

УДК: 66.069.82

UDC: 66.069.82

**РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО  
ЭКСПЕРИМЕНТА НА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ  
МОДЕЛИ МАЛОГО БИОРЕАКТОРА С  
СИСТЕМОЙ БАРБОТАЖНОГО  
ПЕРЕМЕШИВАНИЯ И КАТАЛИТИЧЕСКОГО  
ОБОГРЕВА**

**THE RESULTS OF THE COMPUTATIONAL  
EXPERIMENT BY MEANS OF MATHEMATIC  
MODEL OF A SMALL BIOREACTOR WITH  
BUBBLE MIXING SYSTEM AND CATALYTIC  
HEATING**

Сидыганов Юрий Николаевич  
д.т.н., профессор  
*Санкт-Петербургский государственный аграрный  
университет, Санкт-Петербург, Россия*

Sidiganov Urii Nikolaevich  
Dr.Sci.Tech., professor  
*Saint-Petersburg State Agrarian University, Saint-  
Petersburg, Russia*

Онучин Евгений Михайлович  
к.т.н., доцент

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

Костромин Денис Владимирович  
к.т.н., доцент

Kostromin Denis Vladimirovich  
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 вычислительного эксперимента на математической модели малого биореактора с системой барботажного перемешивания и каталитического обогрева. Рассмотрена количественная связь между конструктивными параметрами биореактора и параметрами эффективности устройства

The article reviews the results of the computational experiment by means of mathematic model of a small bioreactor with the bubble mixing system and catalytic heating. We considered the quantitative relationship between design parameters of a bioreactor and parameters of its effectiveness

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

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

Совершенствование методов анаэробной переработки органических отходов является важным направлением развития биогазовых технологий в настоящее время. Существенным фактором, влияющим на экономическую эффективность процессов анаэробной переработки, является обеспечение его энергетической эффективности. 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.

Однако для определения количественных связей между конструктивными параметрами биореактора, барботажного устройства, технологическими параметрами процесса переработки животных органических отходов, внешними условиями функционирования установки и параметрами эффективности поддержания стабильных и равномерных температурных условий в биореакторе и потребления энергии системой перемешивания и обогрева необходимо проведение вычислительного эксперимента на комплексной математической модели малого биореактора с системой барботажного перемешивания и каталитического обогрева, учитывающей особенности каталитического обогрева и теплового перемешивания субстрата нагретым газом.

Для проведения эксперимента были выбраны следующие уровни варьирования входных факторов (табл. 1).

Таблица 1 - Уровни варьирования входных факторов. Соотношение между натуральными и нормализованными уровнями факторов

Фактор	Обозначение	Уровни варьирования				
		1	2	3	4	5
Диаметр биореактора, м	$X_1$	0,5	1,625	2,75	3,875	5
Интенсивность перемешивания органических отходов	$X_2$	0,24	0,2925	0,345	0,3975	0,45
Температура барботируемого газа, °С	$X_3$	50	62,5	75	87,5	100
Температура тепловой прослойки, °С	$X_4$	20	27,5	35	42,5	50
Температура окружающей среды, °С	$X_6$	0	5	10	15	20

В процессе проведения вычислительного эксперимента моделировалось последовательное изменение состояния объекта. За каждый элементарный период моделирования происходило изменение температуры ячеек биореактора, заполненных органическими отходами животноводства. Графики изменения состояния температуры ячеек биореактора в процессе моделирования за цикл работы приведены на рисунке 1.

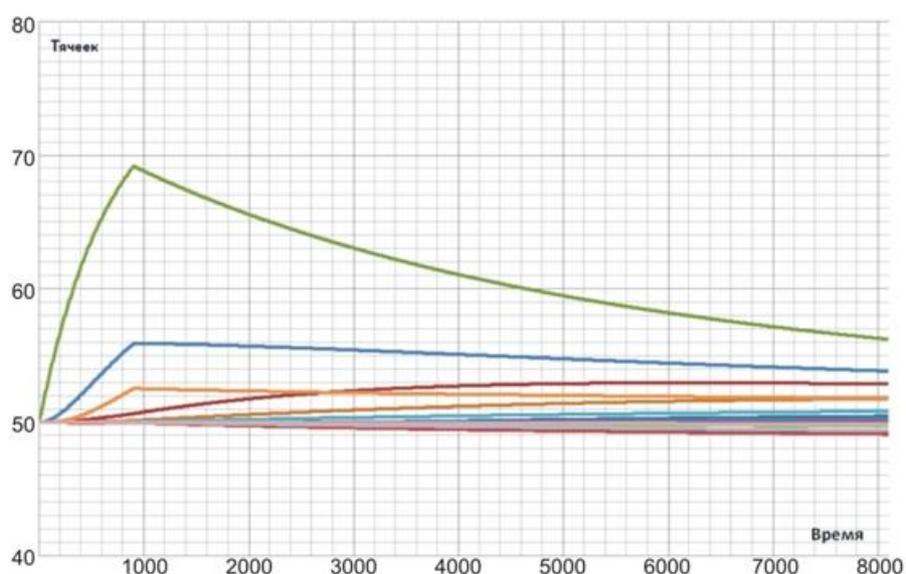


Рисунок 1 - Графики изменения состояния температуры ячеек биореактора в процессе моделирования за цикл работы

В результате проведения вычислительных экспериментов на разработанной математической модели в соответствии с составленными планами многофакторных экспериментов были получены значения откликов для выходных факторов.

Для полученных значений отклика отклонения средней по объему биореактора температуры от оптимальной ( $Y^1$ ) были составлены комбинационные квадраты с двумя выходами, был определен вид многофакторной регрессионной модели, получены однофакторные регрессионные модели по осредненным значениям отклика, а так же вычислены нормализованная и натуральная четырехфакторная регрессионная модель.

Таким образом, статистическая обработка результатов вычислительного эксперимента показала, что отклонение средней по объему биореактора температуры от оптимальной в течение цикла работы может быть описано четырехфакторной нелинейной регрессионной моделью, имеющей вид:

$$\begin{aligned} \hat{Y} = & -0,06 * \ln(0,889 * D_{бр} + 0,555) + 0,015 * \text{Exp}(3,192 * k_{интен}) + \\ & + 0,002 * \dot{T}_{барб.г.} + 0,035 * (-1,667 + 0,133 * \dot{T}_{теп.})^{0,256} - 0,102 \end{aligned} \quad (1)$$

где:

$D_{бр} = 0,5...5 м$  - диаметр биореактора,

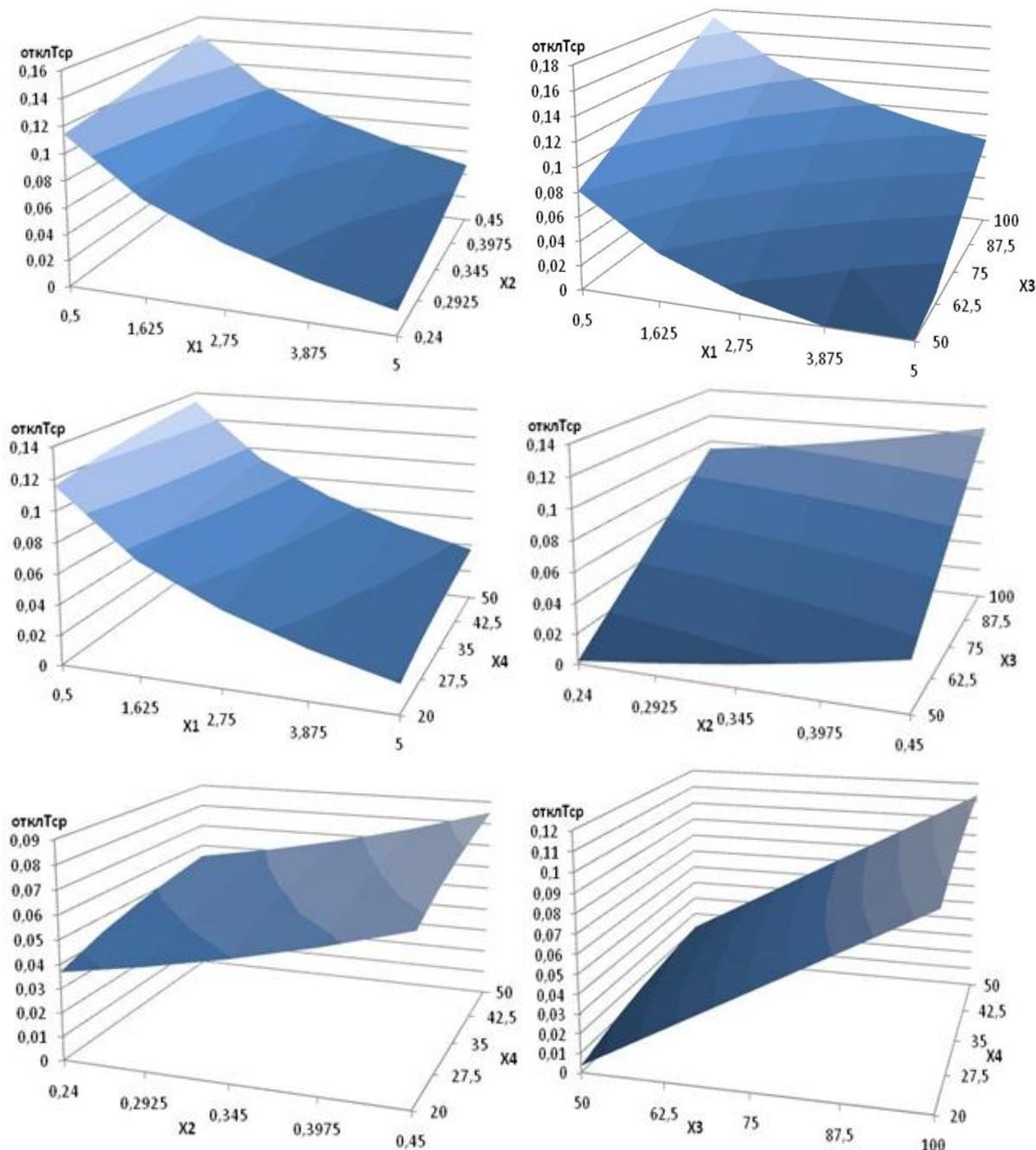
$k_{интен} = 0,24...0,45$  - интенсивность перемешивания,

$T_{барб.г.} = 50...100^{\circ} C$  - температура барботируемого газа,

$\dot{T}_{теп.} = 20...50^{\circ} \tilde{N}$  - температура тепловой прослойки.

Графики, построенные по данному регрессионному уравнению и отражающие влияние конструктивных параметров биореактора ( $D_{бр}$ ) и технологических параметров процесса ( $k_{интен}$ ,  $T_{барб.г.}$ ,  $T_{теп.}$ ) на отклонение

средней по объему биореактора температуры от оптимальной в течение цикла работы, представлены на рисунке 2.



**Рисунок2 - Зависимость отклонения средней по объему биореактора температуры от оптимальной (отклТср), °С, от диаметра биореактора (X1), м, интенсивности перемешивания (X2), температуры барботируемого газа (X3), °С, температуры тепловой прослойки (X4), °С.**

Графики позволяют сделать следующие выводы:

- с ростом значений диаметра биореактора ( $X_1$ ) отклонение средней по объему биореактора температуры от оптимальной ( $отклT_{ср}$ ) снижается, что связано с тем, что для изменения температуры ячеек биореактора больших размеров необходимо затратить больше теплоты. Таким образом, температура ячеек биореактора испытывает меньшие колебания значений в течение цикла работы и отклонение средней температуры от оптимальной снижается.

- с ростом значений интенсивности перемешивания ( $X_2$ ) отклонение средней по объему биореактора температуры от оптимальной ( $отклT_{ср}$ ) увеличивается, что связано с увеличением количества нагретого барботируемого газа пропорционально интенсивности перемешивания. Таким образом, ячейки прогреваются сильнее и отклонение средней температуры увеличивается.

- с ростом значений температуры барботируемого газа ( $X_3$ ) отклонение средней по объему биореактора температуры от оптимальной ( $отклT_{ср}$ ) увеличивается, что так же связано с тем, что ячейки сильнее и отклонение средней температуры увеличивается.

- с ростом значений температуры тепловой прослойки ( $X_4$ ) отклонение средней по объему биореактора температуры от оптимальной ( $отклT_{ср}$ ) увеличивается, однако влияние фактора меньше, чем остальных.

- минимальное значение отклонения средней температуры от оптимальной наблюдается при минимальных значениях интенсивности перемешивания ( $X_2$ ), температуры барботируемого газа ( $X_3$ ), температуры тепловой прослойки ( $X_4$ ) и максимальном значении диаметра биореактора ( $X_1$ ), а максимальное значение отклонения средней температуры от оптимальной наблюдается при максимальных значениях интенсивности перемешивания ( $X_2$ ), температуры барботируемого газа ( $X_3$ ), температуры тепловой прослойки ( $X_4$ ) и минимальном значении диаметра биореактора ( $X_1$ ).

Для полученных значений отклика среднего квадратичного отклонения температуры по объему биореактора ( $Y^2$ ) были составлены комбинационные квадраты с двумя выходами, был определен вид многофакторной регрессионной модели, получены однофакторные регрессионные модели по осредненным значениям отклика, а так же вычислены нормализованная и натуральная трехфакторная регрессионная модель.

Таким образом, статистическая обработка результатов вычислительного эксперимента показала, что среднее квадратичное отклонение температуры по объему биореактора в течение цикла работы может быть описано трехфакторной нелинейной регрессионной моделью, имеющей вид:

$$CKO = (0,889 * D_{\text{бр}} + 0,555)^{-2} * (0,132 * k_{\text{интен}} + 7,526 * 10^{-7} * T_{\text{барб.г.}}^3 - 1,5 * 10^{-4} * T_{\text{барб.г.}}^2 + 0,010 * T_{\text{барб.г.}} - 0,011 * T_{\text{мен}} + 0,166) + 0,04. \quad (2)$$

где:

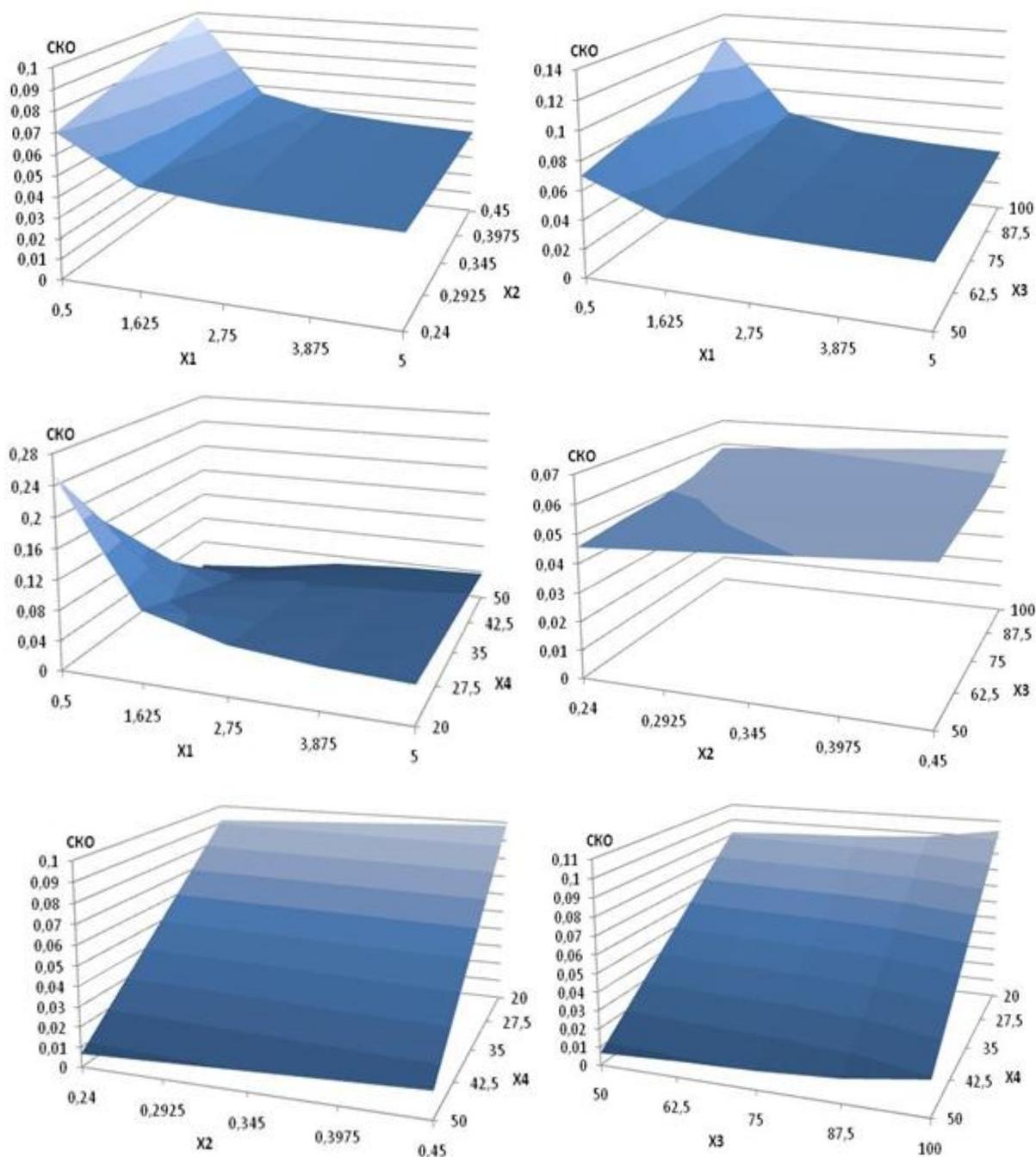
$D_{\text{бр}} = 0,5 \dots 5 \text{ м}$  - диаметр биореактора,

$k_{\text{интен}} = 0,24 \dots 0,45$  - интенсивность перемешивания,

$T_{\text{барб.г.}} = 50 \dots 100^\circ \text{C}$  - температура барботируемого газа,

$T_{\text{мен}} = 20 \dots 50^\circ \text{C}$  - температура тепловой прослойки.

Графики, построенные по данному регрессионному уравнению (2) и отражающие влияние конструктивных параметров биореактора ( $D_{\text{бр}}$ ) и технологических параметров процесса ( $k_{\text{интен}}$ ,  $T_{\text{барб.г.}}$ ,  $T_{\text{мен}}$ ) на среднее квадратичное отклонение температуры по объему биореактора в течение цикла работы, представлены на рисунке 3.



**Рисунок3 - Зависимость среднего квадратичного отклонения температуры по объему биореактора (SKO), °С, от диаметра биореактора (X1), м, интенсивности перемешивания (X2), температуры барботируемого газа (X3), °С, температуры тепловой прослойки (X4), °С.**

Графики позволяют сделать следующие выводы:

- с ростом значений диаметра биореактора ( $X_1$ ) среднее квадратичное отклонение температуры по объему биореактора (SKO) снижается до некоторого определенного значения, что связано с тем, что для изменения

температуры ячеек биореактора больших размеров необходимо затратить больше теплоты. Таким образом, температура ячеек биореактора испытывает меньшие колебания значений в течение цикла работы и среднее квадратичное отклонение температуры по объему биореактора снижается.

- с ростом значений интенсивности перемешивания ( $X_2$ ) среднее квадратичное отклонение температуры по объему биореактора ( $CKO$ ) увеличивается, что связано с увеличением количества нагретого барботируемого газа пропорционально интенсивности перемешивания. Таким образом, ячейки прогреваются сильнее и среднее квадратичное отклонение температуры по объему биореактора ( $CKO$ ) увеличивается, однако влияние фактора меньше, чем остальных.

- с ростом значений температуры барботируемого газа ( $X_3$ ) среднее квадратичное отклонение температуры по объему биореактора ( $CKO$ ) увеличивается, что так же связано с тем, что ячейки прогреваются сильнее и среднее квадратичное отклонение температуры увеличивается, влияние фактора так же меньше, чем остальных.

- с ростом значений температуры тепловой прослойки ( $X_4$ ) среднее квадратичное отклонение температуры по объему биореактора ( $CKO$ ) уменьшается, что связано с тем, что с увеличением температуры тепловой прослойки периферийные участки биореактора меньше охлаждаются, тем самым снижается неоднородность распределения температур и среднее квадратичное отклонение температуры по объему биореактора ( $CKO$ ) снижается.

- минимальное значение среднего квадратичного отклонения температуры наблюдается при минимальных значениях интенсивности перемешивания ( $X_2$ ), температуры барботируемого газа ( $X_3$ ) и максимальных значениях диаметра биореактора ( $X_1$ ) и температуры тепловой прослойки ( $X_4$ ), а максимальное значение среднего

квадратичного отклонения температуры от оптимальной наблюдается при максимальных значениях интенсивности перемешивания ( $X_2$ ), температуры барботируемого газа ( $X_3$ ) и минимальных значениях диаметра биореактора ( $X_1$ ) и температуры тепловой прослойки ( $X_4$ ).

Для полученных значений отклика потребления газа системой барботажного перемешивания и каталитического обогрева ( $Y^3$ ) были составлены комбинационные квадраты с двумя выходами, был определен вид многофакторной регрессионной модели, получены однофакторные регрессионные модели по осредненным значениям отклика, а так же вычислены нормализованная и натуральная пятифакторная регрессионная модель.

Таким образом, статистическая обработка результатов вычислительного эксперимента показала, что потребление газа системой барботажного перемешивания и каталитического обогрева в течение цикла работы может быть описано пятифакторной нелинейной регрессионной моделью, имеющей вид:

$$\begin{aligned}
 V_{\text{газа}} = & 0,004 * D_{\text{бр}}^2 + 0,0013 * D_{\text{бр}} - 1172,9 * k_{\text{интен}}^4 + 1647,26 * k_{\text{интен}}^3 - \\
 & - 843,85 * k_{\text{интен}}^2 + 187,9 * k_{\text{интен}} + 0,0026 * T_{\text{барб.г.}} - 5,632 * 10^{-6} * T_{\text{теп.}}^4 + \\
 & + 7,93 * 10^{-4} * T_{\text{теп.}}^3 - 0,04 * T_{\text{теп.}}^2 + 0,895 * T_{\text{теп.}} + 1,28 * 10^{-5} * T_{\text{окр}}^4 - \\
 & - 6,8 * 10^{-4} * T_{\text{окр}}^3 + 0,009 * T_{\text{окр}}^2 - 0,044 * T_{\text{окр}} - 26,04
 \end{aligned} \quad (3)$$

где:

$D_{\text{бр}} = 0,5 \dots 5 \text{ м}$  - диаметр биореактора,

$k_{\text{интен}} = 0,24 \dots 0,45$  - интенсивность перемешивания,

$T_{\text{барб.г.}} = 50 \dots 100^\circ \text{ C}$  - температура барботируемого газа,

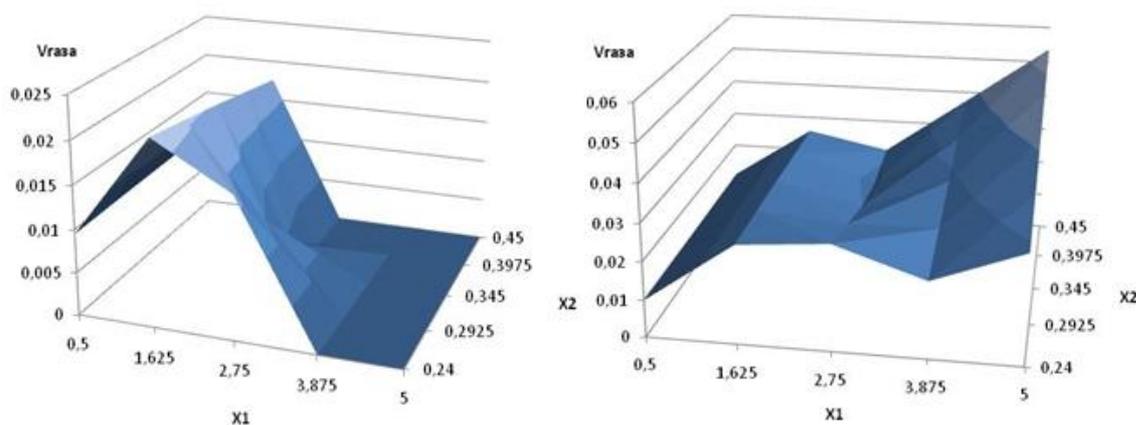
$T_{\text{теп.}} = 20 \dots 50^\circ \text{ C}$  - температура тепловой прослойки,

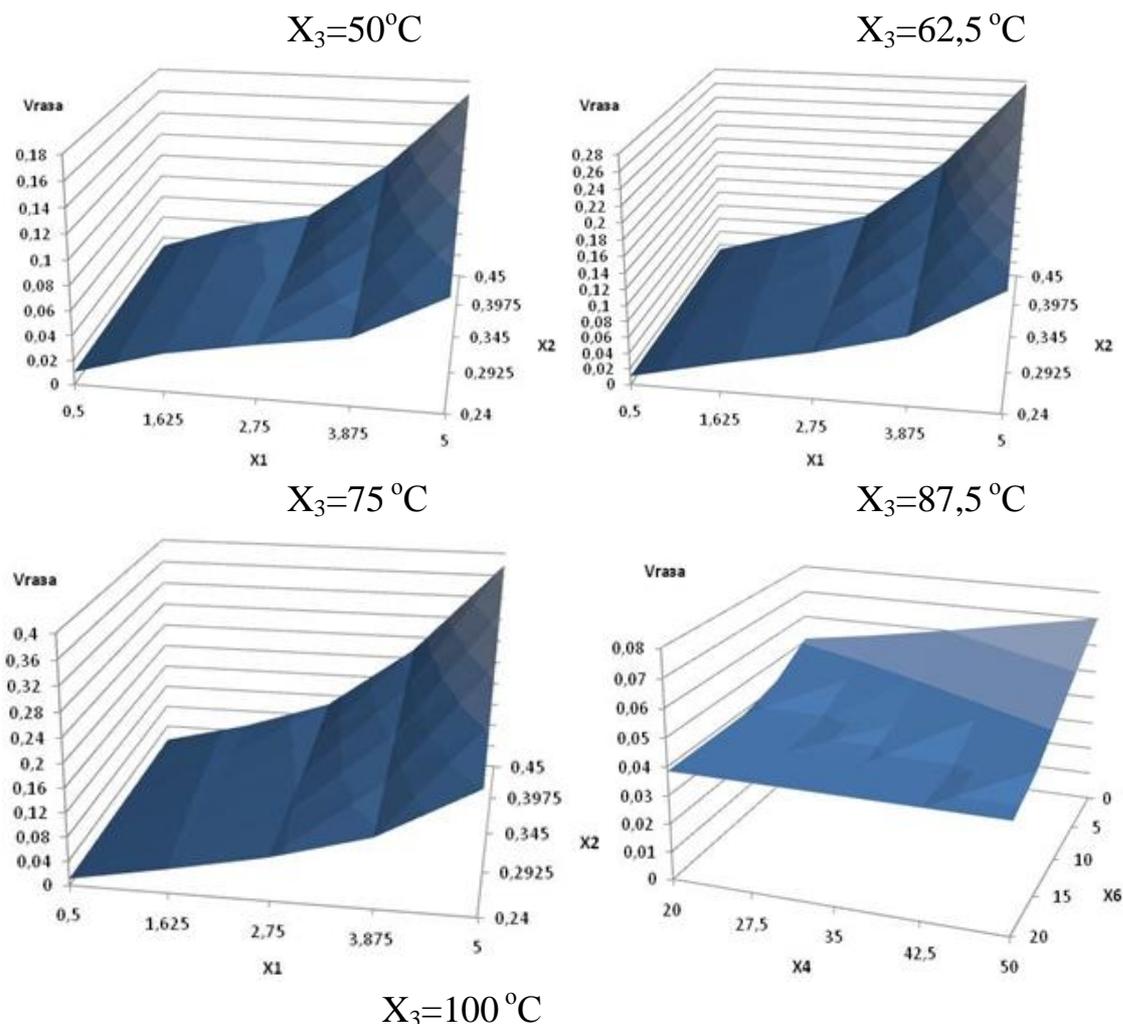
$T_{\text{окр}} = 0 \dots 20^\circ \text{ C}$  - температура окружающей среды.

На рисунке 4 представлены графики, построенные с помощью разработанной математической модели и отражающие влияние конструктивных параметров биореактора ( $D_{бр}$ ), технологических параметров процесса переработки ( $k_{интен}$ ,  $T_{барб.г.}$ ,  $T_{теп}$ ) и внешних условий функционирования ( $T_{окр}$ ) на потребление газа системой барботажного перемешивания и каталитического обогрева в течение цикла работы, которые позволяют сделать следующие выводы:

- с ростом значений диаметра биореактора ( $X_1$ ) потребление газа системой барботажного перемешивания и каталитического обогрева ( $V_{газа}$ ) преимущественно увеличивается, что связано с увеличением количества барботируемого газа, необходимого для обеспечения требуемого режима перемешивания. Таким образом, с увеличением количества барботируемого газа увеличивается потребление газа системой каталитического обогрева барботируемого газа. Однако при малых значениях температуры барботируемого газа ( $X_3$ ) наблюдается участками нелинейной зависимости.

- с ростом значений интенсивности перемешивания ( $X_2$ ) потребление газа системой барботажного перемешивания и каталитического обогрева ( $V_{газа}$ ) увеличивается, что связано с увеличением затрат энергии, необходимых для обогрева больших объемов барботируемого газа.





**Рисунок 4-** Зависимость потребления газа системой барботажного перемешивания и каталитического обогрева ( $V_{\text{газа}}$ ),  $\text{м}^3/\text{ч}$ , от диаметра биореактора ( $X_1$ ), м, интенсивности перемешивания ( $X_2$ ), температуры барботируемого газа ( $X_3$ ),  $^{\circ}\text{C}$ , температуры тепловой прослойки ( $X_4$ ),  $^{\circ}\text{C}$ , температура окружающей среды ( $X_6$ ),  $^{\circ}\text{C}$ .

- с ростом значений температуры барботируемого газа ( $X_3$ ) потребление газа системой барботажного перемешивания и каталитического обогрева ( $V_{\text{газа}}$ ) увеличивается, что связано с увеличением затрат энергии, необходимых для обогрева барботируемого газа до более высокой температуры.

- с ростом значений температуры тепловой прослойки ( $X_4$ ) потребление газа системой барботажного перемешивания и каталитического обогрева ( $V_{\text{газа}}$ ) увеличивается, что связано с

увеличением затрат энергии, необходимых для поддержания более высокой температуры тепловой прослойки.

- с ростом значений температуры окружающей среды ( $X_6$ ) потребление газа системой барботажного перемешивания и каталитического обогрева ( $V_{газа}$ ) снижается, что связано с снижением потерь теплоты в окружающую среду.

- минимальное значение потребления газа системой барботажного перемешивания и каталитического обогрева наблюдается при минимальных значениях диаметра биореактора ( $X_1$ ), интенсивности перемешивания ( $X_2$ ) и температуры барботируемого газа ( $X_3$ ), температуры тепловой прослойки ( $X_4$ ) и максимальном значении температуры окружающей среды ( $X_6$ ), а максимальное потребление газа системой барботажного перемешивания и каталитического обогрева наблюдается при максимальных значениях диаметра биореактора ( $X_1$ ), интенсивности перемешивания ( $X_2$ ) и температуры барботируемого газа ( $X_3$ ), температуры тепловой прослойки ( $X_4$ ) и минимальном значении температуры окружающей среды ( $X_6$ ).

Таким образом, полученные при проведении вычислительного эксперимента регрессионные зависимости позволяют установить количественную связь между конструктивными параметрами биореактора, барботажного устройства, технологическими параметрами процесса переработки животных органических отходов, внешними условиями функционирования установки и параметрами эффективности поддержания стабильных и равномерных температурных условий в биореакторе и потребления энергии системой.

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.