

**Математическая модель для автоматизированного управления тепловыми потоками энергоэффективной системы вентиляции**

**В. С. Ежов**<sup>1</sup> ✉, **Н. Е. Семичева**<sup>1</sup>, **Д. Н. Тютюнов**<sup>1</sup>, **А. П. Бурцев**<sup>1</sup>,  
**Н. С. Перепелица**<sup>1</sup>, **А. П. Бурцев**<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Юго-Западный государственный университет  
ул. 50 лет Октября 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: vl-ezhov@yandex.ru

**Резюме**

**Цель исследования.** В современных системах вентиляции и кондиционирования (СКВ) одной из главных составляющих является система автоматического управления (САУ), выполняющая различные функции, а также обеспечивающая высокоэффективную работу в диапазоне от функций выключения до централизованного регулирования и управления климатическими параметрами (температура, влажность воздуха, контроль за концентрациями вредных веществ, скорость воздуха). Целью является исследование математической модели управления тепловыми потоками системы приточно-вытяжной вентиляции со встроенным комплексным теплообменником-рекуператором с целью утилизации низкопотенциального тепла вентиляционных газов и выбросов с попутным получением термозлектричества.

**Методы.** Для достижения поставленных целей в работе использовались методы математического моделирования и создания расчетной модели. В основе автоматического управления СКВ положен принцип обратной связи – регулирования процессов за счет получения информации от внешних датчиков на основе математического моделирования физических процессов, происходящих в обслуживаемом здании или сооружении.

**Результаты.** Экспериментальная приточно-вытяжная установка с пластинчатым теплообменником-рекуператором, работает в квазистационарном режиме теплопередачи. В качестве нагревающей среды используется вытяжной воздух, удаляемый из помещения. При этом управление системой происходит при независимой схеме присоединения к системе теплоснабжения. Нагреваемый в помещении воздух рассматривается как несжимаемый газ, теплообмен между нагревающим и нагреваемым теплоносителями является стационарным процессом, турбулентность нагревающего и нагреваемого потоков теплоносителей является изотропной. Результатом исследования является математическая модель управления тепловыми потоками в системе приточно-вытяжной вентиляции со встроенным комплексным теплообменником-рекуператором. Получены оптимальные значения затрачиваемой тепловой энергии и параметров работы вентиляционной установки.

**Заключение.** Предложена и исследована математическая модель управления тепловыми потоками в системе приточно-вытяжной вентиляции со встроенным комплексным теплообменником-рекуператором. Получены оптимальные значения затрачиваемой тепловой энергии и параметров работы вентиляционной установки.

**Ключевые слова:** приточно-вытяжная установка; утилизация; коэффициент теплопередачи; электрическая мощность; эффективность; автономность; вентиляционные газы; термоэлектричество.

**Конфликт интересов:** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках научно-исследовательской работы №1.12.20ф «Исследование алгоритмов, моделей и методов повышения эффективности функционирования сложных технических систем».

**Для цитирования:** Математическая модель для автоматизированного управления тепловыми потоками энергоэффективной системы вентиляции / В. С. Ежов, Н. Е. Семичева, Д. Н. Тютюнов, А. П. Бурцев, Н. С. Перепелица, А. П. Бурцев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021; 25(1): 38-52. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-1-38-52>.

Поступила в редакцию 14.01.2021

Подписана в печать 02.02.2021

Опубликована 31.03.2021

## A Mathematical Model for Automated Heat Flow Control of an Energy-Efficient Ventilation System

Vladimir S. Yezhov <sup>1</sup>✉, Natalya E. Semicheva <sup>1</sup>, Dmitriy N. Tyutyunov <sup>1</sup>,  
Alexey P. Burtsev <sup>1</sup>, Nikita S. Perepelitsa <sup>1</sup>, Alexander P. Burtsev <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Southwest State University  
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: vl-ezhov@yandex.ru

### Abstract

**Purpose of research.** In modern ventilation and air conditioning systems (VAC), one of the main components is an automatic control system (ACS) which performs various functions and also provides highly efficient operation in the range from shutdown functions to centralized regulation and control of climate parameters (temperature, humidity, monitoring concentrations of harmful substances, air speed). The goal is to study a mathematical model of heat flow control of a supply and exhaust ventilation system with a built-in integrated recuperative heat exchanger for the purpose of utilization of low-temperature heat of ventilation gases and emissions with the associated production of thermoelectricity.

**Methods.** To achieve these goals, we used methods of mathematical simulation and computational model development. The automatic control of VAC is based on the principle of feedback – regulation of processes by obtaining information from external sensors based on mathematical simulation of physical processes occurring in the building or structure serviced.

**Results.** An experimental supply and exhaust system with a plate heat exchanger-recuperator operates in a quasi-steady heat transfer mode. Exhaust air removed from the room is used as a heating medium. At the same time, the system is controlled using an independent scheme of connection to the heat supply system. The air heated in the room is considered as an incompressible gas, the heat exchange between the heating and heated heat transfer media is a steady-state process, the turbulence of the heating and heated flow of heat transfer media is isotropic. The result of the study is a mathematical model of heat flow control in the supply and exhaust ventilation system with a built-in integrated heat exchanger-recuperator. The optimal values of the heat energy consumed and the parameters of the ventilation system operation are obtained.

**Conclusion.** A mathematical model of heat flow control in a supply and exhaust ventilation system with a built-in integrated heat exchanger-recuperator is proposed and investigated. The optimal values of the consumed heat energy and the parameters of the ventilation system operation are obtained.

**Keywords:** supply and exhaust system; utilization; heat transfer coefficient; electrical power; efficiency; autonomy; ventilation gases; thermoelectricity.

**Conflict of interest.** The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

**Funding.** The work was carried out within the framework of research work No. 1.12.20 f "Research of algorithms, models and methods for improving the efficiency of complex technical systems".

**For citation:** Yezhov V. S., Semicheva N. E., Tyutyunov D. N., Burtsev A. P., Perepelitsa N. S., Burtsev A. P. A Mathematical Model for Automated Heat Flow Control of an Energy-Efficient Ventilation System. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2021; 25(1): 38-52 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-1-38-52>.

Received 14.01.2021

Accepted 02.02.2020

Published 31.03.2021

\*\*\*

## Введение

В современных системах вентиляции и кондиционирования (СКВ) одной из главных составляющих является система автоматического управления (САУ), выполняющая различные функции, а также обеспечивающая высокоэффективную работу в диапазоне от функций выключения до централизованного регулирования и управления климатическими параметрами (температура, влажность воздуха, контроль за концентрациями вредных веществ, скорость воздуха).

В основе автоматического управления СКВ положен принцип обратной связи – регулирования процессов за счет получения информации от внешних датчиков на основе математического моделирования физических процессов, происходящих в обслуживаемом здании или сооружении.

## Материалы и методы

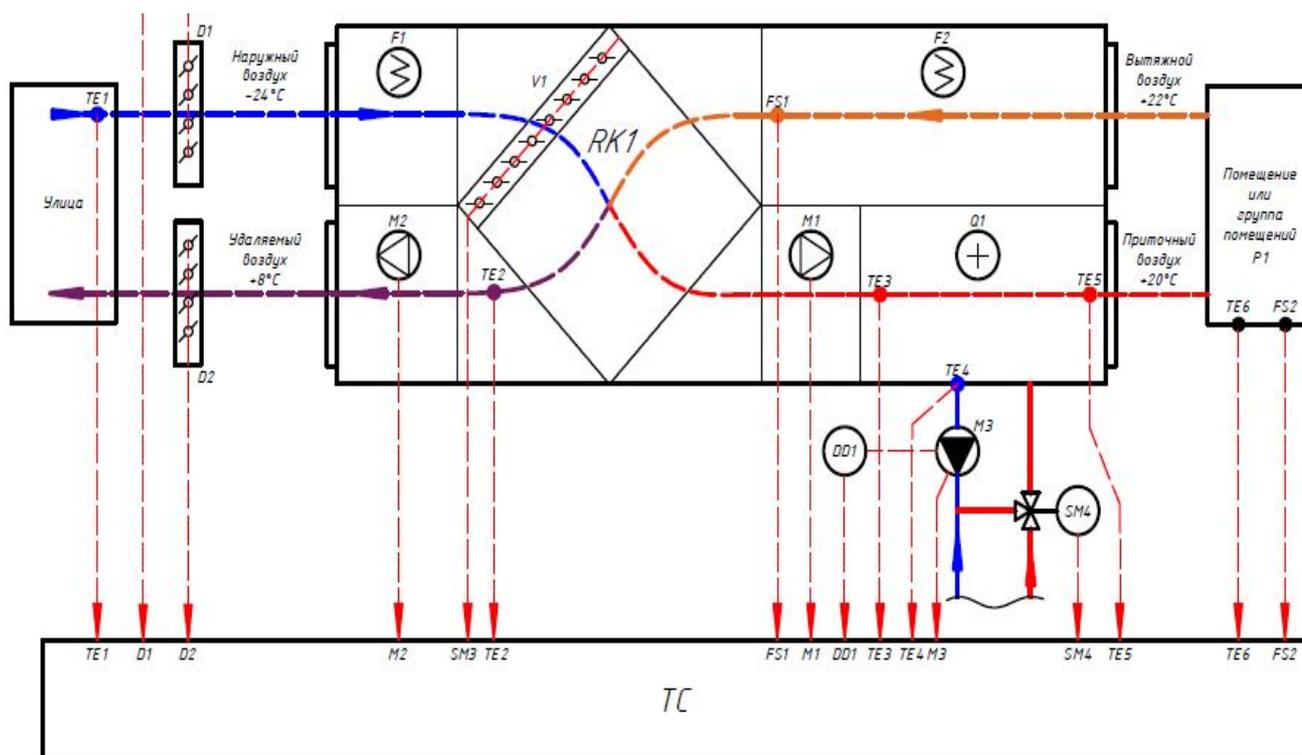
Принципиальная схема приточно-вытяжной механической вентиляционной системы с САУ приведена на рис. 1.

Исследуемая экспериментальная приточно-вытяжная с пластинчатым теплообменником-рекуператором система вентиляции, работающая в квазистационарном режиме теплопередачи, приведена на рис. 2.

В качестве нагревающей среды используется вытяжной воздух, удаляемый из помещения. При этом управление системой происходит при независимой схеме присоединения к системе теплоснабжения.

Нагреваемый в помещении воздух рассматривается как несжимаемый газ, теплообмен между нагревающим и нагреваемым теплоносителями является стационарным процессом, турбулентность нагревающего и нагреваемого потоков теплоносителей является изотропной.

Представим схему на рис.1 в упрощенном виде – рис. 2. с целью получения оптимального режима использования теплоты. В этом случае систему вентиляции помещения или групп помещений будем считать тепловой нагрузкой  $R$ , потребляющей тепло  $Q_1''$ .

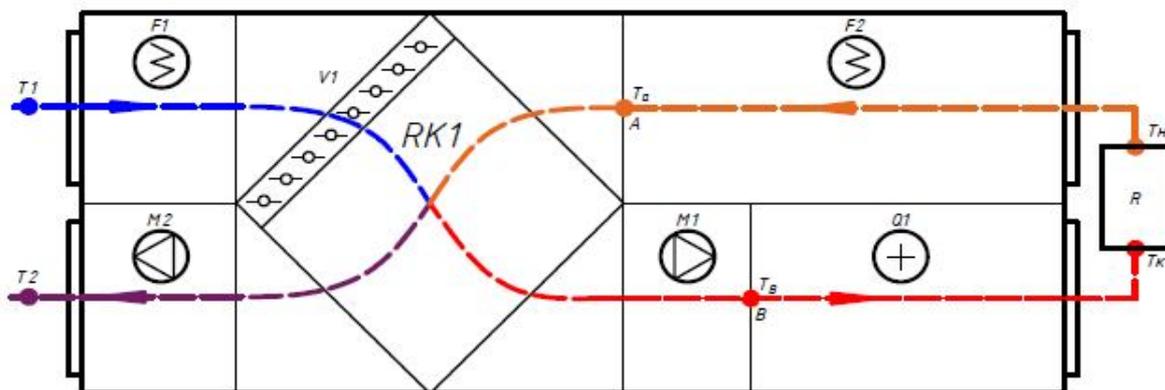


**Рис. 1.** Схема управления системой приточно-вытяжной вентиляции с рекуператором:

**TC** – контроллер; **D1** – заслонка приточного воздуха; **D2** – заслонка вытяжного воздуха; **F1** – фильтр приточный; **F2** – фильтр вытяжной; **M1** – приточный вентилятор; **M2** – вытяжной вентилятор; **P1** – панель управления; **V1** – регулирующая заслонка на входе в рекуператор; **Q1** – водяной калорифер; **FS1** – каналный датчик влажности; **FS2** – комнатный датчик влажности; **RK1** – пластинчатый рекуператор; **SM1, SM2** – электрический привод регулирующей заслонки; **SM3** – электрический привод байпаса; **SM4** – электрический привод 3-ходового клапана водяного нагревателя; **TE1** – датчик наружного воздуха; **TE2** – Датчик температуры воздуха после рекуператора; **TE3** – датчик температуры от обмерзания водяного нагревателя; **TE4** – датчик температуры обратного теплоносителя; **TE5** – каналный датчик температуры; **TE6** – комнатный датчик температуры; **DD1** – реле защиты от сухого хода; **M3** – циркуляционный насос водяного нагревателя

**Fig. 1.** Diagram of the control of the supply and exhaust ventilation system with a recuperator:

**TC** – controller; **D1** – supply air damper; **D2** – exhaust air damper; **F1** – supply air filter; **F2** – exhaust air filter; **M1** – forced draft fan; **M2** – induced fan; **P1** – control panel; **V1** – control valve at the recuperator inlet; **Q1** – hot water calorifier; **FS1** – duct humidity sensor; **FS2** – room humidity sensor; **RK1** – plate recuperator; **SM1, SM2** – adjustable damper electric drive; **SM3** – bypass electric drive; **SM4** – electric drive of water heater three way valve; **TE1** – outdoor air sensor; **TE2** – air temperature sensor upstream the recuperator; **TE3** – temperature sensor for anti-freezing of water heater; **TE4** – return heat carrier temperature sensor; **TE5** – duct temperature sensor; **TE6** – room temperature sensor; **DD1** – dry run protection relay; **M3** – water heater circulating pump



**Рис. 2.** Расчетная схема установки: **RK1** – рекуператор пластинчатый; **F1** – фильтр приточный; **F2** – фильтр вытяжной; **M1** – приточный вентилятор; **M2** – вытяжной вентилятор; **Q1** – водяной калорифер; **T1** и **T2** – температуры приточного и вытяжного воздуха. **T<sub>a</sub>** – температура воздуха в точке А на входе в пластинчатый теплообменник-рекуператор; **T<sub>b</sub>** – температура воздуха в точке В на выходе из пластинчатого теплообменника-рекуператора; **T<sub>к</sub>**, **T<sub>н</sub>** – соответственно температуры воздуха в обогреваемом помещении и на выходе из него; **V1** – регулирующая заслонка на входе в рекуператор; **R** – тепловая нагрузка на систему вентиляции для помещения или группы помещений

**Fig. 2.** Design diagram of the installation: **RK1** – plate recuperator; **F1** – supply filter; **F2** – exhaust filter; **M1** – forced draft fan; **M2** – induced fan; **Q1** – hot water calorifier; **T1** and **T2** – supply and exhaust air temperatures; **T<sub>a</sub>** – air temperature at point A at the inlet of the plate heat exchanger-recuperator; **T<sub>b</sub>** – air temperature at point B at the outlet of the plate heat exchanger-recuperator; **T<sub>к</sub>**, **T<sub>н</sub>** – air temperatures in the room heated and at the room exit correspondingly; **V1** – control valve at the recuperator inlet; **R** – thermal load on the ventilation system for a room or group of rooms

## Результаты и их обсуждение

Переданное количество теплоты (Вт) определяется по формуле

$$Q'' = \bar{\gamma} \cdot \bar{V}_{\text{кан}} \cdot (\bar{t}_{\text{ex}} - \bar{t}_{\text{вых}}) \cdot 10^3, \quad (1)$$

где  $\bar{\gamma}_e$  – объемная теплоемкость, кДж/(м<sup>3</sup> °С);  $G_{\text{кан}}$  – массовый расход в канале пластинчатого теплообменника-рекуператора, м<sup>3</sup>/ч;  $t_{\text{ex}}, t_{\text{вых}}$  – температуры горячего потока воздуха на входе и выходе из рекуператора, °С.

Это тепло можно использовать частично:  $Q_1''$  на подогрев наружного воздуха,  $Q_2''$  на получение термоЭДС:

$$Q'' = Q_1'' + Q_2''. \quad (2)$$

Слагаемые  $Q_1''$ ,  $Q_2''$  можно предста-

вить в виде:

$$Q_1'' = a_1 \cdot Q_1'' + a_2 \cdot Q_2'', \quad (3)$$

где  $a_1 = 0,85 \dots 0,88$ ;  $a_2 = 0,12 \dots 0,15$  соответственно доли компонентов  $Q_1''$ ,  $Q_2''$  в тепловом балансе (2).

Из уравнения (3) следует:

$$a_1 + a_2 = 1. \quad (4)$$

При наличии тепловой нагрузки  $R$  уравнение теплового баланса будет иметь вид:

$$Q_{\text{ex}} = Q_{\text{вых}}, \quad (5)$$

где  $Q_{\text{ex}}$ ,  $Q_{\text{вых}}$  – соответственно суммарные тепловые потоки на входе и выходе системы вентиляции.

При этом  $Q_{вых}$  в формуле (5) определяется как

$$Q_{вых} = Q_A + Q_M + Q_\phi + Q_V, \quad (6)$$

где  $Q_A, Q_M, Q_\phi, Q_V$  – тепловые потоки в вентилируемом помещении.

В выражении (6) справедливо соотношение:

$$Q_\phi = Q_V \approx 0. \quad (7)$$

При установке заслонки V1 и приточного вентилятора M1 (рис. 1-3) между приточным и вытяжным воздуховодами системы вентиляции в соответствии с требованиями следует учитывать расходы воздуха  $G_1, G_M$  и коэффициент смешения в точке А горячей и холодной и воздушных масс U:

$$U = \frac{T_1 - T_A}{T_A - T_2}. \quad (8)$$

Важно отметить, что расход воздуха в квазистационарном режиме имеет прямо пропорциональную зависимость от тепловых потоков:

$$Q_1 = G_1 \cdot c_1 \cdot (T_1 - T_2); \quad (9)$$

$$Q_M = G_M \cdot c_M \cdot (T_1 - T_2), \quad (10)$$

где температуры  $T_1$  и  $T_2$  приняты в интервале 15...65°C.

При этом можно считать, что удельные теплоемкости при постоянном давлении  $c_1$  и  $c_M$  – равны 1,005 кДж/кг·°С;  $G_1$  – расход воздуха в приточном воздуховоде, кг/с;  $G_M$  – расход воздуха через приточный вентилятор M1 и точке А.

Будем рассматривать согласованную работу заслонки V1 и приточного вентилятора M1 соответственно на их линейных участках MN, PL (рис. 3 и рис. 4).

Указанное согласование производится с учетом коэффициента смешения U:

$$Q_M = \mu \cdot U \cdot Q_1, \quad (11)$$

где  $\mu \geq 1, \mu = const$

Нагреваемый теплоноситель проходит через регулирующую заслонку V1 с долей открытия  $k_1$ , далее поток транспортируется вентилятором M1 с тепловой нагрузкой R, функционирующего с долей полной производительности приточного вентилятора M1,  $k_M$  – ( $0 \leq k_M \leq 1$ , при этом величины тепловых потоков  $Q_{1A}, Q_{MA}$  в точке А можно определить по формулам:

$$Q_{1A} = k_1 \cdot Q_1; \quad (12)$$

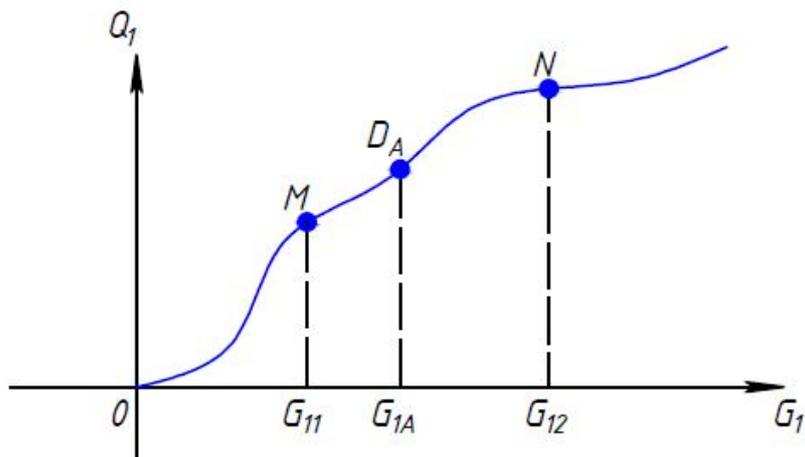
$$Q_{MA} = \mu \cdot U \cdot Q_1 \cdot k_1 \cdot k_M. \quad (13)$$

Тепловой поток вентилируемого помещения с теплотой R имеет температуру  $T_k = 293$  К ( $t_k = 20^\circ\text{C}$ ).

В квазистационарном режиме поток  $Q_k$  передается через стенку теплообменника-рекуператора, при этом уравнение будет иметь вид:

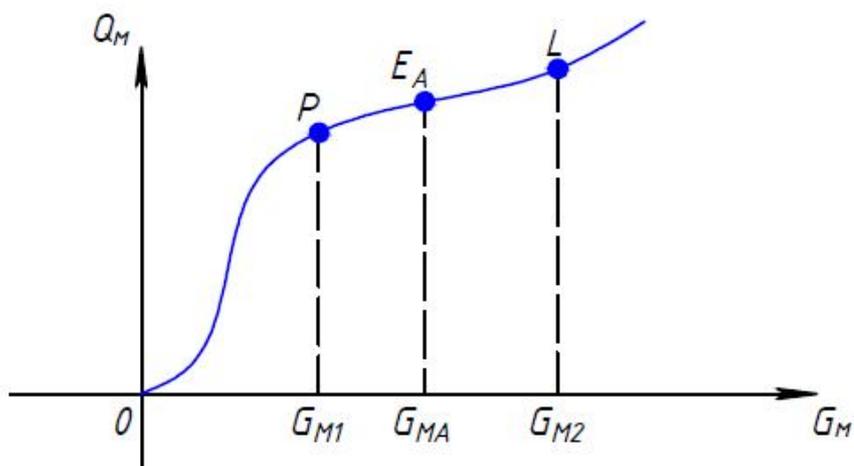
$$Q_k = k \cdot (T_k - T_n) \cdot F = k \cdot (t_k - t_n) \cdot F, \quad (14)$$

где  $T_n = t_n + 273$  – температура приточного воздуха в помещении;  $F$  – площадь внутренней поверхности рекуператора, м<sup>2</sup>,  $k$  – коэффициент теплопередачи рекуператора, Вт/м<sup>2</sup>·°С.



**Рис. 3.** Тепловая характеристика клапана V1

**Fig. 3.** Thermal characteristic of valve V1



**Рис. 4.** Тепловая характеристика смесительного насоса M1

**Fig. 4.** Thermal characteristics of the M1 mixing pump

Процесс вентиляции в номинальном режиме является стационарным – с течением времени значения основных параметров не меняются. На основании этих особенностей, в уравнении теплового баланса необходимо учесть  $T_k - T_n = t_k - t_n$ :

$$Q_{\text{вых}} = Q_k + Q_2; \quad (15)$$

$$Q_{\text{вых}} = k \cdot (t_k - t_n) \cdot F + Q_2, \quad (16)$$

где  $Q_2 = \text{const}$ .

В итоге получим баланс в точке А:

$$k_1 \cdot Q_1 = \mu \cdot Q_1 \cdot U \cdot k_M = k \cdot (t_k - t_n) \cdot F + Q_2. \quad (17)$$

$$k_1 \cdot Q_1 \cdot (1 + \mu \cdot U \cdot k_M) = k \cdot (t_k - t_n) \cdot F + Q_2. \quad (18)$$

Введем обозначение:

$$\frac{1}{Q_1} \cdot (k_1 \cdot (t_k - t_n) \cdot F + Q_2) = C = \text{const}. \quad (19)$$

Из (19) следует:

$$k_M = \frac{c}{\mu \cdot U \cdot K_1} - \frac{1}{\mu \cdot U}. \quad (20)$$

Обозначив:

$$a = \frac{c}{\mu \cdot U}; b = \frac{1}{\mu \cdot U}, \quad (21)$$

где  $a, b = const$ , получим

$$K_M = \frac{a}{k_1} - b, \quad (22)$$

где  $a > 0, b > 0$ , причем  $0 < K_1 \leq \frac{a}{b} \leq 1$ ,

т.к.  $0 < K_N \leq 1$ .

Графически зависимость (20) представлена на рис. 5 в виде семейства кривых I, II, III, причем  $t_{нI} < t_{нII} < t_{нIII}$ .

Коэффициенты  $k_M$  и  $k_1$  из выражения (22) связаны обратно пропорциональной зависимостью. С ростом температуры приточного воздуха  $t_n$  соответствующая кривая семейства приближается к оси абсцисс и пересекает

её в точке  $\frac{a}{b}$ . На рис. 6 кривым I, II, III

соответствуют температуры  $t_{нI} < t_{нII} < t_{нIII}$ .

Данные  $T_1, T_2, T_M, U, Q_1, Q_2, F$  в номинальном режиме хранятся в ПЗУ (постоянно запоминающем устройстве), встроенном в ТС.

Проанализируем работу схемы на рис. 2, основываясь на уравнении теплового баланса (18). Будем полагать, что нарушения температурного напора  $\Delta T_{кн} = T_k - T_n$  при условии отсутствия внутренних источников тепла (холода) в вентилируемом помещении с тепловой нагрузкой  $R$  происходит за счет изменения температуры наружного воздуха  $T_n$  на некоторую величину  $\Delta T_n$ . Такая динамика соответственно приводит к изменению температуры  $T_k$ .

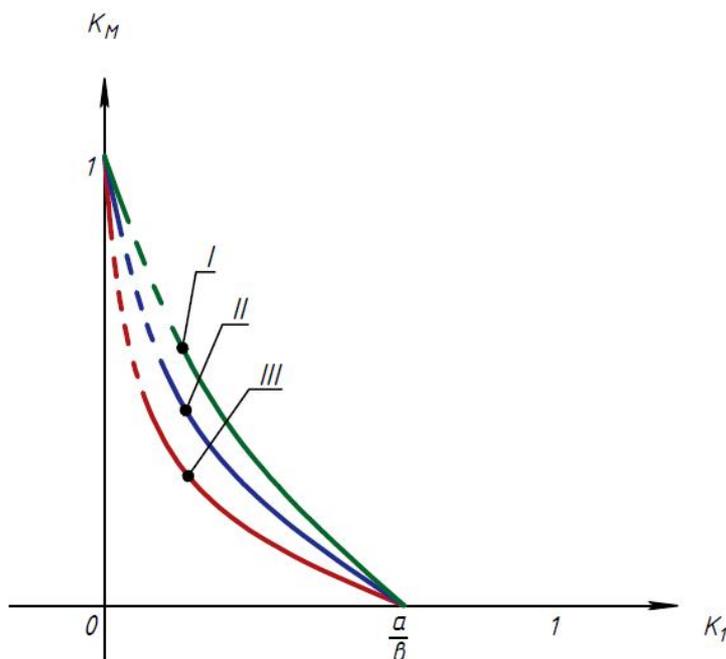


Рис. 5. Зависимость  $k_M$  от  $k_1$

Fig. 5.  $k_M$  Dependence on  $k_1$

Проведем исследование теплового баланса при изменении температурного режима в схеме на рис. 2. Допустим, что температура приточного воздуха  $T_n$  уменьшилась на величину  $\Delta T_n$  градусов, что при неизменных положениях  $k_l$  и  $k_M$  приведем к понижению температуры тепловой нагрузки R на величину  $\Delta T_k$  градусов. Для восстановления теплового баланса достаточно увеличить долю  $k_l$  полного открытия клапана V1 на величину  $\Delta k_l$  соответственно уменьшить долю  $k_M$  полной производительности смешительного насоса M1 на величину  $\Delta k_M$ :

$$Q_1 \cdot (k_1 - \Delta k_1) \cdot (1 + \mu \cdot U \cdot (k_M - \Delta k_M)) = k \cdot ((T_k - \Delta T_k) - (T_n - \Delta T_n)) \cdot F + Q_2. \quad (23)$$

В предельном случае при полной остановке работы насоса N1 ( $\Delta k_M=0$ ) имеем:

$$\Delta k_1 = \frac{k \cdot F \cdot (\Delta T_n - \Delta T_k)}{Q_1 \cdot (1 + \mu \cdot U \cdot k_1)}. \quad (24)$$

Если учесть, что  $\Delta k_l \geq 0$ , то очевидно должно выполняться условие:

$$\Delta T_n \geq \Delta T_k. \quad (25)$$

Допустим, что температура приточного воздуха  $T_n$  увеличилась на  $\Delta T_k$  градусов, что при неизменных положениях  $k_l$  и  $k_M$  приведет к повышению температуры в помещении R на величину  $\Delta T_k$  градусов. В этом случае для восстановления теплового баланса достаточно увеличить долю  $k_M$  полной производительности приточного вентилятора M1 на величину  $\Delta k_M$  и соответственно уменьшить долю  $k_l$  полной производительности клапана V1 на величину  $\Delta k_l$ :

$$Q_1 \cdot (k_1 - \Delta k_1) \cdot (1 + \mu \cdot U \cdot (k_M + \Delta k_M)) = k \cdot (T_k + \Delta T_k) - (T_n + \Delta T_n) \cdot F + Q_2. \quad (26)$$

В предельном случае при полном закрытии клапана V1 ( $\Delta k_l=0$ ) имеем:

$$\Delta k_M = \frac{\Delta T_k - \Delta T_n}{Q_1 \cdot k_1 \cdot \mu \cdot U}, \quad (27)$$

где из требования  $\Delta k_M=0$  следует выполнение условия:

$$\Delta T_k \geq \Delta T_n. \quad (28)$$

Объединив соотношения (20-25), получим объединенную формулу управления тепловыми потоками:

$$\Delta k_1 = \pm \left( \frac{k \cdot F \cdot ((T_k \mp \Delta T_k) - (T_n \mp \Delta T_n)) + Q_2}{Q_1 \cdot (1 + \mu \cdot U \cdot (k_N \mp \Delta k_N))} - k_1 \right), \quad (29)$$

где верхние знаки «+» или «-» соответствуют падению  $T_n$  на величину  $\Delta T_n$ , нижние знаки «-» росту  $T_n$  на величину  $\Delta T_n$ . В обоих случаях  $\Delta T_n \geq 0$ ,  $\Delta T_k \geq 0$ .

Система ТС позволяет реализовать зависимость (24) в режиме реального времени с учетом момента запаздывания  $\tau$  достижения номинальной температуры  $T_k$ .

Рассмотрим вариант вентиляции с минимальными затратами энергии при сохранении номинальной температуры  $T_k$ . Учитывая выражения и данный перепад температур  $\Delta T_k = T_k - T_n$ , исследуем на локальный экстремум функцию:

$$F(k_1, k_M) = F(k_1) = k_1 + k_M = k_1 + \frac{a}{k_1} - f \rightarrow \min. \quad (30)$$

Продифференцируем выражение:

$$\frac{dF(k_1)}{dk_1} = 1 - \frac{a}{k_1^2}. \quad (31)$$

Определяем критические точки первого рода:

$$\frac{dF(k_1)}{dk_1} = 1 - \frac{a}{k_1^2} = 0 \Rightarrow \tag{32}$$

$$\Rightarrow k_{11} = -\sqrt{a}, k_{12} = \sqrt{a}.$$

Если учесть, что  $k_1 > 0$ , то следует оставить  $k_{12} = \sqrt{a}$ .

Из рис. 6 следует, что точка  $k_{12} = \sqrt{a}$  является точкой локального минимума. Опираясь на иллюстрацию графика второй производной функции  $F(k_1)$  на рис. 7, можно сделать вывод об отсутствии точек перегиба.

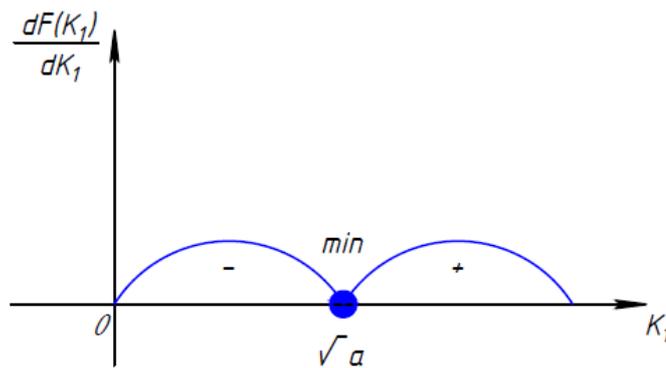


Рис. 6. Условие определения локального экстремума

Fig. 6. Condition for determining the local extremum

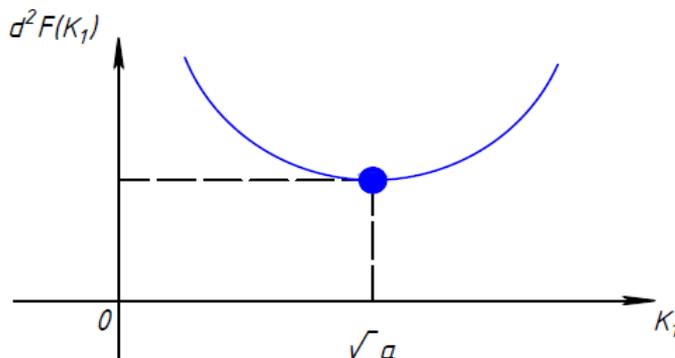


Рис. 7. Определение зависимости  $F''_{k_1, k_2}(k_1)$  на полуинтервале (0; 1]

Fig. 7. The definition of an addiction on the half-interval (0; 1].

Итак,  $F_{\min} = F(\sqrt{a}) = 2\sqrt{a} - b$ . С дру-

гой стороны:  $\frac{d^2F(k_1)}{dk_1^2} = F''_{k_1, k_2}(k_1) =$

$$= \left(1 - \frac{a}{k_1^2}\right)'_{k_1} = \frac{2a}{k_1^3} > 0, \text{ т.е. график функ-}$$

ции  $F(k_1)$  на интервале (0; 1].

**Выводы**

1. Предложена и исследована математическая модель управления тепловыми потоками в системе приточно-вытяжной вентиляции со встроенным комплексным теплообменником-рекуператором.

2. Получены оптимальные значения затрачиваемой тепловой энергии и параметров работы вентиляционной установки.

### Список литературы

1. Архипов Т. В. Автоматическое регулирование вентиляции и кондиционирования воздуха. М., 2012. 242 с.
2. Полевой А. А. Автоматизация холодильных установок и систем кондиционирования воздуха. М., 2011. 244 с.
3. Штокман Е. А., Скорик Т. А. Основы отопления и вентиляции. М.: Феникс, 2011. 352 с.
4. Гальперин Л.Г. Моделирование тепловых процессов. М., 2011. 112 с.
5. Федоров С.С., Тютюнов Д.Н., Ключева Н.В. К вопросу моделирования процесса управления системой теплоснабжения ресурсоэффективных зданий // Строительство и реконструкция. 2014. №1. С. 86-89.
6. Федоров С.С., Тютюнов Д.Н., Кобелев Н.С. Математическая модель системы автоматизированного регулирования параметров теплоносителя отапливаемых зданий, // Известия Курского государственного технического университета. 2010. №3(32). С. 40-44.
7. Федоров С.С., Тютюнов Д.Н., Кобелев Н.С. Алгоритм автоматического управления приводом системы отопления зданий и сооружений // Известия Юго-Западного государственного университета. 2011. №5, ч.2. С. 355-359.
8. Федоров С.С. Система управления процессом теплоснабжения при зависимом присоединении к тепловым сетям // Строительство и реконструкция. 2014. №5. С. 106-110.
9. Системы автоматизированного регулирования параметров теплоносителя отапливаемых зданий / С.С. Федоров, Н.С. Кобелев, В.А. Минко [и др.] // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2010. №4. С. 111-115.
10. Федоров С.С., Тютюнов Д.Н., Ключева Н.В. Управление системой отопления зданий с позиции ресурсосбережения // Строительство и реконструкция. 2013. №5. С. 36-39.
11. Бурцев А.П., Герасимов М.С. Разработка и применение схемы плавного пуска SOFT-START // Молодежь и наука: шаг к успеху: сборник научных статей 4-й Всероссийской научной конференции перспективных разработок молодых ученых. Курск, 2020. С.60-64.
12. Бурцев А.П., Кочергин О.Б. Модернизация DC-DC преобразователя на базе микросхемы МТ3608 // Перспективное развитие науки, техники и технологий: сборник научных статей 10-ой Международной научно-практической конференции. Курск, 2020. С. 27-31.
13. Бурцев А.П. Создание схемы регулирования сигнала ШИМ на основе логической микросхемы // Молодежь и наука: шаг к успеху: сборник научных статей 4-й Всероссийской научной конференции перспективных разработок молодых ученых. Курск, 2020. С. 257-260.

14. Исследование теплообмена в термоэлектрических преобразователях / В.С. Ежов, А.П. Бурцев., Н.С. Перепелица, А.П. Бурцев // Проектирование и строительство: сборник научных трудов 4-й Международной научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов, магистров и бакалавров. Курск, 2020. С. 117-121.

15. Разработка методики определения характеристик конструкции комплексного пластинчатого теплообменника при утилизации низкопотенциального тепла сбросных газов и вентиляционных выбросов / В.С. Ежов, Н.Е. Семичева, А.П. Бурцев, Н.С. Перепелица, М.Е. Попова // Проблемы и перспективы развития России: молодежный взгляд в будущее: сборник научных трудов 2-й Всероссийской научной конференции. Курск, 2019. С. 178-182.

16. Ежов В.С., Бурцев А.П., Перепелица Н.С. Разработка инновационной конструкции автономного термоэлектрического источника ЭДС для использования в системах теплоснабжения // Молодежь и XXI век - 2020: сборник научных трудов 10-й Международной научной конференции. Курск, 2020. С. 245-248.

17. Basic calculation based on the direct conversion of the heat into electricity for IHP / Ezhov V., Brezhnev A., Burtsev A., Bredikhina N., Burtsev A. // Conference proceedings 7th international conference contemporary achievements in civil engineering. 23-24. April 2019. Subotica, SERBIA, 2019.

18. Разработка экспериментальной конструкции комплексного воздухоподогревателя для утилизации низкопотенциального тепла сбросных вентиляционных выбросов / В.С. Ежов, Н.Е. Семичева, А.П. Бурцев, Н.С. Перепелица, Д.А. Ермаков, А.П. Бурцев // Современные проблемы в строительстве: постановка задач и пути их решения: сборник научных статей Международной научно-практической конференции. Курск, 2019. С. 225-233.

19. Исследование процесса генерации термоэлектричества при утилизации низкопотенциального тепла сбросных газов / В.С. Ежов, Н.Е. Семичева, А.П. Бурцев, В.И. Зенченко, Д.А. Ермаков // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019. №23(2). С. 74-84.

20. Ежов В.С., Семичева Н.Е., Бурцев А.П., Соколов С.М., Перепелица Н.С. Термоэлектрический источник электроснабжения для теплового пункта. Патент 2705348 РФ от 06.11.2019. 11 с.

## References

1. Arkhipov T. V. *Avtomaticheskoe regulirovanie ventilyatsii i konditsionirovaniya vozdukh* [Automatic regulation of ventilation and air conditioning]. Moscow, 2012. 242 p. (In Russ.).

2. Polevoy A. A. *Avtomatizatsiya kholodil'nykh ustanovok i sistem konditsionirovaniya vozdukh* [Automation of refrigeration units and air conditioning systems]. Moscow, 2011. 244 p. (In Russ.).

3. Shtokman E. A., Skorik T. A. *Osnovy otopleniya i ventilyatsii* [Fundamentals of heating and ventilation]. Moscow, 2011. 352 p. (In Russ.).

4. Galperin L. G. *Modelirovanie teplovykh protsessov* [Modeling of thermal processes]. Moscow, 2011. 112 p. (In Russ.).

5. Fedorov S. S., Tyutyunov D. N., Klyueva N. V. K voprosu modelirovaniya protsessa upravleniya sistemoi teplosnabzheniya resursoeffektivnykh zdanii [On the issue of modeling the process of controlling the heat supply system of resource-efficient buildings]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiy = Construction and Reconstruction*, 2014, no. 1, pp. 86-89 (In Russ.).

6. Fedorov S. S., Tyutyunov D. N., Kobelev N. S. Matematicheskaya model' sistemy avtomatizirovannogo regulirovaniya parametrov teplonositelya otaplivaemykh zdanii [Mathematical model of automated control of heat parameters of heated buildings]. *Izvestiya Kurskogo gosudarstvennogo technicheskogo universiteta = Proceedings of the Kursk State Technical University*, 2010, no.3(32), pp. 40-44 (In Russ.).

7. Fedorov S. S., Tyutyunov D. N., Kobelev N. S. Algoritm avtomaticheskogo upravleniya privodom sistemy otopleniya zdanii i sooruzhenii [An Algorithm for automatic drive control of the heating system of buildings and structures]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2011, no. 5, pt. 2, pp. 355-359 (In Russ.).

8. Fedorov S. S. Sistema upravleniya protsessom teplosnabzheniya pri zavisimom prisoedinenii k teplovyim setyam [Process control System of a heat supply at a dependent Association to calorific nets]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiy = Construction and Reconstruction*, 2014, no. 5, pp. 106-110 (In Russ.).

9. Fedorov S. S., Kobelev N. S., Minko V. A. et al. Sistemy avtomatizirovannogo regulirovaniya parametrov teplonositelya otaplivaemykh zdanii [Systems of automated regulation of parameters of the heat carrier of heated buildings]. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova = Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov*, 2010, no. 4, pp. 111-115 (In Russ.).

10. Fedorov S. S., Tyutyunov D. N., Klyueva N. V. Upravlenie sistemoi otopleniya zdanii s pozitsii resursosberezheniya [Management of the heating system of buildings from the position of resource saving]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiy = Construction and Reconstruction*, 2013, no. 5, pp. 36-39 (In Russ.).

11. Burtsev A. P., Gerasimov M. S. [Development and application of the SOFT-START soft-START scheme]. *Sbornik nauchnykh statei 4-i Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii perspektivnykh razrabotok molodykh uchenykh "Molodezh' i nauka: shag k uspekh"* [Collection of scientific articles of the 4th All-Russian scientific conference of promising developments of young scientists "Youth and science: a step to success"]. Kursk, 2020, pp. 60-64 (In Russ.).

12. Burtsev A. P., Kochergin O. B. [Modernization of DC-DC converter based on MT3608 microchip]. *Sbornik nauchnykh statei 10-oi Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Perspektivnoe razvitie nauki, tekhniki i tekhnologii"* [Collection

of scientific articles of the 10th International scientific and practical Conference "Perspective development of science, technology and technologies". Kursk, 2020, pp. 27-31 (In Russ.).

13. Burtsev A. P. [Creation of a PWM signal regulation scheme based on a logic chip]. *Sbornik nauchnykh statei 4-i Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii perspektivnykh razrabotok molodykh uchenykh "Molodezh' i nauka: shag k uspekhu"* [Collection of scientific articles of the 4th All-Russian scientific conference of promising developments of young scientists "Youth and science: a step to success"]. Kursk, 2020, pp. 257-260 (In Russ.).

14. Yezhov V. S., Burtsev A. P., Perepelitsa N. S., Burtsev A. P. [Research of heat transfer in thermoelectric converters]. *Sbornik nauchnykh trudov 4-i Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii molodykh uchenykh, aspirantov, magistrrov i bakalavrov "Proektirovanie i stroitel'stvo"* [Collection of scientific works of the 4th International scientific and practical conference of young scientists, postgraduates, masters and bachelors "Design and construction"]. Kursk, 2020, pp. 117-121 (In Russ.).

15. Ezhov V. S., Russia N. E. Burtsev A. P., Perepelitsa N. S., Popova M. E. [Development of methods for determining characteristics of the structure of an integrated plate exchanger in the utilization of low-grade heat waste gas and air emissions]. *Sbornik nauchnykh trudov 2-i Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii "Problemy i perspektivy razvitiya Rossii: molodezhnyi vzglyad v budushchee"* [Collection of scientific works of the 2nd Russian scientific conference "Problems and prospects of development of Russia: youth look to the future"]. Kursk, 2019, pp. 178-182 (In Russ.).

16. Ezhov V. S., Burtsev A. P., Perepelitsa N. S. [Development of an innovative design of an autonomous thermoelectric EMF source for use in heat supply systems]. *Sbornik nauchnykh trudov 10-i Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii "Molodezh' i XXI vek - 2020"*. [Collection of scientific works of the 10th International Scientific Conference "Youth and the XXI century-2020"]. Kursk, 2020, pp. 245-248 (In Russ.).

17. Ezhov V., Brezhnev A., Burtsev A., Bredikhina N., Burtsev A. Basic calculation based on the direct conversion of the heat into electricity for IHP [Basic calculation based on the direct conversion of the heat into electricity for IHP]. *Conference proceedings 7th international conference contemporary achievements in civil engineering*. Subotica, SERBIA, 2019.

18. Ezhov V. S., Semicheva N. E., Burtsev A. P., Perepelitsa N. S., Ermakov D. A., Burtsev A. P. [Development of an experimental design of a complex air heater for utilization of low-potential heat of waste ventilation emissions]. *Sbornik nauchnykh statei Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Sovremennye problemy v stroitel'stve: postanovka zadach i puti ikh resheniya»* [Collection of scientific articles of the International scientific and practical Conference "Modern problems in construction: statement of tasks and ways of their solution"]. Kursk, 2019, pp. 225-233 (In Russ.).

19. Ezhov V. S., Semicheva N. E., Burtsev A. P., Zenchenkov V. I., Ermakov D. A. Issledovanie protsessa generatsii termoelektrichestva pri utilizatsii nizkopotentsial'nogo tepla cbrosnykh gazov [Investigation of the process of generating thermoelectricity in the utilization of

low-potential heat of waste gases]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2019, no.23(2), pp. 74-84 (In Russ.).

20. Ezhov V. S., Semicheva N. E., Burtsev A. P., Sokolov S. M., Perepelitsa N. S. *Termoelektricheskii istochnik elektrosnabzheniya dlya teplovogo punkta* [Thermoelectric power supply source for a thermal point]. Patent RF, no. 2705348, 2019. (In Russ.).

---

### Информация об авторах / Information about the Authors

**Ежов Владимир Сергеевич**, доктор технических наук, профессор кафедры теплогазоводоснабжения, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, email: vl-ezhov@yandex.ru

**Семичева Наталья Евгеньевна**, кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоводоснабжения, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: nsemicheva@yandex.ru

**Тютюнов Дмитрий Николаевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры высшей математики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kaf.vm@mail.ru

**Бурцев Алексей Петрович**, аспирант кафедры теплогазоводоснабжения, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: ap\_burtsev@mail.ru

**Перепелица Никита Сергеевич**, магистрант кафедры теплогазоводоснабжения, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: nikperepelicza@mail.ru

**Бурцев Александр Петрович**, студент кафедры механики, мехатроники и робототехники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: burtsev-999@mail.ru

**Vladimir S. Yezhov**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: vl-ezhov@yandex.ru

**Natalya E. Semicheva**, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: nsemicheva@yandex.ru

**Dmitrij N. Tyutyunov**, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of Higher Mathematics Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kaf.vm@mail.ru

**Alexey P. Burtsev**, Post-Graduate Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: ap\_burtsev@mail.ru

**Nikita S. Perepelitsa**, Undergraduate, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: nikperepelicza@mail.ru

**Alexander P. Burtsev**, Student, Department of Mechanics, Mechatronics and Robotics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: burtsev-999@mail.ru