

## ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 681.5.015.22

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-3-58-65>

## Моделирование и идентификация элемента Пельтье ТЕС1-12706 для применения в малообъемных биореакторах искусственного ЖКТ рыб

**Ю.А. Иванов<sup>1</sup>, А.Д. Лукьянов<sup>2</sup>, Д.Ю. Донской<sup>3✉</sup>, Д.В. Рудой<sup>4</sup>**<sup>1</sup> Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; г. Москва, Россия<sup>2,3,4</sup> Донской государственный технический университет; г. Ростов-на-Дону, Россия<sup>1</sup> [vniimzh@mail.ru](mailto:vniimzh@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0002-6843-4556><sup>2</sup> [alexlukjanov1998@gmail.com](mailto:alexlukjanov1998@gmail.com); <https://orcid.org/0000-0002-3827-6569><sup>3</sup> [dand22@bk.ru](mailto:dand22@bk.ru); <https://orcid.org/0000-0002-3556-7758><sup>4</sup> [rudoy.d@gs.donstu.ru](mailto:rudoy.d@gs.donstu.ru); <https://orcid.org/0000-0002-1916-8570>

**Аннотация.** Биореактор статической мини-модели искусственного желудочно-кишечного тракта рыбы обеспечит моделирование процессов в ЖКТ промышленно выращиваемых рыб (карповых, форелевых, осетровых). Исследования проведены с целью изучения термодинамических процессов, происходящих в биореакторе, и возможности применения термоэлектрического преобразователя ТЕС1-12706 в системе контроля температуры биореактора. Температура в биореакторе объемом до 200 мл должна варьироваться от 45 до 14°C, точность поддержания температуры – 0,1°C. Как результат, была получена математическая модель с корректировкой по идентифицированным параметрам системы, что позволяет оценить термодинамические процессы в биореакторе, подобрать аппаратное оснащение и создать его общую математическую модель. Идентификация параметров элемента Пельтье осуществлялась с помощью макета-прототипа, измеряющего температуру холодной стороны преобразователя, горячего радиатора, окружающей среды, температуру жидкости в реакторе и потребляемый ток. Функционирование реальной системы происходило при внешней температуре 28,31°C, все физические накопители находились в температурном равновесии и в одинаковых начальных условиях. Сравнение температурных изменений в реальной системе и полученной нами математической модели в результате идентификации параметров элемента Пельтье показало, что соответствие значений было не идеальным, но характер изменения температур был идентичным. Сделаны следующие выводы: в математической модели необходимо учитывать дополнительные накопители и потоки, описывающие неидеальные условия экспериментальных данных: например, тепловое отражение рабочей поверхности стола и частичное отражение воздушных потоков. Для снижения температуры заполненного биореактора на 2...3°C достаточно 1/3 от максимальной мощности преобразователя. Таким образом, термоэлектрический преобразователь ТЕС1-12706 может применяться в системе *in vitro* моделирования желудочно-кишечного тракта рыб.

**Ключевые слова:** моделирование, идентификация, *in vitro*, биореактор, элемент Пельтье, ЖКТ рыбы

**Финансирование:** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-76-30006, <https://rscf.ru/project/23-76-30006/>.

**Для цитирования:** Иванов Ю.А., Лукьянов А.Д., Донской Д.Ю., Рудой Д.В. Моделирование и идентификация элемента Пельтье ТЕС1-12706 для применения в малообъемных биореакторах искусственного ЖКТ рыб // Агроинженерия. 2024. Т. 26, № 3. С. 58-65. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-3-58-65>

## ORIGINAL PAPER

**Modeling and identification of the Peltier element TEC1-12706 for use in low-volume bioreactors of the artificial gastrointestinal tract of fish**Yu.A. Ivanov<sup>1</sup>, A.D. Lukyanov<sup>2</sup>, D.Yu. Donskoy<sup>3</sup>✉, D.V. Rudoy<sup>4</sup><sup>1</sup> Federal Scientific Agroengineering Center VIM; Moscow, Russia<sup>2,3,4</sup> Don State Technical University; Rostov-on-Don, Russia<sup>1</sup> vniimzh@mail.ru.; <https://orcid.org/0000-0002-6843-4556><sup>2</sup> alexlukjanov1998@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-3827-6569><sup>3</sup> dand22@bk.ru✉; <https://orcid.org/0000-0002-3556-7758><sup>4</sup> rudoy.d@gs.donstu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1916-8570>

**Abstract.** The bioreactor of a static mini-model of the artificial gastrointestinal tract of fish will provide modeling of processes in the gastrointestinal tract of industrially grown fish (carp, trout, and sturgeon). The study aimed to determine the thermodynamic processes occurring in the bioreactor and the possibility of using the thermoelectric converter TEC1-12706 in the temperature control system of the bioreactor. The temperature in a bioreactor with a volume of up to 200 ml should vary from 45 to 14°C, the accuracy of maintaining the temperature is 0.1°C. As a result, a mathematical model was obtained with an adjustment according to the identified system parameters, which makes it possible to evaluate thermodynamic processes in the bioreactor, select hardware and create its general mathematical model. The parameters of the Peltier element were identified using a prototype layout measuring the temperature of the cold side of the converter, the hot radiator, the environment, the temperature of the liquid in the reactor, and the current consumed. The operation of the real system took place at an external temperature of 28.31°C; all physical drives were in the temperature equilibrium and under the same initial conditions. A comparison of temperature changes in the real system and the mathematical model obtained as a result of identifying the parameters of the Peltier element showed a non-perfect match of values, but the nature of the temperature change is identical. The following conclusions have been drawn: in the mathematical model, it is necessary to take into account additional drives and flows describing non-ideal conditions of experimental data, for example, thermal reflection of the working surface of the table and partial reflection of air flows. One third of the maximum converter power is sufficient to reduce the temperature of the filled bioreactor by 2 to 3°C. Thus, the thermoelectric converter TEC1-12706 can be used in an *in vitro* modeling system of the gastrointestinal tract of fish.

**Keywords:** modeling, identification, *in vitro*, bioreactor, Peltier element, digestive tract of fish

**Funding:** The research was funded by a grant from the Russian Science Foundation No. 23-76-30006, <https://rscf.ru/project/23-76-30006/>.

**For citation:** Ivanov Yu.A., Lukyanov A.D., Donskoy D.Yu., Rudoy D.V. Modeling and identification of the Peltier element TEC1-12706 for use in low-volume bioreactors of the artificial gastrointestinal tract of fish. *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2024;26(3):58-65. (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-3-58-65>

**Введение**

Автоматизация исследований и совершенствование методов *in vitro* моделирования органов живых существ являются комплексной задачей, требующей реализации программно-аппаратного наблюдения и тонкого контроля параметров для создания в биореакторах среды, подобной реальной у носителя микробиоты. Данная область науки является молодой, а моделирование ЖКТ животных – одна из важных задач для ветеринаров, биологов и фармакологов, решение которой позволит проводить исследования более дешево, быстро и гуманно. Моделирование и идентификация параметров термоэлектрического преобразователя TEC1-12706 позволит внедрить его

в систему контроля температуры биореактора статической мини-модели искусственного ЖКТ рыбы. Рабочий объем подобных систем менее 200 мл, что потенциально позволит контролировать температуру на не пиковой мощности данного преобразователя [1, 2].

**Цель исследований:** разработка математической модели элемента Пельтье TEC1-12706; численная оценка возможности применения данного термоэлектрического преобразователя в системе *in vitro* моделирования ЖКТ рыб; анализ термодинамических процессов, происходящих в биореакторе.

Результаты исследований, изложенные в данной статье и статье «Математическая модель системы

управления рН в *in vitro* модели желудочно-кишечного тракта домашней птицы» [3], направлены на создание комплексной модели системы контроля параметров среды в биореакторе.

**Материалы и методы**

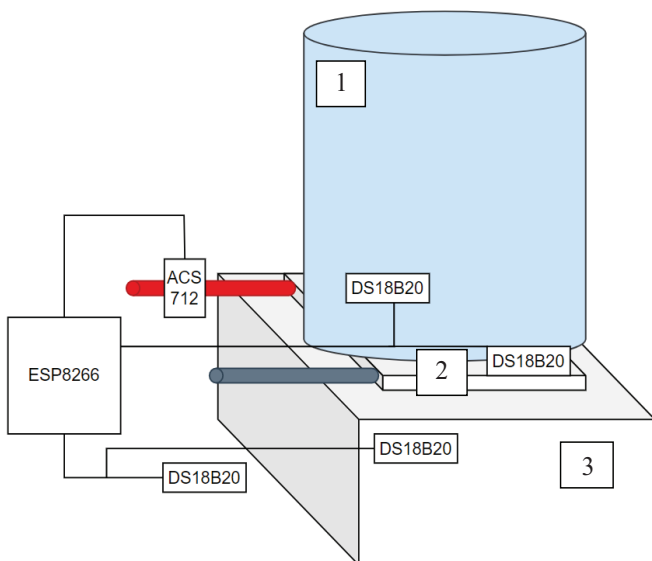
*Прототип для анализа параметров термоэлектрического преобразователя.* Идентификация параметров элемента Пельтье осуществлялась с помощью макета-прототипа, измеряющего температуру холодной стороны преобразователя, горячего радиатора, окружающей среды, температуру жидкости в реакторе и потребляемый ток (рис. 1). Макет, оснащенный лабораторным блоком питания E3632A Agilent Technologies, базируется на микроконтроллере ESP8266 для сохранения данных на удаленном носителе через интернет. Для измерения температуры применялись датчики DS18B20. Контроль токопотребления осуществлялся с помощью датчика ACS712(20A), откалиброванного по лабораторному блоку питания E3632A Agilent Technologies [3, 4].

При изучении физических взаимодействий элементов рассматриваемой системы представим ее структуру без реактора [5-7] (рис. 2).

Уравнение, описывающее поток тепла от холодной стороны элемента Пельтье в воздух, представлено уравнением:

$$q_1 = S_{pel} (a_0 + a_1 v_{air}) (\theta_{out} - \theta_1), \tag{1}$$

где  $v_{air}$  – скорость воздуха в комнате, м/с;  $a_0$  и  $a_1$  – константы теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\theta_{out}$  – температура воздуха, К;  $\theta_1$  – температура холодной стороны элемента Пельтье, К.



**Рис. 1. Структура прототипа:**

1 – биореактор; 2 – элемент Пельтье; 3 – радиатор

**Fig. 1. Structure of the prototype:**

1 – bioreactor; 2 – Peltier element; 3 – radiator

Поток тепла, передаваемый от холодной стороны термоэлектрического преобразователя его горячей стороне с учетом наличия припоя, –

$$q_2 = S_{ps} \left( \frac{A_{t1}}{d_{t1}} + \frac{A_{TB}}{d_{TB}} \right) (\theta_2 - \theta_1), \tag{2}$$

где  $A_{t1}$  и  $A_{TB}$  – соответственно теплопроводность припоя и полупроводника элемента Пельтье, Вт/(м·К);  $d_{t1}$  – толщина припоя, м;  $d_{TB}$  – толщина полупроводниковых элементов в термоэлектрическом преобразователе, м;  $\theta_2$  – температура горячей стороны элемента Пельтье, К.

Джоулев нагрев описывается третьим потоком:

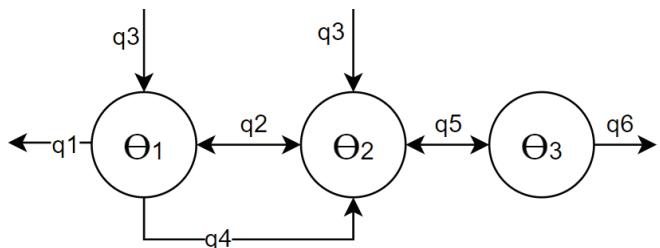
$$q_3 = 0,5 \cdot I^2 R, \tag{3}$$

где  $I$  – сила тока, А;  $R$  – сопротивление элемента Пельтье, Ом.

Перекачивание тепла на основе эффекта Пельтье описывается потоком 4:

$$q_4 = \Pi_p \cdot t \cdot I, \tag{4}$$

где  $\Pi_p$  – коэффициент Пельтье;  $t$  – абсолютная температура полупроводниковых элементов (принимается как температура моделируемой стороны), К.



**Рис. 2. Структурная схема модели:**

$\theta_1, \theta_2, \theta_3$  – соответственно накопитель теплоты в холодной и горячей стороне элемента Пельтье и в радиаторе;

- $q_1$  – поток тепла от холодной стороны элемента Пельтье в воздух;
- $q_2$  – поток тепла от холодной стороны термоэлектрического преобразователя его горячей стороне;
- $q_3$  – потоки тепла в результате Джоулевого нагрева;
- $q_4$  – поток тепла в результате эффекта Пельтье;
- $q_5$  – поток тепла от горячей стороны элемента Пельтье к радиатору охлаждения;
- $q_6$  – поток тепла, передаваемый от радиатора охлаждения в воздух

**Fig. 2. Block diagram of the model:**

$\theta_1, \theta_2, \theta_3$  – accordingly, the heat storage in the cold and hot side of the Peltier element and in the radiator;

- $q_1$  – heat flow from the cold side of the Peltier element into the air;
- $q_2$  – heat flow from the cold side of the thermoelectric converter to its hot side;
- $q_3$  – heat flows as a result of Joule heating;
- $q_4$  – heat flow as a result of the Peltier effect;
- $q_5$  – heat flow from the hot side of the Peltier element to the cooling radiator;
- $q_6$  – the heat flow transferred from the cooling radiator to the air

Поток тепла от горячей стороны элемента Пельтье к радиатору охлаждения:

$$q_5 = S_p \frac{A_{t2}}{d_{t2}} (\theta_3 - \theta_2), \quad (5)$$

где  $S_p$  – площадь соприкосновения элемента Пельтье с радиатором,  $m^2$ ;  $A_{t2}$  – теплопроводность термопасты,  $Вт/(м \cdot К)$ ;  $d_{t2}$  – толщина термопасты,  $м$ ;  $\theta_3$  – температура радиатора охлаждения,  $К$ .

Поток тепла, передаваемый от радиатора охлаждения в воздух, –

$$q_6 = S_{rh} (a_0 + v_{air_{fan}}) (\theta_{out} - \theta_3), \quad (6)$$

где  $v_{air_{fan}}$  – скорость ветра, создаваемая активным охлаждением (вентилятором),  $м/с$ .

Накопителями в данной системе являются две керамические стенки элемента Пельтье и радиатор охлаждения.

Для керамических пластин накопители описываются следующими уравнениями [8, 9]:

$$\begin{aligned} dQ_1 &= c_a \rho_a V_a \cdot d\theta_1 \\ dQ_2 &= c_a \rho_a V_a \cdot d\theta_2, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $c_a$  – удельная теплоемкость керамики,  $Дж/(кг \cdot К)$ ;  $\rho_a$  – плотность керамики,  $кг/м^3$ ;  $V_a$  – объем керамической пластины,  $м^3$ ;  $Q_1$  и  $Q_2$  – соответственно количество теплоты в пластинах холодной и горячей стороны элемента Пельтье,  $Дж$ .

Для радиатора охлаждения накопители описываются как

$$dQ_3 = c_r \rho_r V_r \cdot d\theta_3. \quad (8)$$

Из уравнений (1-8) методом накопителей и потоков можно составить математическую модель, описывающую термодинамический процесс работы элемента Пельтье:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d\theta_1}{dt} &= \frac{1}{c_a \rho_a V_a} \left( S_{pel} (a_0 + a_1 v_{air}) (\theta_{out} - \theta_1) + S_{Ps} \left( \frac{A_{t1}}{d_{t1}} + \frac{A_{TB}}{d_{TB}} \right) (\theta_2 - \theta_1) - \Pi_p \cdot \theta_1 \cdot I + 0,5 \cdot I^2 R \right) \\ \frac{d\theta_2}{dt} &= \frac{1}{c_a \rho_a V_a} \left( S_{Ps} \left( \frac{A_{t1}}{d_{t1}} + \frac{A_{TB}}{d_{TB}} \right) (\theta_1 - \theta_2) + \Pi_p \cdot \theta_2 \cdot I + 0,5 \cdot I^2 R + S_p \frac{A_{t2}}{d_{t2}} (\theta_3 - \theta_2) \right) \\ \frac{d\theta_3}{dt} &= \frac{1}{c_r \rho_r V_r} \left( S_p \frac{A_{t2}}{d_{t2}} (\theta_2 - \theta_3) + S_{rh} (a_0 + a_1 v_{air_{fan}}) (\theta_{out} - \theta_3) \right) \end{aligned} \right. \quad (9)$$

Для моделирования реальных процессов с помощью описанной выше модели требуется идентифицировать физические параметры системы и функциональные зависимости некоторых нестационарных физических параметров элемента Пельтье.

*Идентификация параметров полученной математической модели.* Для идентификации параметров термоэлектрического преобразователя проведен ряд экспериментов, в которых изменялось входное напряжение при неограниченном потреблении тока. Датчик температуры радиатора был максимально приближен к элементу Пельтье.

Первым и основным параметром данного термоэлектрического преобразователя является его сопротивление. При подаче какого-либо напряжения на преобразователь через него начинает течь ток, но в количественном отношении он является непостоянным и изменяется со временем относительно пускового значения, причем колебания могут быть как в положительную, так и в отрицательную сторону. Это происходит по причине изменения градиента температур по всей толщине термоэлектрического преобразователя, что изменяет его сопротивление.

Для упрощения расчетов нашей модели будем опираться на расчетную абсолютную температуру в центре термоэлектрического преобразователя. Таким образом, задача сводится к поиску оптимальной с точки зрения минимизации суммы квадратов отклонений функции, описывающей сопротивление TEC1-12706:

$$R = f\left(\frac{\theta_2 + \theta_1}{2}, U\right). \quad (10)$$

В результате анализа полученного набора данных с помощью полиномиальной аппроксимации методом наименьших квадратов (11) сформирована регрессионная модель изменения сопротивления элемента Пельтье [10, 11]:

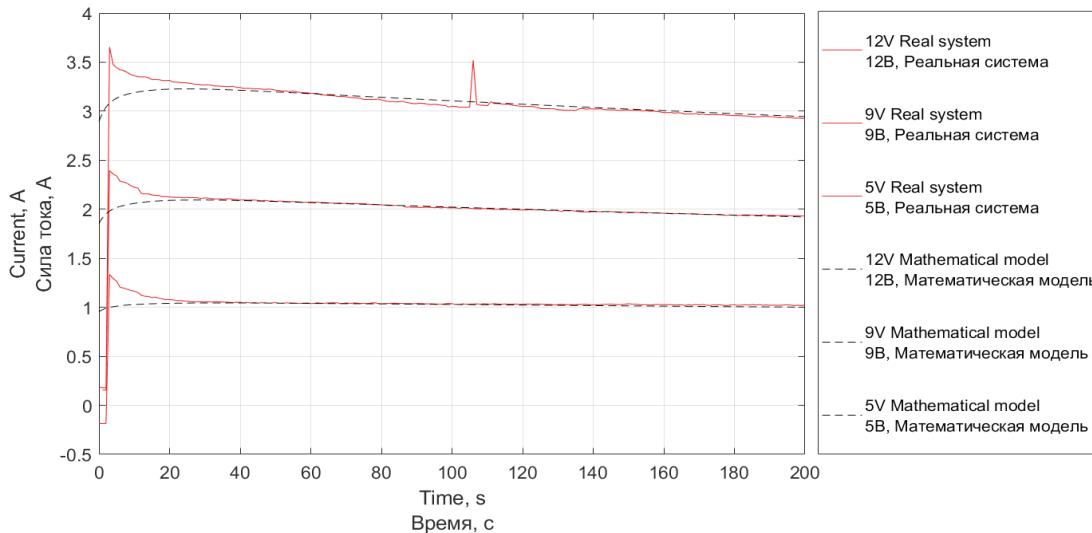
$$R = p_{00} + p_{10} \cdot x + p_{01} \cdot y + p_{20} \cdot x^2 + p_{11} \cdot x \cdot y + p_{02} \cdot y^2 + p_{21} \cdot x^2 \cdot y + p_{12} \cdot x \cdot y^2 + p_{03} \cdot y^3, \quad (11)$$

где  $x$  – температура горячей стороны элемента Пельтье,  $К$ ;  $y$  – температура холодной стороны,  $К$ ;  $p$  – безразмерные коэффициенты ( $p_{00} = 4,491$ ;  $p_{10} = 0,02123$ ;  $p_{01} = -0,09192$ ;  $p_{20} = -1,563 \cdot 10^{-17}$ ;  $p_{11} = 0,005907$ ;  $p_{02} = 0,006333$ ;  $p_{21} = 1,386 \cdot 10^{-18}$ ;  $p_{12} = -0,0004636$ ;  $p_{03} = -0,0005059$ ).

Полученная модель имеет следующую характеристику: SSE  $3.116 \cdot 10^{-29}$ ; R-square 1; Adjusted R-square 1; RMSE.  $1.218 \cdot 10^{-15}$ .

Идентифицированная модель соответствует реальным данным (рис. 3).

Отличие начальных характеристик обусловлено неравномерностью распределения температур



**Рис. 3. Сравнение изменения сопротивления TEC1-12706 математической модели с реальной системой**  
**Fig. 3. Comparison of the resistance variation of the TEC1-12706 mathematical model with a real system**

и внутренней структурой, а также относительно низким начальным сопротивлением. Отметим, что при использовании элемента Пельтье необходимо наблюдать за динамикой роста температуры горячей стороны. Для обеспечения лучшего охлаждения радиатор должен находиться на отдалении от любых тепловых экранов (например, рабочего стола). В противном случае в математическую модель требуется вносить физические параметры данного экрана, так как в реальной системе будет наблюдаться его влияние. Данный эффект влияет на изменение сопротивления в процессе работы, что прослеживается при повышении мощности преобразователя (рис. 3) [12].

Аналогичная оценка коэффициента Пельтье относительно подаваемого на термоэлектрический преобразователь напряжения представлена на рисунке 4. Диапазон напряжений ограничен максимальным рабочим напряжением питания TEC1-12706.

С основой на идентифицированных параметрах TEC1-12706 сформирована схема математической модели в прикладном пакете Matlab Simulink [13]. Полученная модель позволяет оценить и верифицировать идентифицированные характеристики системы на основе реальной модели.

**Результаты и их обсуждение**

Функционирование реальной системы происходило при внешней температуре 28,31°C, все физические накопители находились в температурном равновесии и в одинаковых начальных условиях.

Анализируя данные рисунка 5, можно говорить о качественном и количественном соответствии математической модели и реальной системы. Однако существуют физические параметры, требующие дальнейшего уточнения: теплопроводность TEC1-12706,

удельная теплоемкость керамических пластин, теплопроводность припоя, используемого в местах контакта полупроводников, и т.п. Стоит помнить, что теплопроводность может меняться при изменении абсолютной температуры.

Для анализа влияния термоэлектрического преобразователя на биореактор следует внести в нашу модель (рис. 2) уравнения, описывающие физические параметры системы, и дополнить структуру модели накопителями ( $\theta_4, \theta_5$ ) и потоками ( $q_7 \dots q_{11}$ ) (рис. 6).

Потоки тепла, передаваемые от холодной стороны элемента Пельтье биореактору, описываются потоком 7:

$$q_7 = S_{pel} \frac{A_t}{d_t} (\theta_1 - \theta_5), \tag{12}$$

где  $S_{pel}$  – площадь соприкосновения термоэлектрического преобразователя и реактора, м<sup>2</sup>;  $A_t$  – теплопроводность термоинтерфейса, Вт/(м·К);  $d_t$  – толщина термоинтерфейса, м;  $\theta_5$  – температура биореактора, К.

Взаимодействие реактора с окружающим его воздухом описывается потоком 8:

$$q_8 = S_b (a_0 + a_1 v_{air}) (\theta_{out} - \theta_5), \tag{13}$$

где  $S_b$  – площадь поверхности биореактора, взаимодействующая с воздухом, м;  $\theta_5$  – температура реактора, К.

Перенос тепла между реактором и его содержимым описывается потоком 9:

$$q_9 = S_{in} (a_{0w} + a_{1w} \sqrt{v_{ch}}) (\theta_5 - \theta_4), \tag{14}$$

где  $\alpha_{0w}, \alpha_{1w}$  – коэффициенты теплоотдачи движущейся воды, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $v_{ch}$  – скорость движения содержимого реактора, м/с;  $S_{in}$  – площадь соприкосновения содержимого со стенками биореактора, м<sup>2</sup>;  $\theta_4$  – температура содержимого биореактора, К.

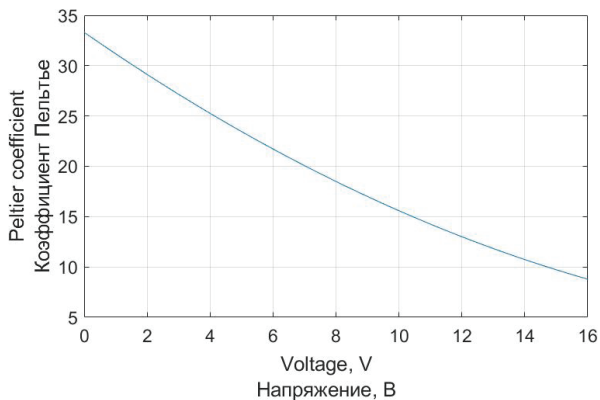


Рис. 4. Регрессионная модель изменения коэффициента Пельтье TEC1-12706

Fig. 4. Regression model of the Peltier coefficient variation TEC1-12706

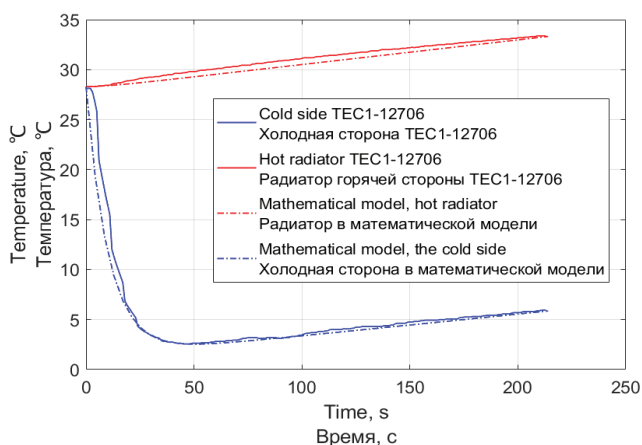


Рис. 5. Сравнение математической модели с реальной системой

Fig. 5. Comparison of a mathematical model with a real system

Перенос тепла от содержимого реактора через его стенки в воздух описывается потоком 10:

$$q_{10} = \frac{A_{gl} S_{ch}}{d_{gl}} (\theta_{out} - \theta_4), \quad (15)$$

где  $A_{gl}$  – коэффициент теплопроводности материала биореактора, Вт/(м·К);  $S_{ch}$  – площадь поверхности, передающей тепло, м<sup>2</sup>;  $d_{gl}$  – толщина стенки реактора, м.

$$\begin{cases} \frac{d\theta_4}{dt} = \frac{1}{c_{ch}\rho_{ch}V_{ch}} \left( S_{in} (a_0 + a_1\sqrt{v_h}) (\theta_5 - \theta_4) + \frac{A_{gl}S_{ch}}{d_{gl}} (\theta_{out} - \theta_4) + \frac{A_{gl}S_{pel}}{d_{gl}} (\theta_1 - \theta_4) \right), \\ \frac{d\theta_5}{dt} = \frac{1}{c_{gl}\rho_{gl}V_b} \left( S_{bot} (a_0 + a_1\sqrt{v_h}) (\theta_4 - \theta_5) + S_b (a_0 + a_1v_{air}) (\theta_{out} - \theta_5) + S_{pel} \frac{A_t}{d_t} (\theta_1 - \theta_5) \right), \\ \frac{d\theta_1}{dt} = \frac{1}{c_a\rho_aV_a} \left( S_{pel} (a_0 + a_1v_{air}) (\theta_{out} - \theta_1) + S_{Ps} \left( \frac{A_{t1}}{d_{t1}} + \frac{A_{TB}}{d_{TB}} \right) (\theta_2 - \theta_1) + \frac{A_{gl}S_{pel}}{d} (\theta_4 - \theta_1) - \Pi_p \cdot \theta_1 \cdot I + 0,5 \cdot I^2 R \right), \\ \frac{d\theta_2}{dt} = \frac{1}{c_a\rho_aV_a} \left( S_{Ps} \left( \frac{A_{t1}}{d_{t1}} + \frac{A_{TB}}{d_{TB}} \right) (\theta_1 - \theta_2) + \Pi_p \cdot \theta_2 \cdot I + 0,5 \cdot I^2 R + S_p \frac{A_{t2}}{d_{t2}} (\theta_3 - \theta_2) \right), \\ \frac{d\theta_3}{dt} = \frac{1}{c_r\rho_rV_r} \left( S_p \frac{A_{t2}}{d_{t2}} (\theta_2 - \theta_3) + S_{rh} (a_0 + a_1v_{air_{fan}}) (\theta_{out} - \theta_3) \right). \end{cases} \quad (17)$$

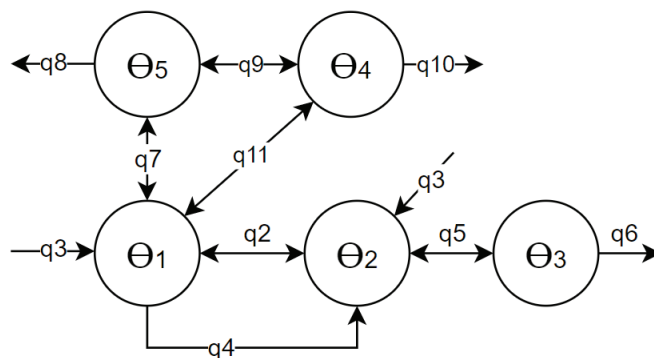


Рис. 6. Структурная схема модели с биореактором и его наполнением:

$\theta_4, \theta_5$  – соответственно накопитель теплоты содержимого биореактора и накопитель теплоты в материале реактора;  
 $q_7$  – поток от холодной стороны элемента Пельтье биореактору;  
 $q_8$  – поток от реактора к окружающему его воздуху;  
 $q_9$  – поток тепла между реактором и его содержимым;  
 $q_{10}$  – поток тепла от содержимого реактора через его стенки в воздух;  
 $q_{11}$  – поток теплообмена содержимого реактора с элементом Пельтье

Fig. 6. Block diagram of a model with a bioreactor and its filling:

$\theta_4, \theta_5$  – heat storage of the bioreactor contents and heat storage in the reactor material, respectively;  
 $q_7$  – flow from the cold side of the Peltier element to the bioreactor;  
 $q_8$  – flow from the reactor to the air surrounding it;  
 $q_9$  – heat flow between the reactor and its contents;  
 $q_{10}$  – heat flow from the contents of the reactor through its walls into the air;  
 $q_{11}$  – flow heat exchange of reactor contents with the Peltier element

Теплообмен содержимого реактора с элементом Пельтье описывается с помощью потока 11:

$$q_{11} = \frac{A_{gl} S_{pel}}{d_{gl}} (\theta_1 - \theta_4). \quad (16)$$

Результирующая математическая модель описывается следующей системой уравнений:

Моделирование с идентифицированными параметрами биореактора и его содержимого позволило оценить изменение температур в макете. Сравним температурные изменения в реальной системе и в полученной нами математической модели (рис. 7).

Согласно рисунку 7 полученная математическая модель не идеально описывает изменение температур в системе, что обусловлено сложностью идентификации кривых теплопроводности элемента Пельтье. Однако качественно данная модель показывает

характер изменения температур и говорит о том, что 1/3 от максимальной мощности TEC1-12706 уже достаточно для снижения температуры заполненного биореактора на 2...3°C. Данная модель требует дальнейших исследований и внедрения ее в уже разработанную модель системы контроля pH малообъемных биореакторов. Интеграция двух систем в единую модель мини-биореактора позволит повысить качество моделирования и максимально приблизит моделируемые процессы к реальным.

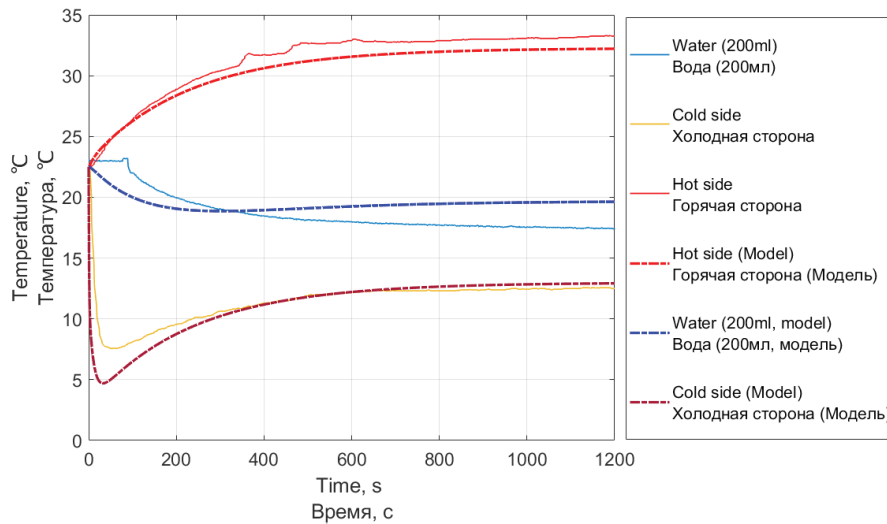


Рис. 7. Переходные характеристики модели и реальной системы

Fig. 7. Transitional characteristics of the model and the real system

**Выводы**

1. Полученная математическая модель и идентифицированные параметры элемента Пельтье не идеально описывают изменение температуры в системе, но дают понять характер переходных процессов. Для снижения температуры заполненного биореактора на 2...3°C достаточно 1/3 от максимальной мощности

TEC1-12706. Для приближения к реальной системе в модель необходимо внести дополнительные накопители и учесть потоки, описывающие неидеальные условия при получении экспериментальных данных.

2. Термоэлектрический преобразователь TEC1-12706 может применяться в системе *in vitro* моделирования желудочно-кишечного тракта рыб.

**Список источников / References**

1. Verhoeckx K, Cotter P, López-Expósito I, et al. The Impact of Food Bioactives on Health: in vitro and ex vivo models [Internet]. Cham (CH): Springer; 2015. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK500148/>

2. Van de Wiele T., Van den Abbeele P., Osseur W., Possemiers S., Marzorati M. The Simulator of the Human Intestinal Microbial Ecosystem (SHIME®). The Impact of Food Bioactives on Health. Springer. Cham. 2015. Pp. 305-317. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-16104-4\\_27](https://doi.org/10.1007/978-3-319-16104-4_27)

3. Донской Д.Ю., Лукьянов А.Д., Филипович В., Астен Т.Б. Математическая модель системы управления pH в *in vitro* модели желудочно-кишечного тракта домашней птицы. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2023;23(1):95-106. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-1-95-106>

Donskoy D.Yu., Lukyanov A.D., Filipovič V., Asten T.B. Mathematical Model of the pH control system in an *in vitro* model of the gastrointestinal tract of poultry. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2023;23(1):95-106. (In Russ.) <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-1-95-106>

4. Mandalari G., Chessa S., Bisignano C., Chan L., Carughi A. The effect of sun-dried raisins (*Vitis vinifera* L.) on the *in vitro* composition of the gut microbiota. *Food & Function*. 2016;7(9):4048-4060. <http://dx.doi.org/10.1039/C6FO01137C>

5. Donskoy D., Katin O., Alekseenko L. Development and implementation of the GIT-modeling bioreactor system: the way to reducing a carbon footprint. *E3S Web of Conferences*. 2021;279:01030. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202127901030>

6. Лапшин В.П., Туркин И.А., Закалюжный А.А. Синтез управления, стабилизирующего режимы работы термодинамической системы // *Наукоемкие технологии в машиностроении*. 2019. №3. С. 43-48. [https://doi.org/10.30987/article\\_5c7434fd136d59.56723792](https://doi.org/10.30987/article_5c7434fd136d59.56723792)

Lapshin V.P., Turkin I.A., Zakalyuzhniy A.A. Synthesis of management stabilizing operation modes of thermodynamic system. *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. 2019;3:43-48. (In Russ.) [https://doi.org/10.30987/article\\_5c7434fd136d59.56723792](https://doi.org/10.30987/article_5c7434fd136d59.56723792)

7. Lukyanov A., Donskoy D., Bykador V., Chuveyko M., Kasyanenko E. Simulation of thermodynamic systems with a thermoelectric converter based on the Peltier element for energy efficient management. *E3S Web of Conferences*. 2019;104:01001. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910401001>

8. Майстренко А.В. Тепловой расчет конструкций. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2021. Т. 21, № 3. С. 260-267. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-3-260-267>

Maistrenko A.V. Thermal calculation of structures. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2021;21(3):260-267. (In Rus.) <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-3-260-267>

9. Mao J., Du J., Wang S., Zhou J., Wang Y. The transient supercooling enhancement for a pulsed thermoelectric cooler (TEC). *International Refrigeration and Air Conditioning Conference*. 2016. Paper 1773. <http://docs.lib.purdue.edu/iracc/1773>

10. Snyder G.J., Soto M., Alley R., Koester D., Conner B. Hot spot cooling using embedded thermoelectric coolers.

*Twenty-Second Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement And Management Symposium*, Dallas, TX, USA, 2006, pp. 135-143. <https://doi.org/10.1109/STHERM.2006.1625219>

11. Piggott A. Transient thermoelectric supercooling: Isosceles current pulses from a response surface perspective and the performance effects of pulse cooling a heat generating mass. 2015. Vol. 55-03. 130 p. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2015PhDT.....160P/abstract>

12. Okawa K., Amagai Y., Fujiki H., Kaneko N. Reverse heat flow with Peltier-induced thermoinductive effect. *Commun Phys*. 2021;4:267. <https://doi.org/10.1038/s42005-021-00772-4>

13. Remeli M., Bakaruddin N., Shawal S., Husin H., Othman M., Singh B. Experimental study of a mini cooler by using Peltier thermoelectric cell. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;788:012076. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/788/1/012076>

### Информация об авторах

**Юрий Анатольевич Иванов**<sup>1</sup>, академик РАН, профессор, д-р с.-х. наук; [vniimzh@mail.ru](mailto:vniimzh@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-6843-4556>

**Александр Дмитриевич Лукьянов**<sup>2</sup>, канд. техн. наук, заведующий кафедрой «Автоматизация производственных процессов»; [alexlukjanov1998@gmail.com](mailto:alexlukjanov1998@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-3827-6569>

**Данила Юрьевич Донской**<sup>3</sup>, аспирант; [dand22@bk.ru](mailto:dand22@bk.ru), <https://orcid.org/0000-0002-3556-7758>

**Дмитрий Владимирович Рудой**<sup>4</sup>, канд. техн. наук, декан факультета «Агропромышленный»; [rudoy.d@gs.donstu.ru](mailto:rudoy.d@gs.donstu.ru), <https://orcid.org/0000-0002-1916-8570>

<sup>1</sup> Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; 109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, 5

<sup>2,3,4</sup> Донской государственный технический университет; 344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1

### Вклад авторов

Ю.А. Иванов – концептуализация, анализ результатов исследования;

А.Д. Лукьянов – научное руководство исследованиями, моделирование, анализ литературных источников, создание черновика рукописи;

Д.Ю. Донской – математическое моделирование, идентификация параметров, анализ литературных источников, создание черновика рукописи;

Д.В. Рудой – методология, формальный анализ, визуализация.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат.

Статья поступила 06.12.2023, после рецензирования и доработки 29.04.2024; принята к публикации 30.04.2024

### Author Information

**Yuriy A. Ivanov**<sup>1</sup>, Full Member of the Russian Academy of Sciences, Professor, DSc (Ag); [vniimzh@mail.ru](mailto:vniimzh@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-6843-4556>

**Alexandr D. Lukyanov**<sup>2</sup>, CSc (Eng), Head of the Department “Automation of Production Processes”; [alexlukjanov1998@gmail.com](mailto:alexlukjanov1998@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-3827-6569>

**Danila Yu. Donskoy**<sup>3</sup>, postgraduate student; [dand22@bk.ru](mailto:dand22@bk.ru), <https://orcid.org/0000-0002-3556-7758>

**Dmitry V. Rudoy**<sup>4</sup>, CSc (Eng), Dean of the Agroindustrial Faculty; [rudoy.d@gs.donstu.ru](mailto:rudoy.d@gs.donstu.ru), <https://orcid.org/0000-0002-1916-8570>

<sup>1</sup> Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 1st Institutskiy Proezd Str., 5, Moscow, 109428, Russian Federation

<sup>2,3,4</sup> Don State Technical University; Gagarina Square, 1, Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation

### Author Contribution

Yu.A. Ivanov – conceptualization, analysis of research results;

A.D. Lukyanov – research supervision, modeling, literature review, writing – original draft preparation;

D.Yu. Donskoy – mathematical modeling, identification of parameters, literature review, writing – original draft preparation;

D.V. Rudoy – methodology, formal analysis, visualization.

### Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article and bear equal responsibility for plagiarism.

Received 06.12.2023, Revised 29.04.2024, Accepted 30.04.2024