 теплообмена 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 теплообмена 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 теплообмена 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 теплообмена 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 теплообмена при изменении температуры наружного воздуха и образовании отложений на наружной поверхности греющего змеевика;

- разработана математическая модель процессов теплообмена 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 тепломассообмена 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 EPECS-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 строительной-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 страница, в том числе 103 страницы основного текста; 16 страниц списка использованных источников; 21 страница приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи научного исследования, изложена научная новизна, практическая ценность и реализация результатов работы.

В первой главе проведен анализ способов утилизации отходов животноводческих ферм путем анаэробного сбраживания в биогазовых установках с целью производства биогаза. Основным элементом биогазовой установки, в котором происходит сбраживание, является МТ.

Разложение органических веществ в МТ представляет собой сложный анаэробный процесс. В процессе сбраживания сложные органические вещества разлагаются на более простые. В результате сбраживания образуется биогаз (метан) и обезвреженная органическая масса.

На первом этапе аэробные бактерии преобразуют высокомолекулярные органические субстанции в низкомолекулярные соединения. На втором этапе (фаза окисления) 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. На третьем этапе кислотообразующие бактерии из органических кислот создают исходные продукты для образования метана, а именно: уксусную кислоту, двуокись углерода и водород. Бактерии, понижающие количество углерода, являются очень чувствительными к температуре. На последнем этапе образуется метан, двуокись углерода, сероводород и вода. Максимальное образование метана (до 90%) вырабатывается на последнем этапе, 70% происходит из уксусной кислоты.

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

воспроизводства. Скорость и масштабы развития метанообразующих бактерий зависит от их метаноболической активности.

Соотношение и взаимодействие различных групп микроорганизмов обуславливают стабильность процесса переработки. Для нормального протекания процесса разложения должны обеспечиваться благоприятные условия для жизнедеятельности бактерий. Установлено, что стабильное количество биогаза образуется при мезофильном режиме с температурой сбраживаемой массы (СМ) 30 – 45°C.

Большое распространение, в качестве устройства для обеззараживания сточных вод, метантенки получили в очистных сооружениях водоотведения. В данных сооружениях подогрев осадка наиболее часто осуществляется острым паром. Недостатком такого нагрева является высокая температура пара, приводящая к гибели бактерий, участвующих в процессе образования метана. Для производства биогаза применяют метантенки различных конструкций и способов нагрева (трехстадийные метантенки с конвективно-индукционным нагревом, цилиндрические метантенки с нагревом дна, цилиндрические метантенки с нагревом корпуса и др.).

Проанализированы существующие конструкции МТ и технологические факторы, влияющие на процесс сбраживания. По результатам анализа был сделан вывод, что все рассмотренные конструкции МТ не обеспечивают соблюдение технологических параметров сбраживания и сложны в изготовлении и эксплуатации.

По результатам аналитических исследований выявлено, что для создания условий для жизнедеятельности метаногенных бактерий необходимо учитывать: определенные свойства сырья, температуру процесса сбраживания, концентрацию питательных веществ, влажность субстрата, рН среды, анаэробные условия, давление в МТ, длительность сбраживания, интенсивность перемешивания субстрата, конструкцию МТ и др.

В ходе проведения аналитических исследований также был сделан вывод, что в ходе эксплуатации существующих МТ наблюдается снижение выхода биогаза. Это связано с ухудшением теплообмена между нагревательным элементом и сбраживаемой массой, что происходит вследствие образования отложений субстрата на поверхности нагревательного элемента со стороны сбраживаемой массы. В литературе не встречаются исследования, связанные с влиянием термического сопротивления отложений на поверхности нагревательного элемента на температурный режим в МТ.

Выявлено, что для стабильного объема выхода горючих газов необходимо поддержание постоянной температуры сбраживания, что требует интенсификации процессов теплообмена в МТ. Для определения интенсивности теплообмена следует разработать математическую модель тепломассообменных процессов в МТ биогазовой установки, позволяющую корректировать интенсивность теплообмена при изменении температуры наружного воздуха и образовании отложений на поверхностях греющего ЗМ, а также математическую модель процессов тепломассообмена в условиях отсутствия перемешивания сбраживаемой массы для определения коэффициента теплоотдачи при барботаже биогаза.

Анализ литературных источников позволил сделать вывод, что конструкции существующих МТ не позволяют обеспечить соблюдение температурного режима сбраживания.

Во второй главе предложена конструкция МТ и разработана математическая модель тепломассообменных процессов в МТ.

Для соблюдения всех технологических параметров сбраживания предлагается схема МТ, приведенная на рисунке 1, на которую получен патент на полезную модель № 90880.

Основным конструктивным элементом МТ является корпус, состоящий из цилиндрической части и овального днища (Рис. 1). Корпус накрывается крышкой. Внутри смонтирована мешалка и змеевиковый нагреватель. Данная конструкция проста в изготовлении и эксплуатации.

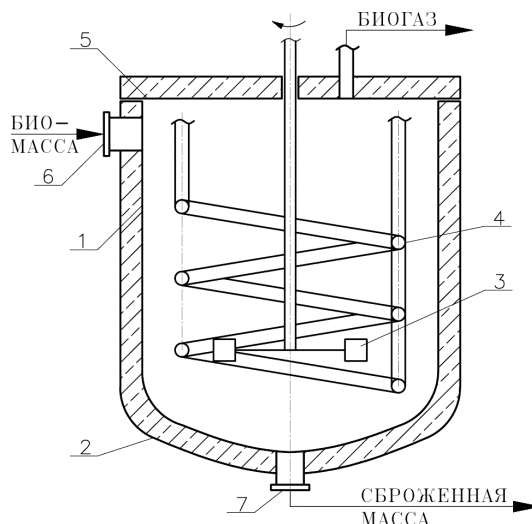


Рисунок 1 - Схема метантенка для фермерского хозяйства:

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

В работающем МТ теплота расходуется на потери в окружающую среду и на нагрев свежей порции загружаемой биомассы. В МТ подается необходимое количество теплоты для поддержания постоянной температуры. В результате экзотермических реакций разложения микроорганизмов в СМ образуется теплота.

Для определения тепловой мощности на нагрев СМ необходимо составление теплового баланса МТ

$$Q_{нагр} + Q_{сбр} = Q_{св.бм} + Q_{пот}, \quad (1)$$

где $Q_{нагр}$ – количество подводимой в МТ теплоты, кДж/сут;

$Q_{сбр}$ – количество 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.

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

Поскольку биогаз является смесью метана, диоксида углерода и небольшого количества примесей (до 3%), то коэффициент теплопроводности биогаза определяется с учетом безразмерных поправочных коэффициентов в зависимости от мольных масс, которые характеризуют взаимное влияние компонентов на теплопроводность смеси.

Коэффициент теплоотдачи от крышки к воздуху рассчитывается согласно теории конвективного теплообмена для группы явлений при омывании плоской горизонтальной поверхности потоком жидкости.

Суммарный тепловой поток через наружные поверхности МТ определяется как сумма тепловых потоков через крышку Q_k , цилиндрическую стенку Q_u и днище Q_d

$$Q_{пот} = Q_k + Q_u + Q_d. \quad (2)$$

Для определения коэффициентов теплоотдачи от СМ необходимо определение теплофизических характеристик СМ. Были получены зависимости основных характеристик (коэффициент теплопроводности, коэффициент динамической вязкости, плотность, коэффициент кинематической вязкости, массовая теплоемкость, число Прандтля) сбраживаемой массы от температуры сбраживания и содержания сухого вещества $\varphi(t)$:

$$\lambda_{см} = \lambda_g(t) \frac{2\lambda_g(t) + \lambda_{св} - 2[1 - \varphi(t)] \cdot [\lambda_g(t) - \lambda_{св}]}{2\lambda_g(t) + \lambda_{св} - [1 - \lambda(t)] \cdot [\lambda_g(t) - \lambda_{св}]}, \text{ Вт/ (м}\cdot\text{град);} \quad (3)$$

$$\mu_{см} = \mu_6 \cdot [1 + 2\varphi(t)], \text{ Па}\cdot\text{с}; \quad (4)$$

$$\rho_{см} = \varphi(t) \cdot \rho_{св} + [1 - \varphi(t)] \cdot \rho_6(t), \text{ кг/м}^3; \quad (5)$$

$$\nu_{см} = (\mu_{см} \cdot \rho_{см}) \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2/\text{с}; \quad (6)$$

$$C_{см} = \frac{\varphi(t)C_{св} \cdot \rho_{св} + [1 - \varphi(t)] \cdot C_6(t) \cdot \rho_6(t)}{\rho_{см}(t)}, \text{ кДж/ (кг}\cdot\text{град)}; \quad (7)$$

$$Pr_{см}(t) = \frac{\mu_{см}(t) \cdot C_{см}(t)}{\lambda_{см}(t)}, \quad (8)$$

где $\lambda_{св}$ - коэффициент теплопроводности сухого вещества, Вт/(м·град);

$C_{св}$ - теплоемкость сухого вещества, кДж/ (кг·град).

Нагрев СМ осуществляется теплоносителем, который циркулирует по ЗМ. Как отмечалось, в процессе работы МТ наблюдается налипание органической массы в виде отложений на нагревательный элемент. Несмотря на перемешивание СМ, на ЗМ будет образовываться слой отложений. Исследования показали, что наблюдается неравномерность в толщине отложений по длине ЗМ после перемешивания. Коэффициент теплопроводности этого сухого органического вещества составляет 0,15-0,25 Вт/(м·град), и налипший слой субстрата является дополнительным термическим сопротивлением при теплопередаче от греющего теплоносителя к СМ. Поэтому при исследованиях величины теплового потока от греющего теплоносителя к СМ учитывалось термическое сопротивление слоя отложений на ЗМ.

Процесс теплопередачи от греющего теплоносителя к сбразиваемой 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 сбразиваемой массе.

В условиях, когда нет отложений на наружной стенке ЗМ, третий процесс не учитывается. Тепловой поток $Q_{нагр}$, Вт, для каждого из указанных процессов запишется:

$$Q_{нагр} = \alpha_1 \cdot F \cdot (\overline{t_{cp}} - t_{cp1}); \quad (9)$$

$$Q_{нагр} = \frac{\pi \cdot l}{\frac{1}{2 \cdot \lambda_{зм}} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1}} \cdot (t_{см1} - t_{см2}); \quad (10)$$

$$Q_{нагр} = \frac{\pi \cdot l}{\frac{1}{2 \cdot \lambda_{отл}} \cdot \ln \frac{d_3}{d_2}} \cdot (t_{см2} - t_{отл}); \quad (11)$$

$$Q_{нагр} = \alpha_2 \cdot F \cdot (t_{отл} - t_{см}), \quad (12)$$

где α_1 – коэффициент теплоотдачи от греющего теплоносителя к внутренней стенке ЗМ, Вт/(м²·град);

F – площадь поверхности ЗМ, м²;

$\bar{t}_{ср}$ – средняя температура греющего теплоносителя, °С;

$t_{см1}$ и $t_{см2}$ – температуры соответственно на внутренней и наружной стенке ЗМ, °С;

$t_{отл}$ – температура на поверхности отложений, °С;

$t_{см}$ – температура сбрасываемой массы, °С;

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

d_1 , d_2 , d_3 – соответственно внутренний диаметр ЗМ, наружный диаметр ЗМ, диаметр ЗМ с учетом толщины отложений, м, $d_3 = d_2 + 2 \cdot \delta_{отл}$;

α_2 – коэффициент теплоотдачи от наружной стенки ЗМ к СМ, Вт/(м²·град).

Коэффициент теплоотдачи от греющего теплоносителя к стенке определялся при вынужденной конвекции при течении жидкости внутри ЗМ, а теплоотдача от наружной поверхности ЗМ к СМ рассматривалась в двух режимах: с механическим перемешиванием и при барботаже всплывающих пузырьков газа.

При механическом перемешивании СМ коэффициент теплоотдачи определялся при вынужденной конвекции в условиях омывания трубы потоком жидкости с учетом окружной и радиальной составляющих потока.

На рисунке 2 представлена схема одного кольца ЗМ с направлениями движения составляющих потока СМ.

На рисунке 3 схематически представлено направление окружной и радиальной составляющих потока на фрагменте кольца ЗМ.

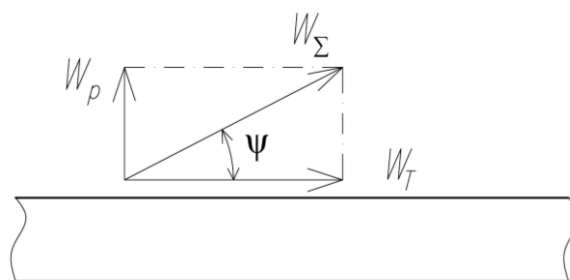
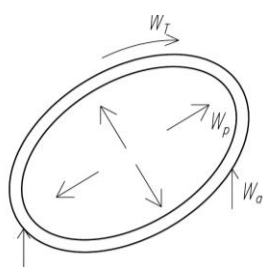
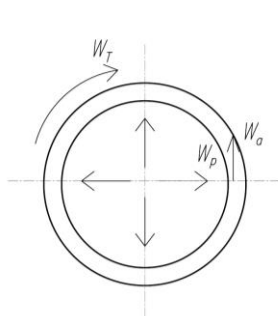


Рисунок 2 – Схема омывания витка змеевика потока СМ:

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

Рисунок 3 – Схема направлений скоростных потоков СМ относительно трубы змеевика:

w_T - окружная составляющая скорости потока СМ, м/с,
 w_p - радиальная составляющая скорости потока СМ, м/с,
 Ψ - угол омывания трубы ЗМ

Анализ распределения скоростей (Рис. 3), выполненный для фрагмента кольца ЗМ, с учетом правила сложения векторов, показал, что суммарный поток СМ имеет скорость:

$$w_{\Sigma} = \sqrt{w_m^2 + w_p^2}, \text{ м/с.} \quad (13)$$

Во втором варианте для нахождения коэффициента теплоотдачи рассчитывали скорость перемешивания СМ пузырьками биогаза по формуле, полученной в результате разработки математической модели процессов теплообмена в условиях барботажа биогаза.

Скорость всплытия пузырька биогаза определяется по уравнению

$$W_{\text{вспл}} = \left[g \cdot \frac{\bar{d}}{2} \cdot \frac{\rho_{\text{см}} - \rho_{\text{био}}}{\rho_{\text{см}} + \rho_{\text{био}}} + \frac{2 \cdot \sigma}{\bar{d} \cdot (\rho_{\text{см}} + \rho_{\text{био}})} \right]^{\frac{1}{2}}, \text{ м/с,} \quad (14)$$

где g - ускорение силы тяжести, м/с²;

$\rho_{\text{см}}$ - плотность СМ при температуре сбраживания, кг/м³;

$\rho_{\text{био}}$ - плотность биогаза в пузырьке, кг/м³;

σ - поверхностное натяжение СМ, Н/м;

\bar{d} - средний диаметр пузырька биогаза, м.

Разработанные математические модели тепломассообменных процессов в МТ необходимо проверить на адекватность экспериментальным путем.

По разработанной математической модели тепломассообменных процессов в МТ определено, что на требуемое количество тепла, необходимое для

поддержания температуры СМ, влияет термическое сопротивление слоя отложений и величина теплопотерь МТ в окружающую среду, то есть температура наружного воздуха. Следовательно, факторами, определяющими температуру греющего теплоносителя, являются толщина отложений на поверхности нагрева и температура окружающей среды.

В третьей главе проведены исследования по определению температуры греющего теплоносителя в зависимости от температуры наружного воздуха и толщины отложений на нагревательном элементе для подтверждения адекватности разработанной аналитической математической модели тепломассообмена в МТ. Была создана экспериментальная установка (Рис. 4, 5) для получения данных опытным путем. При создании экспериментальной установки были созданы условия для подобия процессов в этой установке и объекте моделирования – метантенке, а именно: соблюдалось геометрическое подобие; явления в установке и объекте моделирования описываются одинаковыми уравнениями; соблюдалось физическое подобие – физические параметры и коэффициенты, входящие в эти уравнения, одинаковы.



Рисунок 4 – Экспериментальная установка МТ

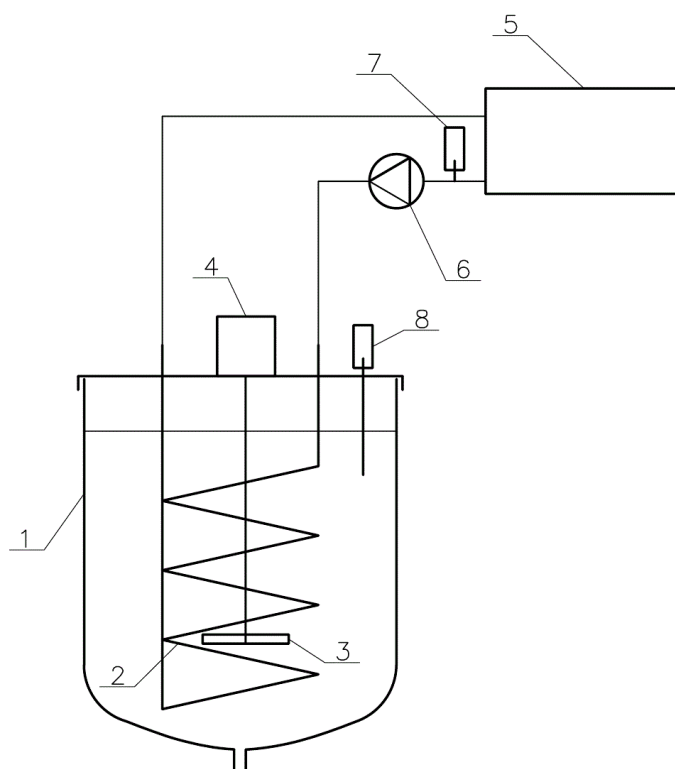


Рисунок 5 – Схема экспериментальной установки:

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 – термометр электрический

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. Также для измерения температуры окружающего воздуха использовался электронный термометр Т-0,36DS. Два раза в сутки сбраживаемая масса перемешивалась мешалкой.

Исследования проводились с отходами крупного рогатого скота (КРС). За время проведения опытов (9 месяцев) на поверхности змеевика наблюдалось образование отложений твердой фракции субстрата. Средняя толщина отложений по всей длине змеевика составляла 2-2,5 мм. На рисунке 6 показано фото отложений на змеевике.



Рисунок 6 – Отложения на наружной поверхности змеевика

По результатам эксперимента построена зависимость (Рис. 7) влияния колебаний температуры наружного воздуха и толщины отложений на требуемую температуру греющего теплоносителя.

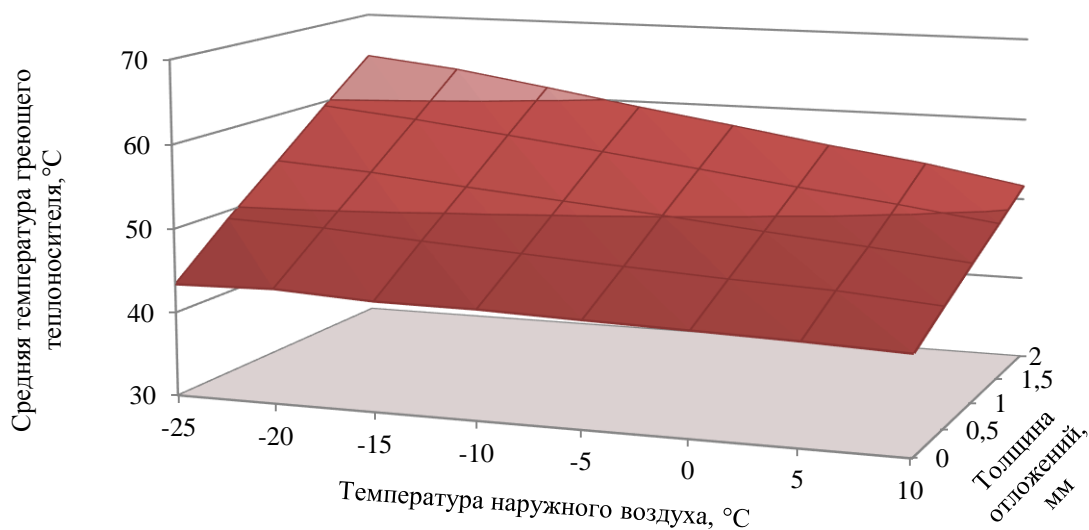


Рисунок 7 – Зависимость температуры греющего теплоносителя от толщины отложений и колебаний температуры наружного воздуха

Из приведенной зависимости следует, что чем ниже температура окружающего воздуха и больше толщина отложений, тем выше должна быть температура греющего теплоносителя на входе в змеевик.

На рисунке 8 представлено факторное пространство проводимого полного двухфакторного эксперимента первого порядка с равностоящими уровнями.

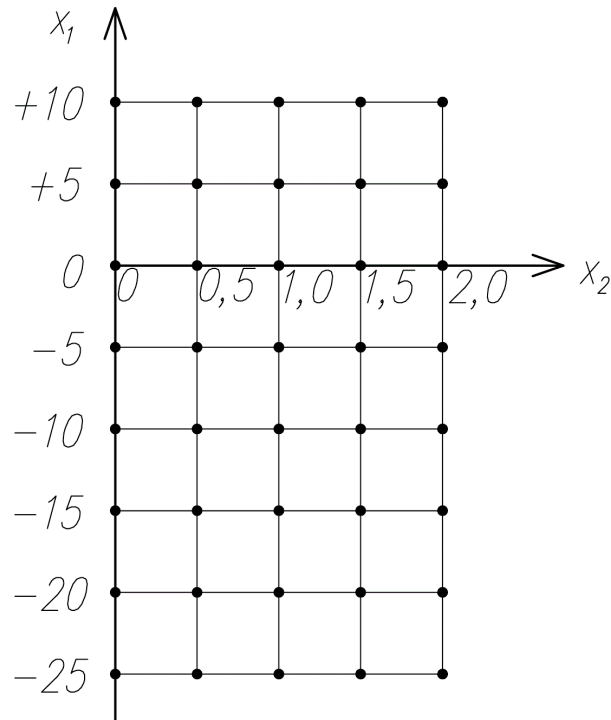


Рисунок 8 – Факторное пространство эксперимента

Фактор x_1 – температура наружного воздуха, °С. Фактор x_2 – толщина отложений, которая изменяется, мм. В каждой узловой точке факторного пространства было рандомизированно проведено по три опыта, по каждому из 2-х факторов, в итоге получили 40 опытов.

В ходе планирования эксперимента была получена экспериментально-статистическая математическая модель

$$y_p = 61,1 - 7,62x'_1 + 15,55x'_2 - 5,42x'_1x'_2, \quad (15)$$

где x'_1, x'_2 - безразмерные значения переменных.

Адекватность полученной математической модели экспериментальным данным проверялась при помощи критерия Фишера.

При уровне значимости $\alpha=0,05$ табличное значение числа Фишера $F_{\text{табл}(0,05;3;36)} = 2,866$, экспериментальное значение числа Фишера $F_{\text{эксп}} = 0,006$. Так как $F_{\text{эксп}} < F_{\text{табл}}$, следовательно, полученная статистическая модель является адекватной.

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

$$y_p = 44,62 - 0,12x_1 + 13,18x_2 - 0,31x_1 \cdot x_2. \quad (16)$$

С целью проверки адекватности полученной экспериментально-статистической модели проведены сравнения данных, посчитанных по

уравнению (16) с данными, полученными в ходе экспериментальных исследований, при различной толщине отложений.

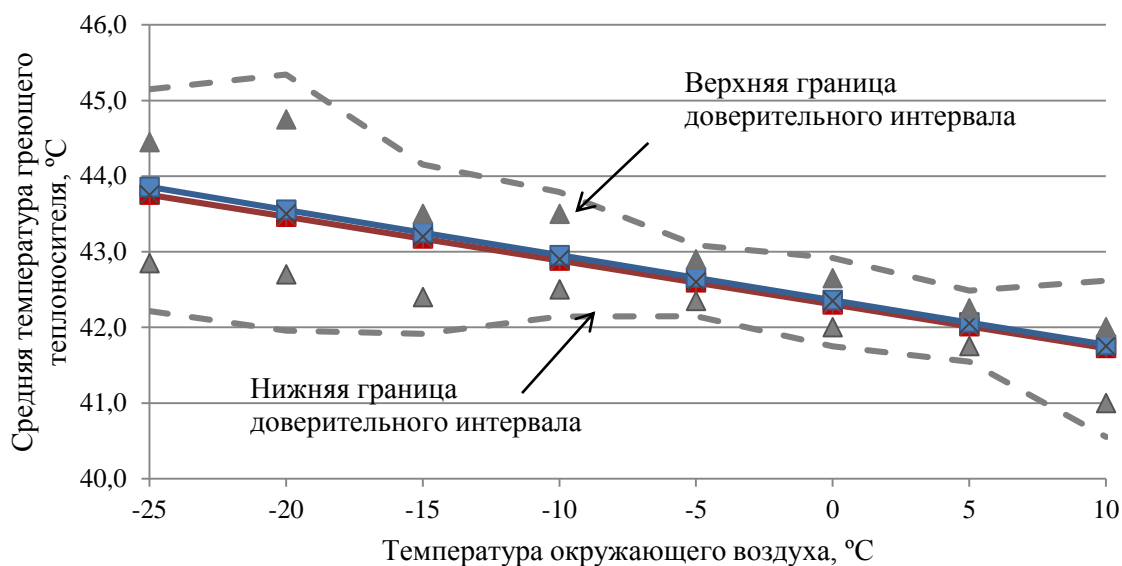


Рисунок 9 - Сравнение расчетных и опытных значений температуры греющего теплоносителя без слоя отложений:

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

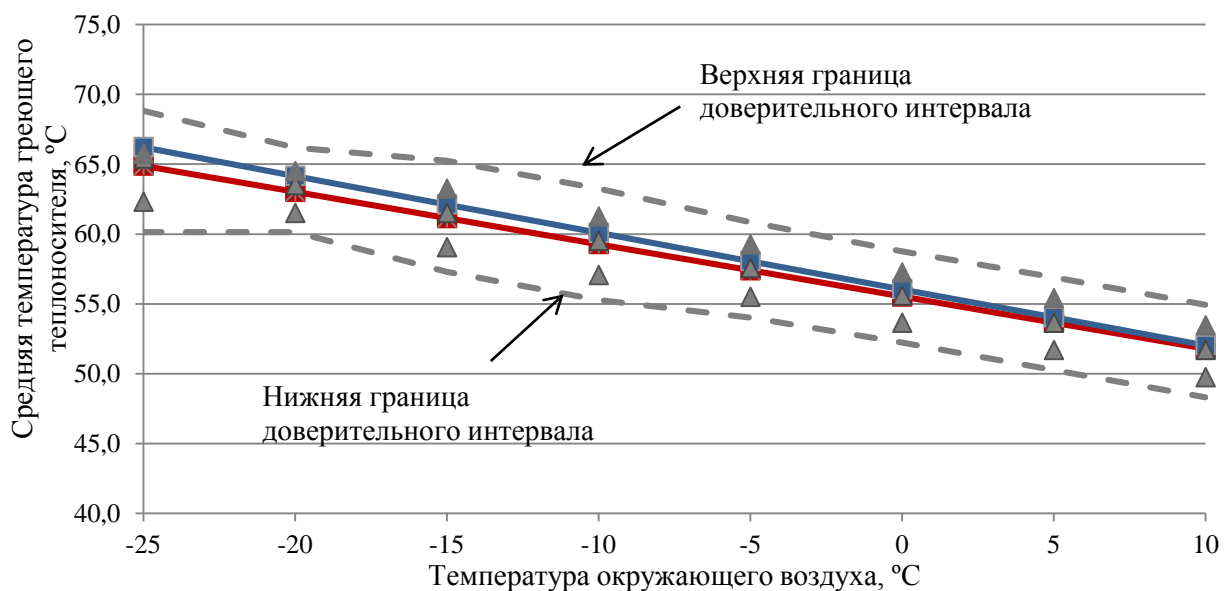


Рисунок 10 - Сравнение расчетных и опытных значений температуры греющего теплоносителя при толщине слоя отложений 2,0 мм:

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

Подобные расчеты проводились при толщине отложений 0,5 мм, 1 мм, 1,5 мм. Результаты сравнений имели аналогичный характер, как и при толщине отложений 2 мм. Из графиков, приведенных на рисунках 9 и 10, видно, что значения температуры греющего теплоносителя, полученные по уравнениям как аналитической, так и экспериментально-статистической математической модели, попадают в доверительный интервал и сходятся со значениями, полученными экспериментальным путем.

Для проведения численных исследований интенсивности теплообмена в МТ и практических расчетов при проектировании биогазовых установок разработана компьютерная программа «Метантенк» для автоматизированного расчета габаритных размеров и теплотехнических параметров МТ, а также для расчета объема выхода биогаза в зависимости от количества голов животных и других технологических факторов. Программа основана на формулах аналитической модели. Алгоритм программы «Метантенк» приведен на рисунке 11.

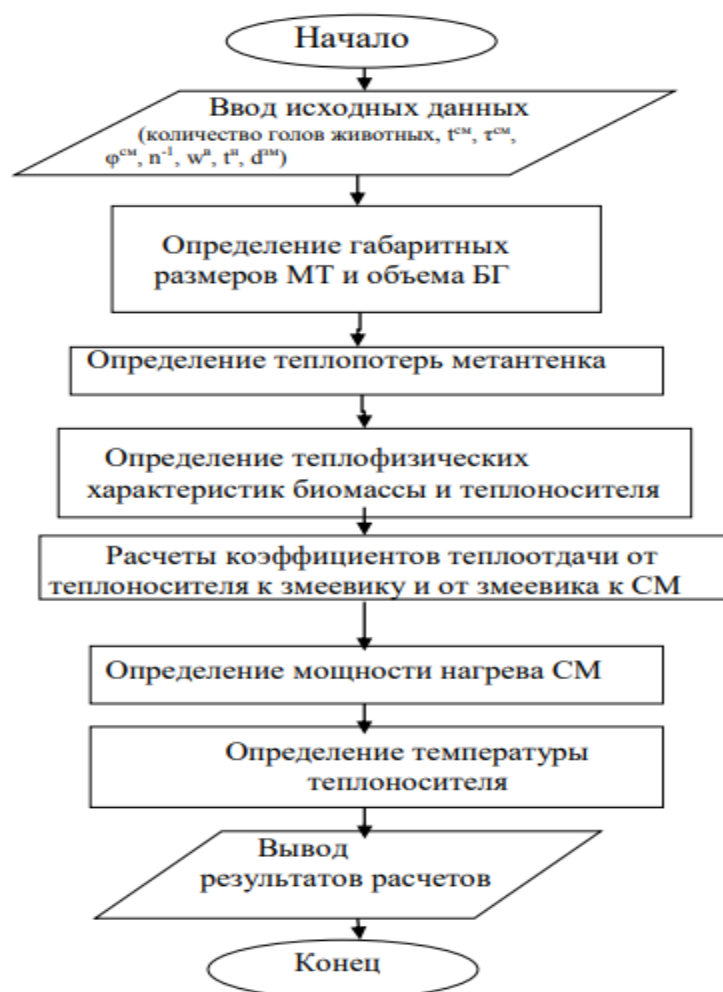


Рисунок 11 - Алгоритм программы «Метантенк»

Программа создана на базе программного пакета Microsoft Office Excel с использованием элементов языка программирования Visual Basic (Рис. 12).

Рисунок 12 – Интерфейс программы «Метантенк»

Программа «Метантенк» решает следующие задачи:

- позволяет рассчитать основные габаритные размеры МТ в зависимости от количества голов животных и технологических требований процесса 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.

В четвертой главе экономически обоснована разработанная интенсификация теплообмена в МТ за счет регулирования температуры греющего теплоносителя. Для сравнения был произведен расчет двух вариантов. В соответствии с данными, приведенными в литературе, температура воды на входе в змеевик принимается $t_{вх} = 60^{\circ}\text{C}$, на выходе из змеевика $t_{вых} = 40^{\circ}\text{C}$ (вариант 1). В варианте 2 температура греющего теплоносителя определяется по аналитической модели, предложенной во втором разделе, в зависимости от температуры наружного воздуха и толщины отложений на ЗМ. Расчет производился для фермерского хозяйства, расположенного в Амвросиевском районе, в котором имеется 100 голов КРС.

Для фермерского хозяйства с одинаковыми исходными данными определялось количество получаемого биогаза при различной температуре наружного воздуха в зависимости от месяца года и при толщине отложений на ЗМ 2 мм.

По результатам расчета построены графики средней температуры СМ внутри МТ в зависимости от месяца года при толщине отложений 2 мм (Рис. 13), а также график среднесуточного выхода биогаза в зависимости от средней температуры в МТ на протяжении всего года (Рис. 14). Выход биогаза с 1 кг сухого вещества составляет $0,46 \text{ м}^3$.

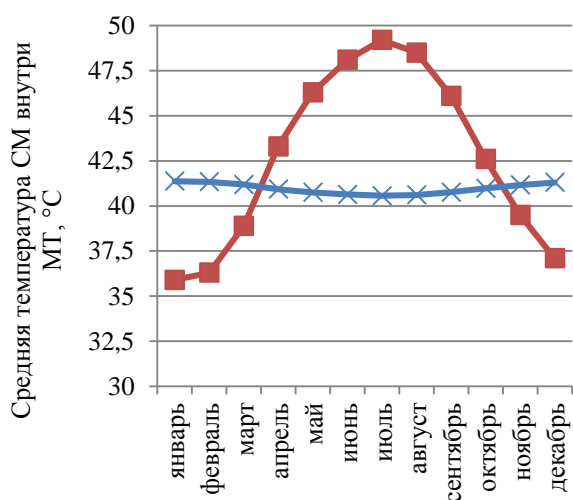


Рисунок 13 – Зависимость средней температуры внутри МТ от месяца года

—■— без регулирования температуры теплоносителя
—×— с регулированием температуры теплоносителя

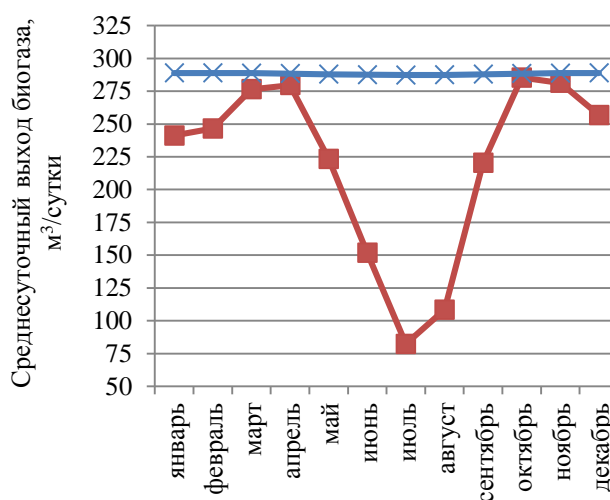


Рисунок 14 – Зависимость среднесуточного выхода биогаза от месяца года

Определен экономический эффект от предлагаемого метода интенсификации теплообмена в МТ, в результате использования которого увеличение товарного количества биогаза составляет $26817,7 \text{ м}^3/\text{год}$, что составляет 32,2% от годового объема получаемого биогаза.

Для определения себестоимости производства биогаза был выполнен сметный расчет стоимости строительства биогазовой установки с МТ предложенной конструкции. По результатам расчета себестоимость 1 м^3 получаемого биогаза составит 1,65 руб. Сжигание биогаза в теплогенерирующей установке для нагрева греющего теплоносителя, расходуемого на нужды фермерского хозяйства и биогазовой установки, позволит заменить $52903,2 \text{ м}^3$ природного газа, что приводит к экономическому

эффекту 208,305 тыс. руб. в год. Срок окупаемости биогазовой установки составит 5,8 лет.

Выполненная оценка экологической эффективности предложенной установки для производства биогаза показала, что применение анаэробной технологии переработки биомассы приводит к снижению выбросов CH_4 и N_2O в атмосферу на 12,4 тонн CO_2 -эквивалента в год.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена прикладная научно-техническая задача по интенсификации процессов теплообмена 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 теплообмена в условиях отсутствия механического перемешивания сбраживаемой массы и барботажа 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 CO₂-эквивалента в год.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- публикации в специализированных научных изданиях, рекомендованных МОН Украины:

1. Чеботарёва, О. В. Теплообмен с окружающей средой метантенка для сбраживания биомассы / О.В. Чеботарева, В.А. Сербин, **Н.В. Колосова** [Текст] // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. «Инженерные системы и техногенная безопасность». – 2010. – Вып. 2010–6(86). – С. 31 - 36. *(разработана математическая модель теплообмена метантенка с окружающей средой)*.

2. **Колосова, Н.В.** Процессы теплообмена в метантенке при сбраживании биомассы / Н.В. Колосова, О.В. Чеботарева, В.А. Сербин [Текст] // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. «Инженерные системы и техногенная безопасность». –2011. – Вып. 2011–5(91). – С. 31-37. *(разработана математическая модель теплопередачи между греющим теплоносителем и сбраживаемой массой при механическом перемешивании)*.

3. Сербин, В.А. Особенности теплообмена в метантенке при сбраживании неперемешиваемой биомассы / В.А. Сербин, О.В. Чеботарева, **Н.В. Колосова** [Текст] // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. «Инженерные системы и техногенная безопасность». –2012. –

Вып. 2011–2(94). – С. 42-48. *(разработана математическая модель теплообмена в МТ при барботаже сбраживаемой массы)*.

4. Чеботарева, О.В. Температурный режим сбраживаемой массы при загрузке в метантенк свежей порции отходов / О. В. Чеботарева, В. А. Сербин, **Н.В. Колосова** [Текст] // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. «Инженерные системы и техногенная безопасность». – 2013. – Вып. 2013–5(103). – С. 26-29.*(разработана методика определения температуры смеси после ввода в метантенк свежей порции органической массы)*

5. **Колосова, Н.В.** Оценка выбросов парниковых газов при хранении отходов животноводческих ферм / Н.В. Колосова, С.И Монах [Текст] // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. «Инженерные системы и техногенная безопасность». – 2015. – Вып. 2015–5(115). – С. 49-52. *(выполнена оценка влияния выбросов парниковых газов при хранении отходов животноводства)*.

- публикации в специализированных научных изданиях, рекомендованных МОН ДНР:

6. **Колосова, Н.В.** Математическая модель теплообмена при получении биогаза в метантенке / Н.В. Колосова, С.И Монах [Текст] // «Современное промышленное и гражданское строительство». –2019 – Т.15, №2. – С. 68-74. *(разработана математическая модель теплообмена в метантенке)*.

- патенты

7. **Колосова, Н.В.** Патент на полезную модель №90880 Украина, F24H 4/00. Біогазова установка з системою утилізації тепла [Текст] / Монах С.И., Д.В. Выборнов; заявл. 27.01.2014; опубл. 10.06.2014, бюл. № 11.

– публикации в других изданиях:

8. **Колосова, Н.В.** Использование биогаза в фермерском хозяйстве / Н.В. Колосова, В.А. Сербин // Сборник тезисов докладов и сообщений IX Международной научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. - Макеевка: ДонНАСА. - 2010. – С. 43. *(рассматривается применение биогаза в фермерском хозяйстве)*

9. **Колосова, Н.В.** Альтернативное газоснабжение фермерского хозяйства / Н.В. Колосова, В.А. Сербин // II Международная научно – практическая конференция «Научно – техническое творчество молодежи – путь к обществу, основанному на знаниях»: Сборник научных докладов. М.: МГСУ.-

2010. – С. 261 – 263. *(приводится зависимость доли выхода биогаза от длительности сбраживания).*

10. **Колосова, Н.В.** Вплив технологічних факторів на утворення, склад і якість біогазу при зброджуванні у метантенку відходів тваринницьких ферм / Н.В. Колосова, В.А. Сербин // Энергетика та системикерування: матеріали III Міжнародної конференції молодих вчених ЕРЕС-2011., Нац. ун-т «Львівська політехніка» - Л.:Видавництво Львівської політехніки. - 2011. – С. 120-123. *(программа расчетов определения количества и качества биогаза).*

11. **Колосова, Н.В.** Влияние технологических факторов на габаритные размеры биогазовой установки / Н.В. Колосова, С.И. Монах //Материалы международной научно-практической конференции «Строительство-2013» проблемы и перспективы развития современных инженерно-экологических систем. - Ростов-на-Дону, - 2013. - С. 130 -131. *(оценка влияния технологических факторов на габаритные размеры биогазовой установки).*

12. **Колосова, Н.В.** Повышение энергоэффективности биогазовой установки путем утилизации теплоты потока биогаза в тепловом насосе / Н.В. Колосова, С.И. Монах // Сборник тезисов докладов подготовленных по материалам IV Международной конференции «Научно-методическое и практическое обеспечение градостроительства, территориального и стратегического». - Макеевка: издательство ДонНАСА, - 15-16 мая 2014. - С 98-100. *(схема утилизации теплоты потока биогаза в тепловом насосе).*

13. **Колосова, Н.В.** Влияние толщины отложений на змеевике метантенка на интенсивность теплоотдачи к сбраживаемой биомассе / 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. *(определение влияния толщины отложений сбраживаемой массы на змеевике на интенсивность теплоотдачи).*