

УДК: 66.097.3

UDC: 66.097.3

**РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО
ЭКСПЕРИМЕНТА НА ИМИТАЦИОННОЙ
МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТЕХНИКО-
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ
ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ
ЖИВОТНОВОДЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА**

**RESULTS OF COMPUTATIONAL
EXPERIMENTS ON THE IMITATING
MATHEMATICAL MODEL OF TECHNICAL
AND TECHNOLOGICAL HEATING SYSTEMS
FOR A CATTLE-BREEDING COMPLEX**

Каменских Александр Дмитриевич
аспирант

Kamenskih Aleksandr Dmitrievich
postgraduate student

Медяков Андрей Андреевич
к.т.н.

Medyakov Andrei Andreevich
Cand.Tech.Sci.

Онучин Евгений Михайлович
к.т.н., доцент
*Поволжский государственный технологический
университет, Йошкар-Ола, Россия*

Onychin Evgeny Mikhailovich
Cand.Tech.Sci., assistant professor
*Volga State University of Technology, Ioshkar-Ola,
Russia*

В статье представлены результаты
вычислительного эксперимента на имитационной
математической модели функционирования.
Представлены уравнения, устанавливающие
количественную связь между технологическими
параметрами и параметрами эффективности
функционирования системы теплоснабжения

The results of numerical experiments on the simulation
of mathematical models of the functioning of the
technical and technological systems for heating
livestock complex have been presented in the article.
The equations that establish a quantitative relationship
between process parameters and the parameters of the
efficiency of the heating system have been shown

Ключевые слова: ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ,
ЖИВОТНОВОДЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ,
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Keywords: HEAT, CATTLE-BREEDING
COMPLEXES, COMPUTATIONAL
EXPERIMENTS, MATHEMATICAL MODELS

Введение

Задачей вычислительного эксперимента на имитационная математическая модель функционирования технико-технологических систем для теплоснабжения животноводческого комплекса является получение в виде регрессионных уравнений эмпирических зависимостей параметров, характеризующих эффективность функционирования, от конструктивно-технологических параметров системы, являющихся входными регулируемым факторами активного вычислительного эксперимента [1-4].

На отклик оказывают влияние более 10 факторов, что значительно затрудняет проведение исследования. С целью уменьшения размерности

факторного пространства на основе известных данных было произведено априорное ранжирование входных факторов (табл. 1).

Таблица 1 - Априорное ранжирование входных факторов вычислительного эксперимента на математической модели

Ранг фактора	Наименование фактора
1	расход горячего воздуха, температура горячего воздуха, длина комплекса
2	кратность воздухообмена, температура окружающего воздуха, масса теплового аккумулятора, свойства теплоаккумулирующего вещества, коэффициент теплопередачи к окружающей среде, состав биогенного газообразного топлива
3	температура биогенного газообразного топлива, температура окислителя

В результате априорного ранжирования были выбраны 2 фактора 1-го ранга: расход горячего воздуха, температура горячего воздуха. Входные факторы носят количественный характер. Диапазон варьирования выбранных входных факторов, определенный исходя из критерия практической значимости результатов исследования, представлен в табл. 2.

Таблица 2 - Диапазон варьирования количественных входных факторов вычислительного эксперимента в исследуемой области

№п/п	Фактор	Диапазон варьирования
1	Расход горячего воздуха, м ³ /с (X ₁)	0,1-0,5
2	Температура горячего воздуха, °С (X ₂)	50-350

В соответствии с выбранными диапазонами варьирования входных факторов и уровнями варьирования входных факторов (табл. 3) были составлены планы многофакторных вычислительных экспериментов на имитационная математическая модель функционирования технико-технологических систем для теплоснабжения животноводческого комплекса, представленные в табл. 4 – 6.

Таблица 3 - Соотношение между натуральными и нормализованными уровнями факторов

№ п/п	Фактор	Обозначение	Уровни варьирования				
			1	2	3	4	5
1	Расход горячего воздуха, м ³ /с	X ₁	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
2	Температура горячего воздуха, °С	X ₂	50	125	200	275	350

Таблица 4 - Полный план многофакторного вычислительного эксперимента для определения зависимости между входными величинами и средней температурой внутри животноводческого комплекса (Y¹)

№ опыта	Входные факторы (значение/уровень)		Отклик, Y ¹	№ опыта	Входные факторы (значение/уровень)		Отклик, Y ¹
	X ₁	X ₂			X ₁	X ₂	
1	0,1/1	50/1	13,383	14	0,3/3	275/4	26,409
2	0,1/1	125/2	23,406	15	0,3/3	350/5	28,476
3	0,1/1	200/3	26,509	16	0,4/4	50/1	22,724
4	0,1/1	275/4	29,629	17	0,4/4	125/2	23,291
5	0,1/1	350/5	33,823	18	0,4/4	200/3	24,491
6	0,2/2	50/1	22,601	19	0,4/4	275/4	25,533
7	0,2/2	125/2	24,602	20	0,4/4	350/5	26,631
8	0,2/2	200/3	27,054	21	0,5/5	50/1	22,558
9	0,2/2	275/4	29,658	22	0,5/5	125/2	23,345
10	0,2/2	350/5	32,003	23	0,5/5	200/3	24,203
11	0,3/3	50/1	22,764	24	0,5/5	275/4	24,818
12	0,3/3	125/2	23,979	25	0,5/5	350/5	26,225
13	0,3/3	200/3	25,263				

Таблица 5 - Полный план многофакторного вычислительного эксперимента для определения зависимости между входными величинами и средним квадратичным отклонением температуры внутри животноводческого комплекса (Y^2)

№ опыта	Входные факторы (значение/уровень)		Отклик, Y^2	№ опыта	Входные факторы (значение/уровень)		Отклик, Y^2
	X ₁	X ₂			X ₁	X ₂	
1	0,1/1	50/1	9,044	14	0,3/3	275/4	7,466
2	0,1/1	125/2	13,316	15	0,3/3	350/5	8,143
3	0,1/1	200/3	15,194	16	0,4/4	50/1	4,829
4	0,1/1	275/4	16,272	17	0,4/4	125/2	5,426
5	0,1/1	350/5	18,926	18	0,4/4	200/3	5,927
6	0,2/2	50/1	6,948	19	0,4/4	275/4	6,204
7	0,2/2	125/2	8,289	20	0,4/4	350/5	6,582
8	0,2/2	200/3	9,372	21	0,5/5	50/1	4,339
9	0,2/2	275/4	10,530	22	0,5/5	125/2	4,991
10	0,2/2	350/5	11,741	23	0,5/5	200/3	5,247
11	0,3/3	50/1	5,537	24	0,5/5	275/4	5,471
12	0,3/3	125/2	6,494	25	0,5/5	350/5	5,891
13	0,3/3	200/3	7,048				

Таблица 6 - Полный план многофакторного вычислительного эксперимента для определения зависимости между входными величинами и суточным расходом биогенного топлива на теплоснабжение комплекса (Y^3)

№ опыта	Входные факторы (значение/уровень)		Отклик, Y^3	№ опыта	Входные факторы (значение/уровень)		Отклик, Y^3
	X_1	X_2			X_1	X_2	
1	0,1/1	50/1	17,248	14	0,3/3	275/4	19,354
2	0,1/1	125/2	22,307	15	0,3/3	350/5	18,794
3	0,1/1	200/3	26,593	16	0,4/4	50/1	18,257
4	0,1/1	275/4	30,462	17	0,4/4	125/2	17,007
5	0,1/1	350/5	34,186	18	0,4/4	200/3	18,243
6	0,2/2	50/1	20,652	19	0,4/4	275/4	18,492
7	0,2/2	125/2	17,717	20	0,4/4	350/5	19,753
8	0,2/2	200/3	17,267	21	0,5/5	50/1	18,370
9	0,2/2	275/4	18,896	22	0,5/5	125/2	18,181
10	0,2/2	350/5	24,481	23	0,5/5	200/3	18,665
11	0,3/3	50/1	18,423	24	0,5/5	275/4	20,192
12	0,3/3	125/2	17,037	25	0,5/5	350/5	21,378
13	0,3/3	200/3	17,709				

Анализ результатов вычислительных экспериментов на имитационной математической модели функционирования технико-технологических систем для теплоснабжения животноводческого комплекса

Для полученных значений отклика средней температуры внутри животноводческого комплекса (Y^1), среднего квадратичного отклонения температуры внутри животноводческого комплекса (Y^2), суточного расхода биогенного топлива на теплоснабжение комплекса (Y^3) построены графики, представленные на рисунках 1 - 3 отражающие влияние расхода горячего воздуха и температуры горячего воздуха на отклик выходных величин.

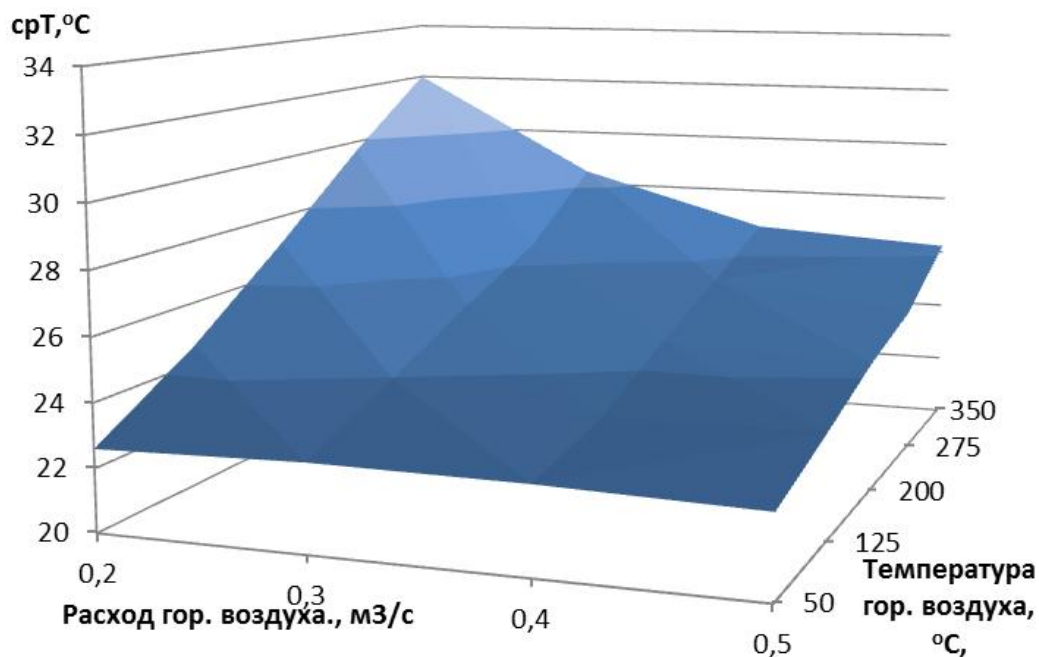


Рисунок 1 - Зависимость отклика средней температуры внутри животноводческого комплекса (Y^1) в вычислительном эксперименте от расхода горячего воздуха (m^3/c) и температуры горячего воздуха ($^{\circ}C$).

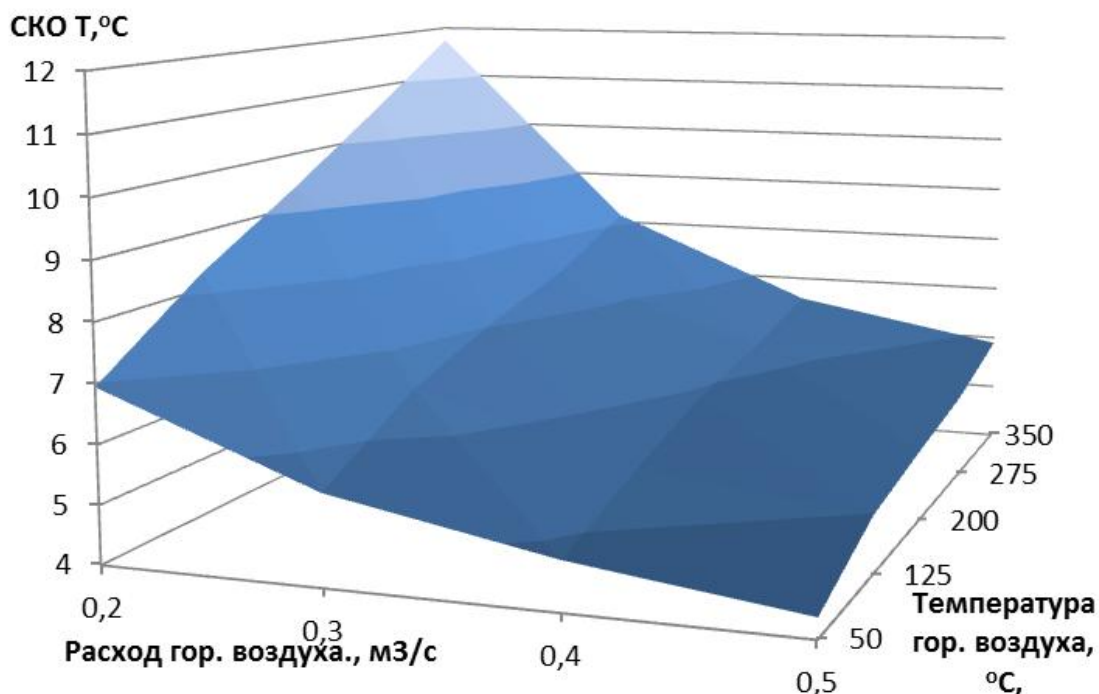


Рисунок 2 - Зависимость отклика среднего квадратичного отклонения температуры внутри животноводческого комплекса (Y^2) в вычислительном эксперименте от расхода горячего воздуха (m^3/c) и температуры горячего воздуха ($^{\circ}C$).

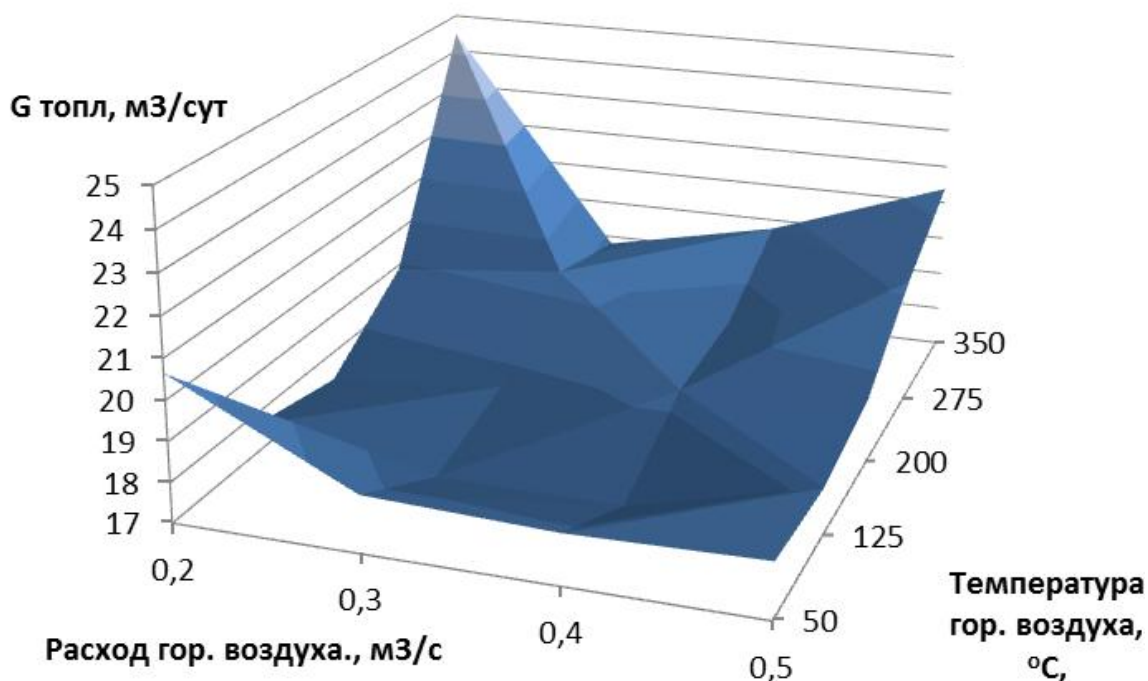


Рисунок 3 - Зависимость отклика суточного расхода биогенного топлива на теплоснабжение комплекса (Y^3) в вычислительном эксперименте от расхода горячего воздуха (m^3/c) и температуры горячего воздуха ($^{\circ}C$).

Для полученных значений отклика средней температуры внутри животноводческого комплекса (Y^1) в нормализованном виде были построены графики зависимости отклика от расхода горячего воздуха (X_1) при различных уровнях температуры горячего воздуха (X_2). По форме графиков был определен вид регрессионной модели для входного фактора «расход горячего воздуха» (X_1):

$$Y^1 = a + b * X_1 + c * X_1^2 \quad (1)$$

Для проверки выбранной для входного фактора «расход горячего воздуха» (X_1) модели (1) было произведено спрямление линий. В результате аппроксимации графиков для различных уровней X_2 получено что, графики достаточно точно описываются линейными зависимостями с высокой величиной достоверности аппроксимации (большей 0,9). Таким образом, регрессионная модель (1) для входного фактора «расход горячего воздуха» (X_1) является адекватной.

Значения коэффициентов a , b и c для модели (1) при различных уровнях входного фактора «температура горячего воздуха» (X_2) были получены с помощью программы Microsoft Excel. В результате аппроксимации значений коэффициентов a , b и c в зависимости от входного фактора «температура горячего воздуха» (X_2) получены следующие уравнения:

$$a = 5,5362 * X_2 + 16,249; \text{ достоверность аппроксимации } R^2 = 0,99;$$

$$b = - 2,0221 * X_2 + 2,468; \text{ достоверность аппроксимации } R^2 = 0,99;$$

$$c = 0,2189 * X_2 - 2,02814; \text{ достоверность аппроксимации } R^2 = 0,99.$$

Таким образом, статистическая обработка результатов вычислительного эксперимента показала, что зависимость средней температуры внутри животноводческого комплекса (Y^1) от входных факторов «расход горячего воздуха» (X_1) и «температура горячего воздуха» (X_2) может быть описана двухфакторной нелинейной регрессионной моделью в натуральном виде:

$$cpT = 18,1 + G(17,94 + G(-20,84 + 0,292T) - 0,2696T) + 0,0738T \quad (2)$$

где cpT - средняя температура внутри животноводческого комплекса, T – температура горячего воздуха, G – расход горячего воздуха.

Для полученных значений отклика среднего квадратичного отклонения температуры внутри животноводческого комплекса (Y^2) в нормализованном виде были построены графики зависимости отклика от расхода горячего воздуха (X_1) при различных уровнях температуры горячего воздуха (X_2). По форме графиков был определен вид регрессионной модели для входного фактора «расход горячего воздуха» (X_1):

$$Y^2 = a + b * X_1 + c * X_1^2 \quad (3)$$

В результате аппроксимации значений отклика среднего квадратичного отклонения температуры внутри животноводческого

комплекса (Y^2) в соответствии с видом зависимости (3) для различных уровней входного фактора «температура горячего воздуха» (X_2) получены следующие уравнения:

для 1-го уровня X_2

$Y^2 = 10,933 - 2,4652 * X_1 + 0,2303 * X_1^2$; достоверность аппроксимации $R^2 = 0,99$.

для 2-го уровня X_2

$Y^2 = 13,878 - 3,477 * X_1 + 0,3401 * X_1^2$; достоверность аппроксимации $R^2 = 0,99$.

для 3-го уровня X_2

$Y^2 = 16,139 - 4,2243 * X_1 + 0,4107 * X_1^2$; достоверность аппроксимации $R^2 = 0,99$.

для 4-го уровня X_2

$Y^2 = 19,581 - 5,7235 * X_1 + 0,5828 * X_1^2$; достоверность аппроксимации $R^2 = 0,99$.

для 5-го уровня X_2

$Y^2 = 22,775 - 6,99 * X_1 + 0,727 * X_1^2$; достоверность аппроксимации $R^2 = 0,99$.

В соответствии с полученными в результате аппроксимации уравнениями были определены значения коэффициентов уравнения (3) в зависимости от входного фактора «температура горячего воздуха» (X_2). В результате аппроксимации значений коэффициентов a , b и c в зависимости от входного фактора «температура горячего воздуха» (X_2) получены следующие уравнения:

$a = 2,9387 * X_2 + 7,8451$; достоверность аппроксимации $R^2 = 0,98$;

$b = -1,1316 * X_2 - 1,1832$; достоверность аппроксимации $R^2 = 0,98$;

$c = 0,1236 * X_2 + 0,0874$; достоверность аппроксимации $R^2 = 0,97$.

Таким образом, статистическая обработка результатов вычислительного эксперимента показала, что зависимость среднего

квадратичного отклонения температуры внутри животноводческого комплекса (Y^2) от входных факторов «расход горячего воздуха» (X_1) и «температура горячего воздуха» (X_2) может быть описана двухфакторной нелинейной регрессионной моделью в натуральном виде:

$$SKO = 8,825 + G(-15,604 + G(12,86 + 0,1648 T) - 0,1509 T) + 0,039183 T \quad (4)$$

где SKO - среднее квадратичное отклонение температуры внутри животноводческого комплекса, T – температура горячего воздуха, G – расход горячего воздуха.

Для полученных значений отклика расхода биогенного топлива на теплоснабжение комплекса (Y^3) в нормализованном виде были построены графики зависимости отклика от расхода горячего воздуха (X_1) при различных уровнях температуры горячего воздуха (X_2). По форме графиков был определен вид регрессионной модели для входного фактора «расход горячего воздуха» (X_1):

$$Y^3 = a + b * X_1 + c * X_1^2 \quad (5)$$

В результате аппроксимации значений отклика расхода биогенного топлива на теплоснабжение комплекса (Y^3) в соответствии с видом зависимости (5) для различных уровней входного фактора «температура горячего воздуха» (X_2) получены следующие уравнения:

для 1-го уровня X_2

$Y^3 = 27,819 - 4,7991 * X_1 + 0,5854 * X_1^2$; достоверность аппроксимации $R^2 = 0,96$.

для 2-го уровня X_2

$Y^3 = 22,11 - 3,1099 * X_1 + 0,4637 * X_1^2$; достоверность аппроксимации $R^2 = 0,98$.

для 3-го уровня X_2

$Y^3 = 16,258 + 0,5099 * X_1 - 0,053 * X_1^2$; достоверность аппроксимации $R^2 = 0,99$.

для 4-го уровня X_2

$Y^3 = 24,369 - 4,0045 * X_1 + 0,6338 * X_1^2$; достоверность аппроксимации $R^2 = 0,99$.

для 5-го уровня X_2

$Y^3 = 49,815 - 17,32 * X_1 + 2,3265 * X_1^2$; достоверность аппроксимации $R^2 = 0,99$.

В соответствии с полученными в результате аппроксимации уравнениями были определены значения коэффициентов уравнения (5) в зависимости от входного фактора «температура горячего воздуха» (X_2). В результате обработки значений коэффициентов a , b и c в зависимости от входного фактора «температура горячего воздуха» (X_2) в программе CurveExpert1.4 получены следующие уравнения:

$a = (-1,41 + 0,3105 * X_2) * \exp(X_2) + 29,5705$; достоверность аппроксимации $R^2 = 0,94$;

$b = (0,652 - 0,1464 * X_2) * \exp(X_2) - 5,8263$; достоверность аппроксимации $R^2 = 0,96$;

$c = (-0,07388 + 0,01702 * X_2) * \exp(X_2) + 0,7113$; достоверность аппроксимации $R^2 = 0,95$.

Таким образом, статистическая обработка результатов вычислительного эксперимента показала, что зависимость расхода биогенного топлива на теплоснабжение комплекса (Y^3) от входных факторов «расход горячего воздуха» (X_1) и «температура горячего воздуха» (X_2) может быть описана двухфакторной нелинейной регрессионной моделью в натуральном виде:

$$G_{top} = 29,57 + G(-58,263 + 71,13G) + e^{T/75} (-1,823 + G(8,418 + G(-9,519 + 0,03167T - 0,02724T) + 0,005778T) \quad (6)$$

где G_{top} - расход биогенного топлива на теплоснабжение комплекса, T - температура горячего воздуха, G - расход горячего воздуха.

Таким образом, полученные уравнения регрессии устанавливают количественную связь между технологическими параметрами (температура горячего воздуха, расход горячего воздуха.) и параметрами эффективности функционирования технико-технологической системы для теплоснабжения животноводческого комплекса: средняя температура внутри животноводческого комплекса, среднее квадратичное отклонение температуры внутри животноводческого комплекса, расхода биогенного топлива на теплоснабжение комплекса.

Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы» (государственный контракт № 16.552.11.7089 от 12 июля 2012 г.) с использованием оборудования ЦКП «ЭБЭЭ» ФГБОУ ВПО «ПГТУ».

Библиографический список

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. 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.

References

1. Sidyganov Ju. N. Rezul'taty matematicheskogo modelirovanija processov teplovogo peremeshivanija pri anajerobnom sbrazhivanii organicheskikh othodov / Ju. N. Sidyganov, E.

M. Onuchin, D. V. Kostromin, A. A. Medjakov // *Izvestija Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta.* – 2011. - № 24. – S. 332-338.

2. Onuchin E. M. Jeksperimental'nyj stend dlja issledovanija processov kataliticheskogo obogreva i peremeshivanija substrata pri anajerobnom sbrazhivanii / E. M. Onuchin, D. V. Kostromin, Ju. N. Sidyganov, A. A. Medjakov, R. V. Jablonskij // *Izvestija Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta.* – 2011. - № 24. – S. 348-355.

3. Sidyganov Ju. N. Matematicheskoe modelirovanie processov funkcionirovanija kataliticheskogo podogrevatelja pri obogreve bioreaktora anajerobnogo sbrazhivanija organicheskikh othodov / Ju. N. Sidyganov, E. M. Onuchin, D.V. Kostromin, A. A. Medjakov // *Izvestija Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta.* – 2011. - №25. – S. 231-237.

4. Onuchin E. M. Vychislitel'nyj jeksperiment raboty kataliticheskogo podogrevatelja pri obogreve bioreaktora anajerobnogo sbrazhivanija organicheskikh othodov / E. M. Onuchin, D. V. Kostromin, Ju. N. Sidyganov, A. A. Medjakov// *Izvestija Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta.* – 2011. - № 25. – S.250-256.