

УДК: 66.069.82

UDC: 66.069.82

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
МАЛОГО БИОРЕАКТОРА С СИСТЕМОЙ
БАРБОТАЖНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ И
КАТАЛИТИЧЕСКОГО ОБОГРЕВА**

**AN EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE
SMALL BIOREACTOR WITH THE BUBBLE
MIXING SYSTEM AND CATALYTIC HEATING**

Онучин Евгений Михайлович
к.т.н., доцент

Onychin Evgeny Mihailovich
Cand.Tech.Sci., assistant professor

Медяков Андрей Андреевич
аспирант

Medyakov Andrei Andreevich
postgraduate student

Каменских Александр Дмитриевич
аспирант

Kamenskih Aleksandr Dmitrievich
postgraduate student

Анисимов Павел Николаевич
студент
*Марийский государственный технический
университет, Йошкар-Ола, Россия*

Anisimov Pavel Nikolaevich
student
Mari State Technical University, Ioshkar-Ola, Russia

В статье дан обзор результатов
экспериментального исследования малого
биореактора с системой барботажного
перемешивания и каталитического обогрева.
Рассмотрены способы повышения эффективности
биогазовых установок

The article reviews the results of an experimental
research of a small bioreactor with bubble mixing
system and catalytic heating. The methods improving
the efficiency of biogas plants are considered there

Ключевые слова: БИОГАЗОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ,
КАТАЛИТИЧЕСКИЙ ОБОГРЕВ,
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ,
ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС

Keywords: BIOGAS TECHNOLOGY, CATALYTIC
HEATING, MATHEMATIC SIMULATION, HEAT
BALANCE

Для повышения эффективности биогазовых установок в работах [1,3,6,7] предлагается комплексное решение задач перемешивания и обогрева с использованием каталитических обогревательных устройств. В предложенной установке для барботажного перемешивания сбраживаемого субстрата используется смесь уходящих после процесса горения газов и вырабатываемого в установке биогаза. В статьях [4,5] авторами приводятся теоретические исследования особенностей функционирования каталитического подогревателя при обогреве биореактора для анаэробного сбраживания органических отходов. В работе [2] рассматриваются особенности процессов теплового перемешивания при анаэробном сбраживании органических отходов.

Для подтверждения работоспособности предложенных схемно-конструктивных решений системы барботажного перемешивания и

каталитического обогрева и проверки на практике адекватности разработанных математических моделей летом-осенью 2011 г. на базе Центра коллективного пользования «Экология биотехнологии и процессы получения экологически чистых энергоносителей» ФГБОУ ВПО «Марийский государственный технический университет» были проведены экспериментальные исследования натурно реализованного биореактора с системой барботажного перемешивания и каталитического обогрева.

Для решения поставленных задач была проведена серия опытов на натурно реализованном малом биореакторе с системой барботажного перемешивания и каталитического обогрева, в рамках которой имитировался цикл работы установки при различных технологических параметрах процесса переработки.

На рисунке 1 представлена схема функционирования биореактора с системой барботажного перемешивания и каталитического обогрева.

В систему барботажного перемешивания и каталитического обогрева через запорные краны 1 подается газообразный теплоноситель либо из биореактора при барботажном перемешивании субстрата нагретым газом, либо из тепловой прослойки при обогреве без перемешивания, либо из атмосферы при выставлении теплового режима системы. Затем теплоноситель проходит через водяной фильтр 2, что обусловлено возможностью уноса из биореактора частиц органических отходов, и поступает в компрессор 3, в котором создается давление для преодоления сопротивления трубопроводов, арматуры и гидростатическое давление воды. Расход газообразного теплоносителя регулируется с помощью регулировочного клапана 4 и фиксируется с помощью ротаметра 5, расположенного после компрессора.

Затем теплоносителя подается в зону смешивания с уходящими после процесса окисления газами, однако с помощью регулировочного

клапана 6 часть теплоносителя может быть направлена в зону подачи топлива и кислорода.

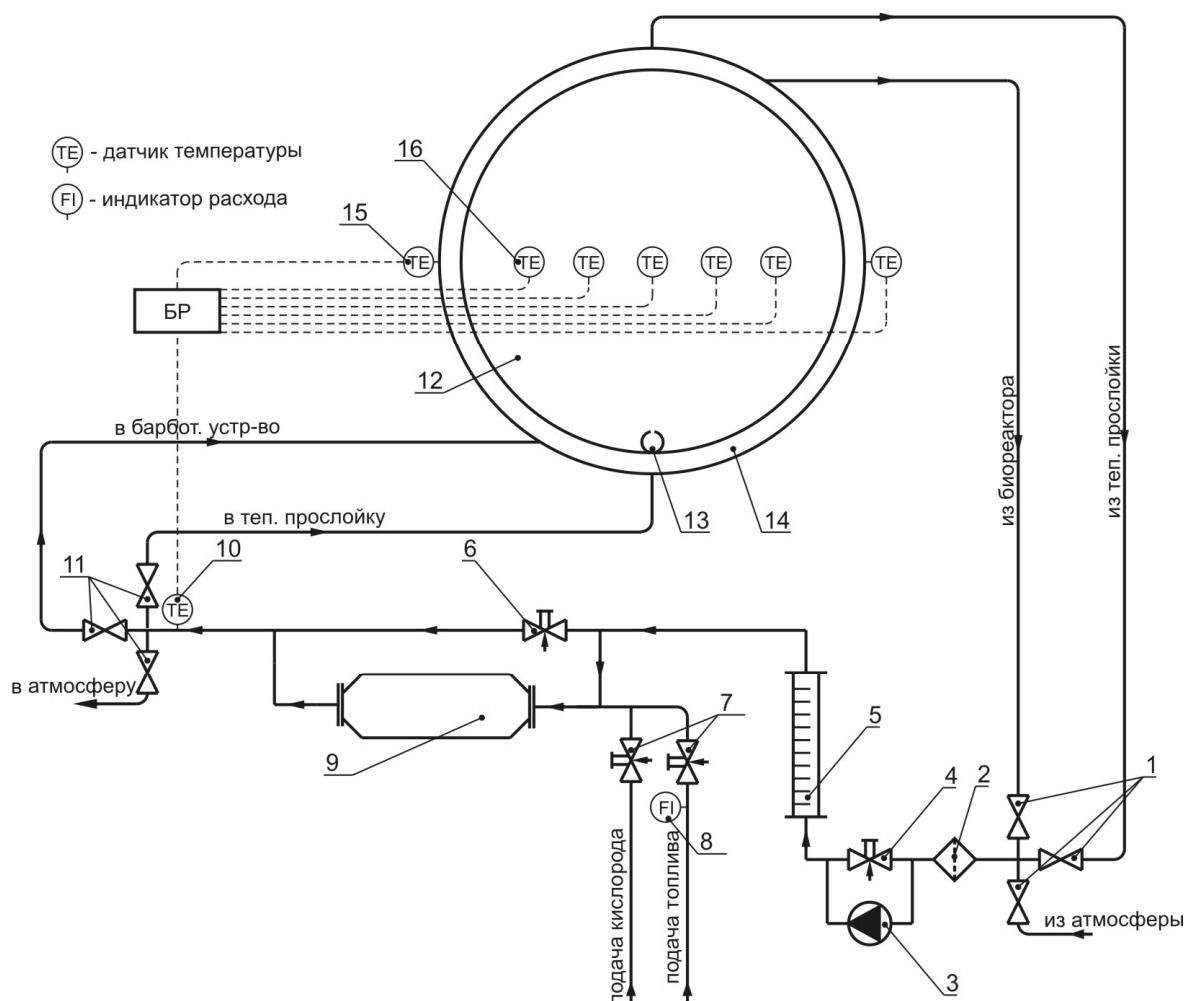


Рисунок 1 – Схема функционирования биореактора с системой барботажного перемешивания и каталитического обогрева

Количества подаваемых топлива и кислорода регулируются с помощью регулировочных клапанов 7 и расход топлива регистрируется с помощью расходомера 8. Топливо-кислородная смесь подается в каталитический источник тепла 9, в котором происходит реакция низкотемпературного окисления. Затем уходящие после процесса окисления газы смешиваются с газообразным теплоносителем. Температура полученной смеси контролируется с помощью датчика температуры 10. С помощью запорных кранов 11, нагретый газообразный

теплоноситель подается либо в барботажное устройство 13 биореактора 12, либо в тепловую прослойку 14, либо в атмосферу. Для контролирования температуры тепловой прослойки используются датчики температуры 15. Для регистрирования распределения температуры в биореакторе используются датчики температуры 16. Датчики температуры подключаются к блоку регистрации БР, который позволяет сохранять данные о значениях температуры в определенный момент времени на ПЭВМ.

Натурно реализованный в соответствии с приведенной схемой биореактор с системой барботажного перемешивания и каталитического обогрева представлен на рисунках 2 и 3.



Рисунок 2 - Натурно реализованный биореактор с системой барботажного перемешивания и каталитического обогрева



Рисунок 3 - Натурно реализованный биореактор с системой барботажного перемешивания и каталитического обогрева

При натурной реализации биореактор был изготовлен из полиэтиленовой емкости объемом 0,2 м³, для транспортировки теплоносителя использовался компрессор HAILEA ASCO-450, для фиксирования расхода газообразного теплоносителя использовался ротаметр РМ-04-16 гуз, для подачи и регулирования расхода кислорода и газообразного топлива использовалась безинжекторная горелка НОКЕ-JEWEL G-14.123, для измерения расход газообразного топлива использовался счетчик ИРГ-1000, для измерения температуры использовались датчики ОВЕН ДТС034-50М, для регистрации показания датчиков использовались модуль ввода аналоговый ОВЕН МВА8, преобразователь интерфейсов АС4 и персональный компьютер.

Каталитический источник тепла был изготовлен из катализатора заводского производства с монолитной подложкой-носителем из мелкоффрированной металлической фольги и с каталитическим покрытием платиной, палладием и родием. Трубопроводы и запорная арматура представляли собой стандартные сантехнические изделия.

Входные регулируемые факторы натурального эксперимента были выбраны на основании результатов теоретических исследований. Диаметр биореактора составлял 0,5 м, удельное количество отверстий 1000 шт./м³, температура окружающей среды соответствовала температуре в помещении и составляла в среднем 21°С.

Таким образом, в качестве входных регулируемых факторов натурального эксперимента были выбраны технологические параметры процесса переработки (интенсивность перемешивания субстрата, температура нагретого барботируемого газа, температура тепловой прослойки). Диапазон варьирования интенсивности перемешивания субстрата составлял 0,24-0,29 (при пересчете на расход барботируемого газа – 160-200 л/мин).

Диапазон варьирования температуры нагретого барботируемого газа составлял 60-80°С, причем верхняя граница диапазона был снижен по сравнению с вычислительным экспериментом во избежание разрушения уплотнительных материалов, использованных при создании установки, а нижняя граница был завышен для исключения ситуаций, при которых расход газообразного топлива находится ниже диапазона измерения счетчика. Диапазон варьирования температуры тепловой прослойки составлял 30-50°С, повышение нижней границы диапазона аналогично предыдущему. Однако диапазон варьирования входных регулируемых факторов позволяет исследовать область значений вблизи рациональных параметров системы перемешивания и обогрева, полученных при математическом моделировании.

Выходными величинами натурального эксперимента являлись отклонение средней температуры в биореакторе от оптимальной (*откл T_{ср}*), среднее квадратичное отклонения температуры в биореакторе (*СКО*) и потребление газа системой барботажного перемешивания и каталитического обогрева (*V_{газа}*).

В соответствии с выбранными диапазонами варьирования входных величины был составлен план экспериментальных исследований на натурно реализованном биореакторе с системой барботажного перемешивания и каталитического обогрева, представленный в таблице 1.

Таблица 1 План экспериментальных исследований на натурно реализованном биореакторе с системой барботажного перемешивания и каталитического обогрева

№	Интенсивность перемешивания органических отходов	Температура барботируемого газа, °С	Температура тепловой прослойки, °С
1	0,24	60	30
2			40
3			50
4		70	30
5			40
6			50
7		80	30
8			40
9			50
10	0,29	60	30
11			40
12			50
13		70	30
14			40
15			50
16		80	30
17			40
18			50

Для проведения исследований были использованы навозные стоки животноводческого комплекса КРС, приведенные к влажности 90%.

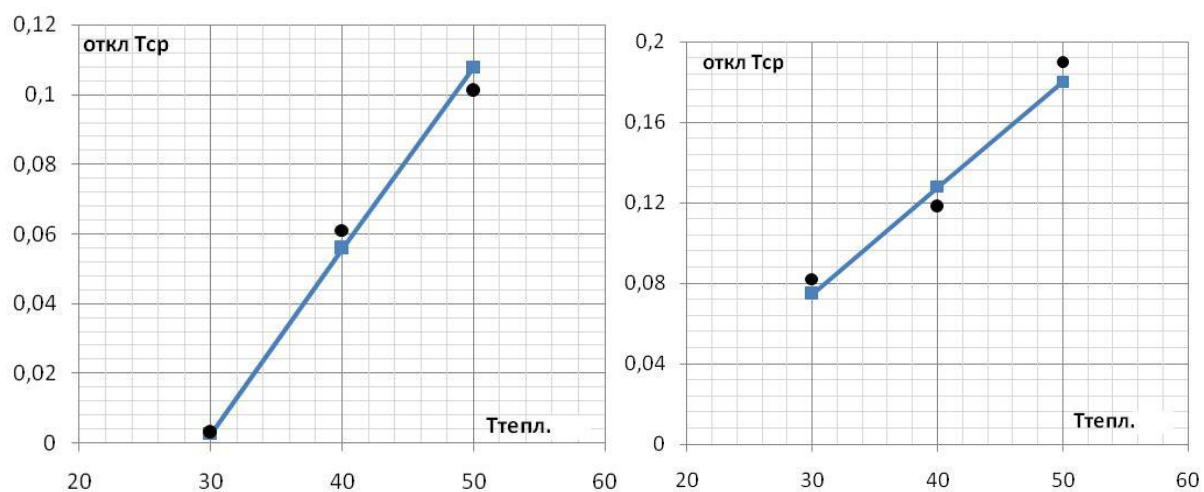
Сначала имитировалось по 5 циклов работы для 3 различных опытов. После этого данные обрабатывались, и определялась надежность оценки отклика, которая оказалась достаточной (0,90). Таким образом, было принято, что 5 измерений для каждого опыта является достаточным.

Для подтверждения работоспособности предложенных схемно-конструктивных решений для каждого опыта определялся выход биогаза.

Таким образом, натурно реализованный биореактор с системой барботажного перемешивания и каталитического обогрева позволяет с использованием разработанного плана экспериментальных исследований проверить адекватность математической модели функционирования малого биореактора с системой барботажного перемешивания и каталитического обогрева и подтвердить работоспособность предложенных схемно-конструктивных решений системы барботажного перемешивания и каталитического обогрева.

Анализ результатов

По результатам экспериментальных исследований было произведено сравнение расчётных и экспериментальных данных, графики сравнения представлены на рисунках 4 - 6. Расхождение между теоретическими и экспериментальными данными находится в пределах 10%.



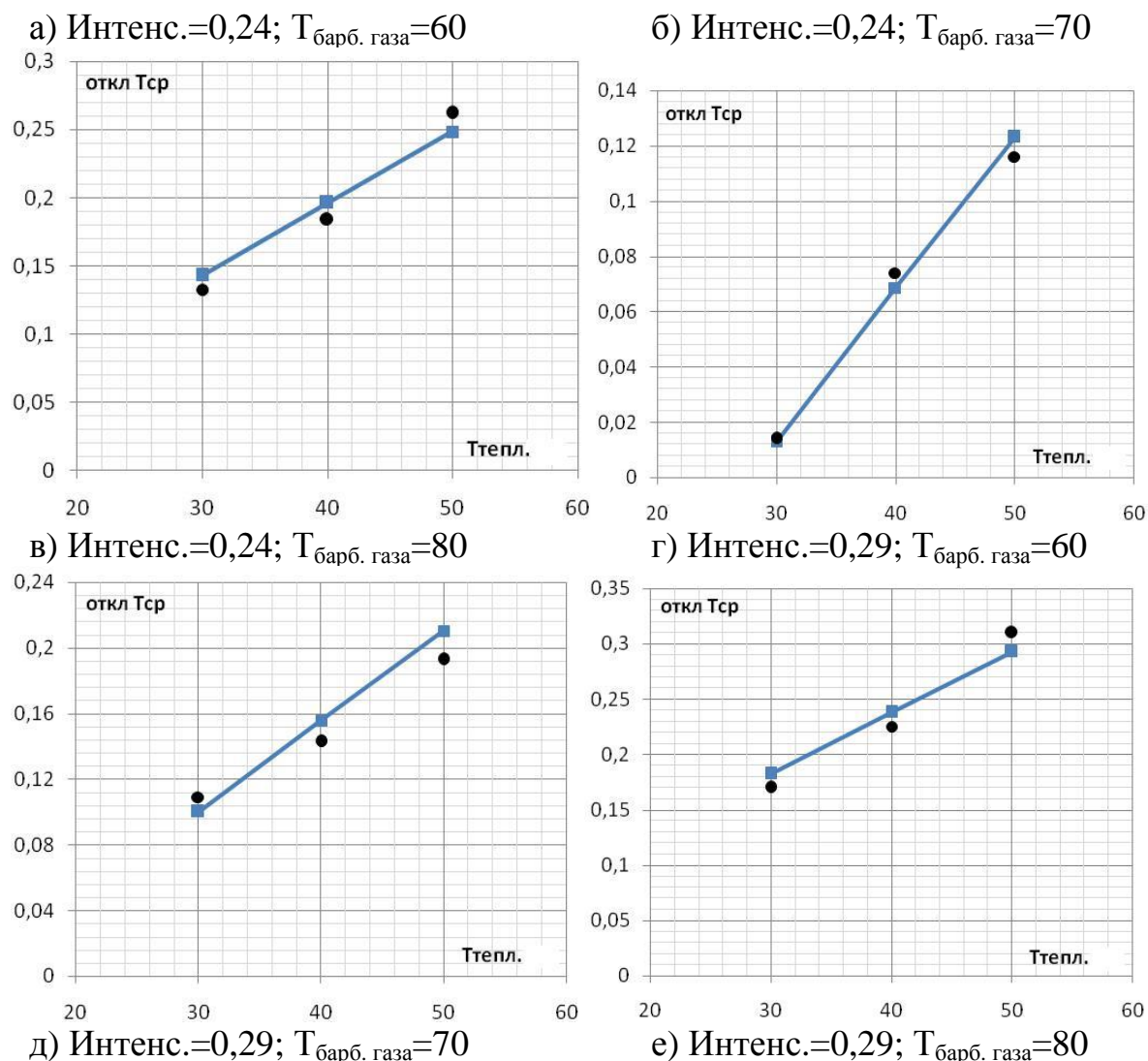
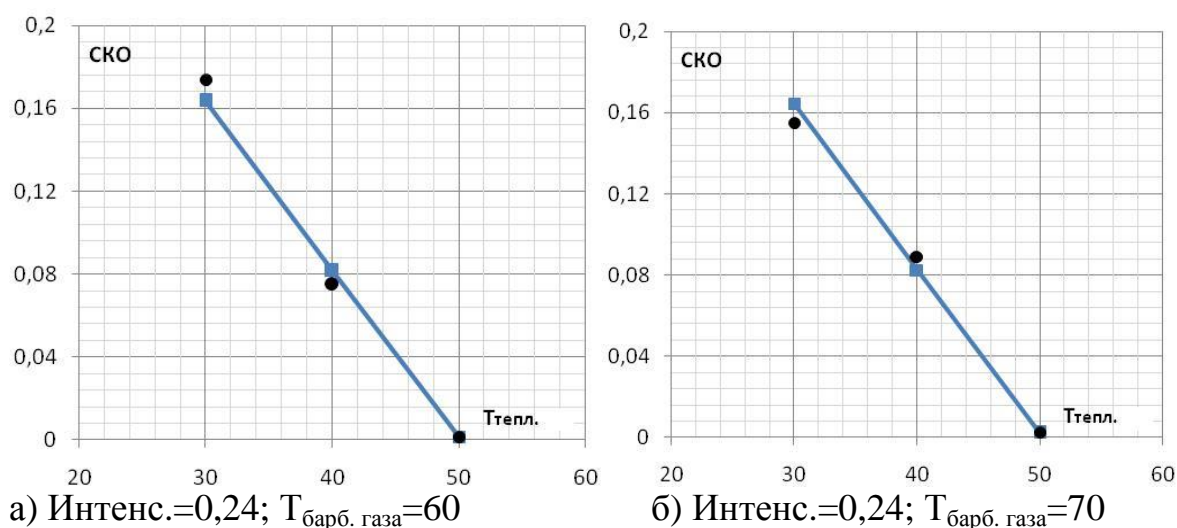


Рисунок 4 - Графики зависимости отклонение средней температуры в биореакторе от оптимальной (откл Тср) от температуры тепловой прослойки (Ттепл.):

• - экспериментальные данные;
 —■— значения, полученные с помощью математической модели.



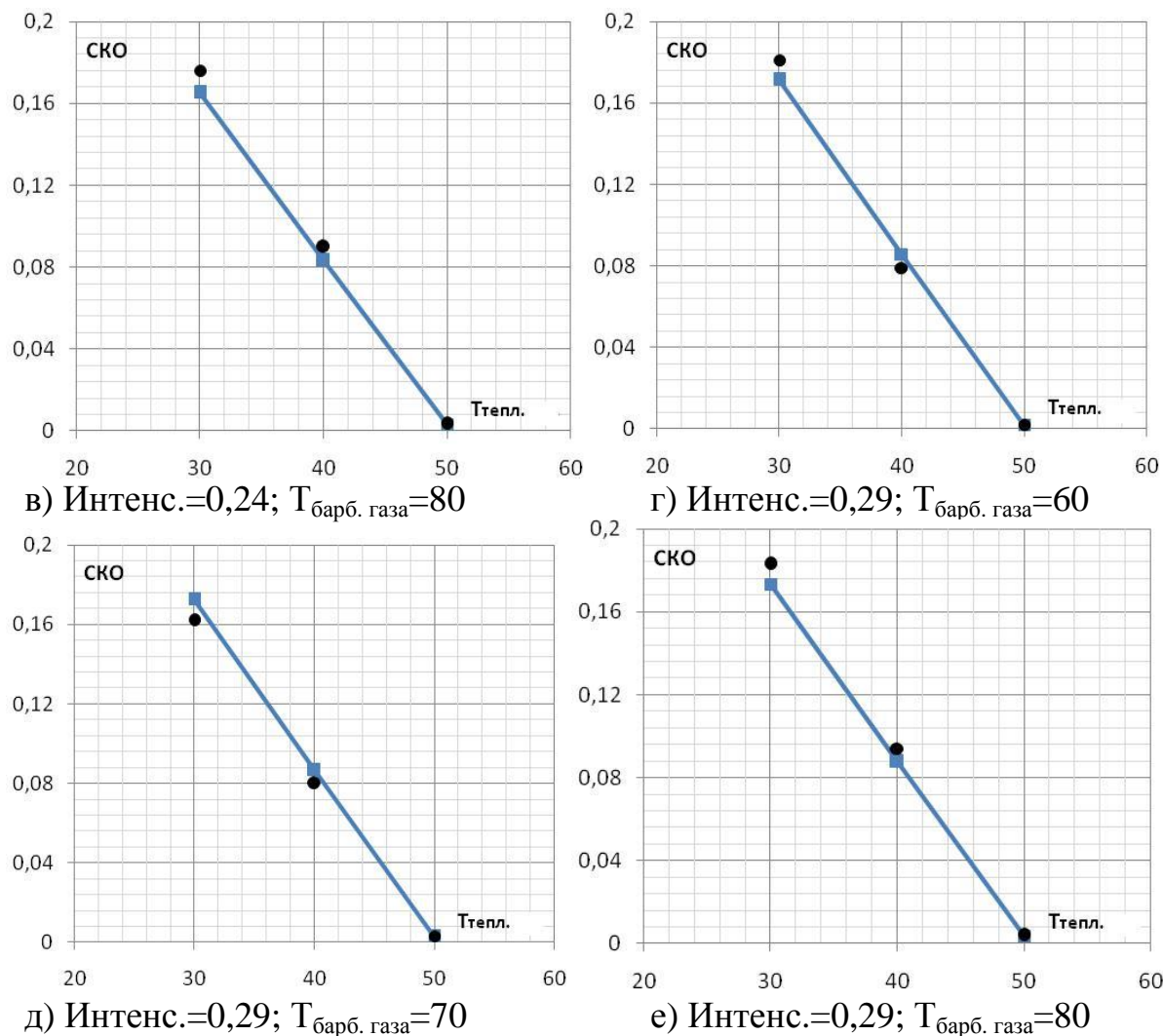
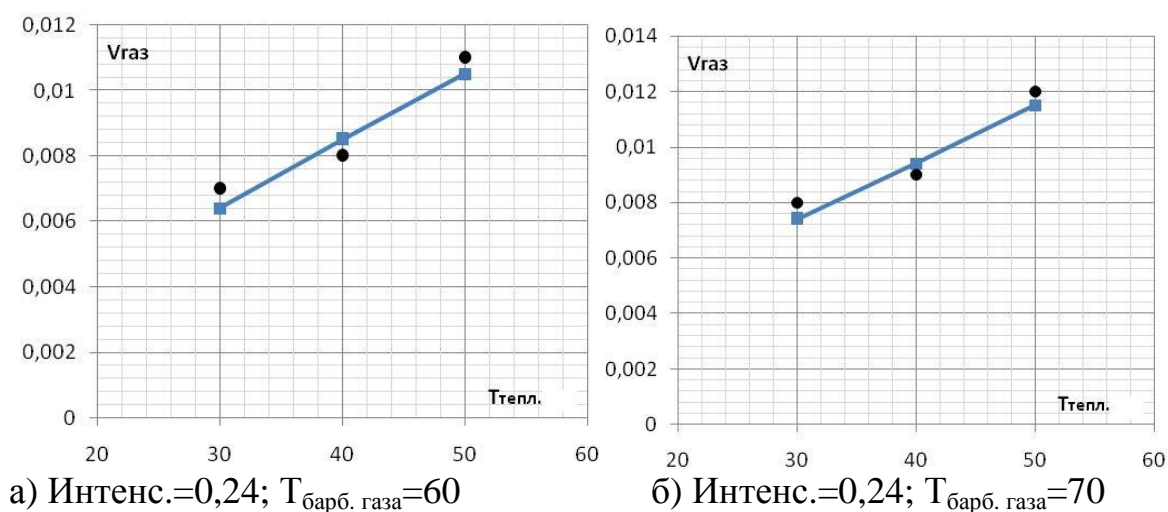


Рисунок 5 - Графики зависимости среднего квадратичного отклонения температуры в биореакторе (СКО) от температуры тепловой прослойки (Ттепл.):

● - экспериментальные данные;

■ - значения, полученные с помощью математической модели.



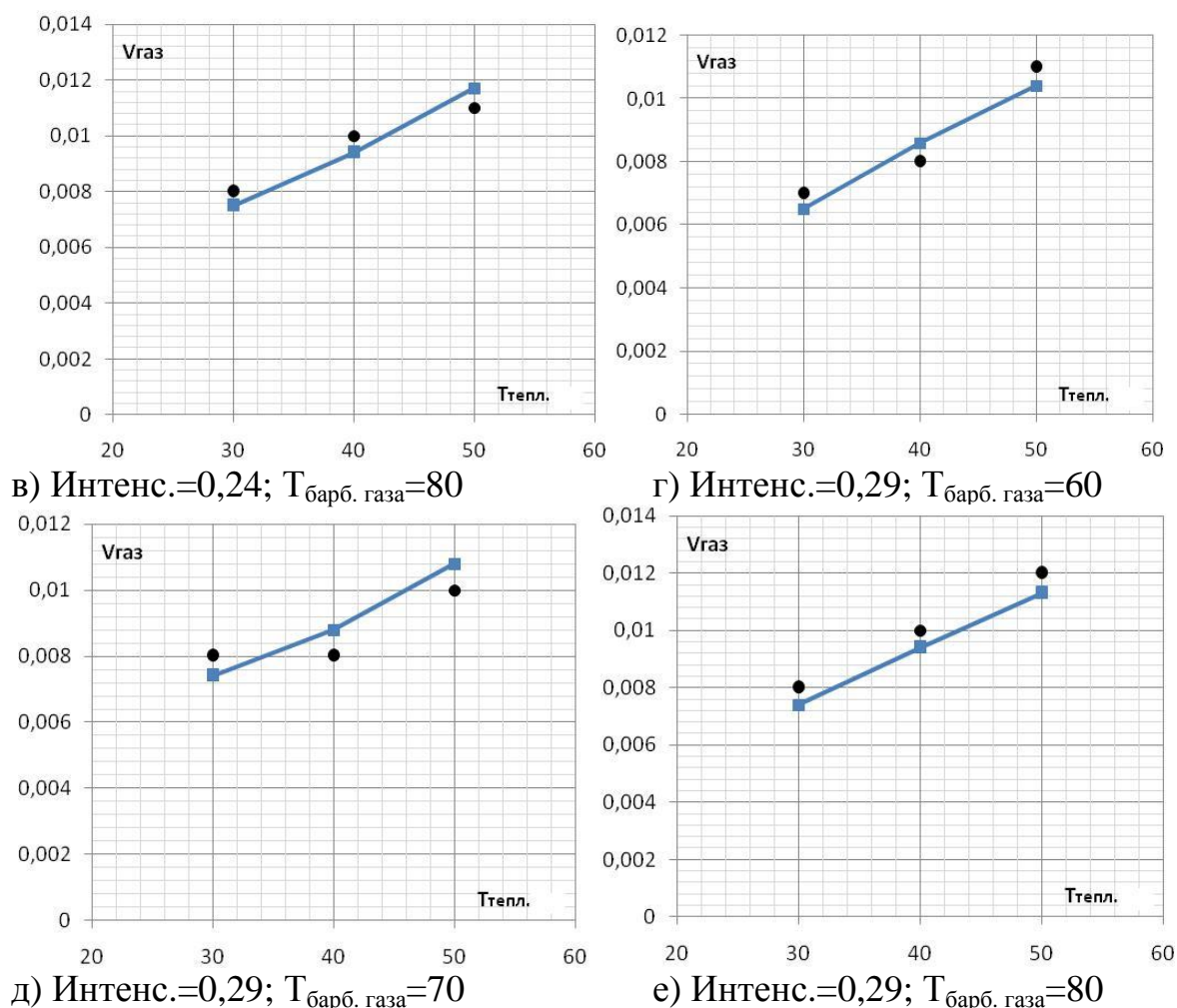


Рисунок 6 - Графики зависимости потребления газа системой барботажного перемешивания и каталитического обогрева ($V_{\text{газ}}$) от температуры тепловой прослойки ($T_{\text{тепл.}}$):

• - экспериментальные данные;
 —■— - значения, полученные с помощью математической модели.

По экспериментальным данным установлено, что снижение интенсивности перемешивания на 17% приводит к повышению стабильности температурных условий в биореакторе (снижению отклонения средней температуры в биореакторе от оптимальной, $\text{откл } T_{\text{ср}}$) на 16%, повышению равномерности температурных условий (снижению среднего квадратичного отклонения температуры в биореакторе, CKO) на 3% и снижению потребления газа системой барботажного перемешивания и каталитического обогрева ($V_{\text{газ}}$) на 2%.

Так же снижение температуры барботируемого газа на 25% приводит к повышению стабильности температурных условий в биореакторе (снижению отклонения средней температуры в биореакторе от оптимальной, *откл T_{ср}*) на 71%, повышению равномерности температурных условий (снижению среднего квадратичного отклонения температуры в биореакторе, *СКО*) на 7% и снижению потребления газа системой барботажного перемешивания и каталитического обогрева (*V_{газа}*) на 10%.

Повышение температуры тепловой прослойки на 40% до температуры выбранного теплового режима приводит к снижению стабильности температурных условий в биореакторе (повышению отклонения средней температуры в биореакторе от оптимальной, *откл T_{ср}*) на 60% и повышению потребления газа системой барботажного перемешивания и каталитического обогрева (*V_{газа}*) на 30%, однако при этом в 60 раз повышается равномерность температурных условий (снижается среднее квадратичное отклонение температуры в биореакторе, *СКО*).

При проведении эксперимента выход биогаза составлял от 0,21 до 0,28 м³/сут., что соответствует значениям выхода биогаза из экскрементов крупного рогатого скота.

Таким образом, расхождение между теоретическими и экспериментальными данными находится в пределах 10%, что позволяет сделать вывод об адекватности разработанной математической модели функционирования малого биореактора с системой барботажного перемешивания и каталитического обогрева и достоверности результатов, получаемых при математическом моделировании. Рациональными параметрами системы барботажного перемешивания и каталитического обогрева по стабильности, равномерности температурных условий в биореакторе и потреблению газа системой являются минимальные

значения интенсивности перемешивания, температуры барботируемого газа и максимальное значение температуры тепловой прослойки.

Выводы

1. Экспериментальные исследования натурно реализованного малого биореактора с системой барботажного перемешивания и каталитического обогрева показали работоспособность предложенных схемно-конструктивных решений системы барботажного перемешивания и каталитического обогрева.

2. Сравнение выходных величин натурального эксперимента и данных математического моделирования позволяет сделать вывод об адекватности разработанных математических моделей и достоверности результатов, получаемых при математическом моделировании. Расхождение между расчетными и экспериментальными данными не превышает 10%.

3. Рациональными параметрами системы барботажного перемешивания и каталитического обогрева по стабильности, равномерности температурных условий в биореакторе и потреблению газа системой являются температуры барботируемого газа, газовой прослойки равные температуре выбранного режима переработки и слабая интенсивность перемешивании субстрата.

Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2007-2013 годы» (государственный контракт № 16.552.11.7050 от 29 июля 2011 г.) с использованием оборудования ЦКП «ЭБЭЭ» ФГБОУ ВПО «МарГТУ».

Библиографический список

1. Онучин Е. М. Биогазовая установка с устройством для перемешивания и каталитического обогрева субстрата / Е. М. Онучин, А. А. Медяков, Р. В. Яблонский // Альтернативная энергетика и экология. – 2010. - №11. – С. 91-94.
2. Сидыганов Ю. Н. Результаты математического моделирования процессов теплового перемешивания при анаэробном сбраживании органических отходов / Ю. Н. Сидыганов, Е. М. Онучин, Д. В. Костромин, А. А. Медяков // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2011. - № 24. – С. 332-338.
3. Онучин Е. М. Экспериментальный стенд для исследования процессов каталитического обогрева и перемешивания субстрата при анаэробном сбраживании / Е. М. Онучин, Д. В. Костромин, Ю. Н. Сидыганов, А. А. Медяков, Р. В. Яблонский // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2011. - № 24. – С. 348-355.
4. Сидыганов Ю. Н. Математическое моделирование процессов функционирования каталитического подогревателя при обогреве биореактора анаэробного сбраживания органических отходов / Ю. Н. Сидыганов, Е. М. Онучин, Д. В. Костромин, А. А. Медяков // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2011. - №25. – С. 231-237.
5. Онучин Е. М. Вычислительный эксперимент работы каталитического подогревателя при обогреве биореактора анаэробного сбраживания органических отходов / Е. М. Онучин, Д. В. Костромин, Ю. Н. Сидыганов, А. А. Медяков// Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2011. - № 25. – С. 250-256.
6. Патент на полезную модель 106138 Российская Федерация, МПК51 В01F 15/06 (2006/01) Устройство для перемешивания субстрата с подогревом / Медяков А. А., Сидыганов Ю. Н., Онучин Е. М., Шамшуrow Д. Н., Костромин Д. В., Яблонский Р. В.; заявитель и патентообладатель Марийский гос. техн. ун-т. – № 2010153209/05; заявл. 24.12.2010; опубл. 10.07.2011, Бюл. № 19. – 2 с.: ил.
7. Патент на полезную модель 106139 Российская Федерация, МПК51 В01F 15/06 (2006/01) Устройство для перемешивания и каталитического обогрева субстрата / Яблонский Р. В., Сидыганов Ю. Н., Онучин Е. М., Шамшуrow Д. Н., Костромин Д. В., Медяков А. А.; заявитель и патентообладатель Марийский гос. техн. ун-т. – № 2010153211/05; заявл. 24.12.2010; опубл. 10.07.2011, Бюл. № 19. – 2 с.: ил.