

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 629.733.5-62:621.365.4

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-5-82-89>



Исследование процесса электронагрева газа в рабочем объеме дирижабля сельскохозяйственного назначения

М.И. Белов¹, Д.В. Белов², С.А. Андреев³✉, Н.Е. Кабдин⁴, Д.М. Селезнева⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва; Россия

¹ belov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9907-8825>

² dmitri.belov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0009-0005-8015-2067>

³ energo-andreev@rgau-msha.ru✉; <https://orcid.org/0000-0001-8608-9904>

⁴ energo-nek@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4104-4187>

⁵ energo-dms@rgau-msha.ru

Аннотация. Мониторинг местности, наблюдение за сельскохозяйственными животными, ретрансляцию радиосигналов с наземных датчиков можно осуществлять с помощью дистанционно управляемого дирижабля. Регулировать высоту полета дирижабля сельскохозяйственного назначения целесообразно изменением температуры газа в рабочем объеме. Быстрый и равномерный электронагрев газа можно осуществлять за счет энергии бортовой сети. Предложено выполнить электронагреватель в виде параллелепипеда, расположенного внутри рабочего объема дирижабля. При этом ребра параллелепипеда – это токопроводящие элементы, обладающие большим удельным сопротивлением. Снижение массы конструкции обеспечивается сокращением проводов с большим сечением. Подвод электрической энергии от бортового аккумулятора к электронагревателю предложено провести к двум наиболее удаленным точкам. Критерием подбора сопротивлений ребер параллелепипеда является одинаковая скорость выделения тепловой энергии при протекании электрического тока через единицу длины токопроводящих элементов электронагревателя. С целью определения параметров электронагревателя из токопроводящих элементов представлен алгоритм вычислительных операций. На основании законов Кирхгофа установлена связь между сопротивлениями нагревательных элементов, напряжения источника питания и током в каждом нагревательном элементе. Для вычисления сопротивлений нагревательных элементов определены дополнительные условия и составлены 3 системы из 25 алгебраических уравнений, связывающих электротехнические параметры процесса. Установлено, что сопротивления токопроводящих элементов нагревателя, обеспечивающие одинаковое тепловыделение во всех элементах на единицу длины, однозначно связаны с отношением максимальной и минимальной длин элементов, напряжением источника тока и его мощностью. Определены условия изменения мощности и выделяемой теплоты изменением сопротивлений электронагревателя. Представлен алгоритм расчета параметров электронагревателя. Алгоритм позволит оперативно вычислять величины сопротивлений токопроводящих элементов, обеспечивающих одинаковое выделение тепловой энергии во всех участках разветвленной электрической цепи.

Ключевые слова: дирижабль сельскохозяйственного назначения; подъемная сила; нагрев; электронагрев газа; электронагреватель; токопроводящие элементы; параллелепипед; сопротивление; ток; мощность; алгоритм расчета параметров электронагревателя

Для цитирования: Белов М.И., Белов Д.В., Андреев С.А., Кабдин Н.Е., Селезнева Д.М. Исследование процесса электронагрева газа в рабочем объеме дирижабля сельскохозяйственного назначения // Агроинженерия. 2025. Т. 27, № 5. С. 82-89. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-5-82-89>

ORIGINAL ARTICLE

Electrical heating of gas in the working volume of agricultural airships

M.I. Belov¹, D.V. Belov², S.A. Andreev³, N.E. Kabdin⁴, D.M. Selezneva⁵

^{1,2,3,4,5} Russian Timiryazev State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow; Russia

¹ belov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9907-8825>

² dmitri.belov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0009-0005-8015-2067>

³ energo-andreev@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8608-9904>

⁴ energo-nek@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4104-4187>

⁵ energo-dms@rgau-msha.ru

Abstract. Remotely controlled airships offer promising solutions for terrain monitoring, livestock observation, and relaying signals from ground-based sensors in agricultural settings. Controlling an airship's altitude by adjusting the gas temperature within its working volume presents an efficient approach. This can be achieved through rapid and uniform electrical heating of the gas using onboard power. This article proposes a parallelepiped-shaped electric heater, positioned inside the airship's working volume, where the edges of the parallelepiped act as high-resistivity, current-conducting elements. To minimize weight, the design reduces the number of thick wires by supplying electrical energy from the onboard battery to two of the most distant points on the heater. The key design criterion is achieving a uniform heat release rate per unit length across all current-conducting elements. To determine the necessary parameters, the authors developed an algorithm to calculate the required resistances. Based on Kirchhoff's laws, they established the relationship between element resistances, power source voltage, and current distribution. The algorithm incorporates additional conditions to solve three systems of 25 algebraic equations, linking the electrical parameters. The results demonstrate that the ratio of maximum to minimum element lengths, the source voltage, and the desired power uniquely determine the resistances ensuring uniform heat release per unit length across all elements. Furthermore, the algorithm identifies conditions for adjusting power and heat release by modifying the electric heater's resistances. The presented algorithm enables rapid calculation of resistance values for the current-conducting elements, guaranteeing consistent heat generation throughout the branched electrical circuit.

Keywords: agricultural airship; lift; heating; electrical heating of gas; electric heater; current-conducting elements; parallelepiped; resistance; current; power; algorithm for calculating the parameters of an electric heater

For citation: Belov M.I., Belov D.V., Andreev S.A., Kabdin N.E., Selezneva D.M. Electrical heating of gas in the working volume of agricultural airships. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(5):82-89 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-5-82-89>

Введение

Бурное развитие электроники и техники связи существенно изменило техническое оснащение сельскохозяйственной авиации. На смену пилотируемым легким самолетам пришли беспилотные летательные аппараты, среди которых особое место могут занять дистанционно управляемые дирижабли [1, 2]. Основным преимуществом беспилотных дирижаблей сельскохозяйственного назначения является их способность длительного пребывания в условиях полета при минимальных затратах энергии. При отсутствии горизонтального перемещения дирижаблей затраты энергии могут обратиться в нуль. Большие габариты, тихоходность и высокая парусность дирижаблей не препятствуют их эффективному применению для мониторинга местности, наблюдения за сельскохозяйственными

животными, ретрансляции радиосигналов с наземных датчиков и в других технологических процессах АПК.

Одной из актуальных задач современного дирижаблестроения является поиск технических решений, обеспечивающих безопасное и энергосберегающее увеличение подъемной силы. Подъемная сила однозначно влияет на грузоподъемность дирижаблей и обеспечивает их подъем на значительную высоту, что позволяет расширить круг выполняемых производственных задач. Увеличение подъемной силы может быть достигнуто использованием газа с минимальной плотностью или увеличением рабочего объема летательного аппарата¹.

¹Щербаков Ю.В. Теория полета дирижаблей. М.: Издательство ЛКИ, 2019. 89 с.

Последний прием не всегда оправдан, поскольку влечет за собой резкий рост стоимости конструкции и создает дополнительные сложности при управлении полетом.

Поскольку плотность газов или их смесей существенно зависит от температуры^{2,3}, управление подъемной силой несложно реализовать нагревом или охлаждением рабочего объема [3]. При этом принудительный нагрев осуществляется за счет бортового источника энергии, а охлаждение – естественным образом, за счет рассеяния тепла в окружающую среду. Для обеспечения постоянства высоты полета дирижабля применяют подачу тепловой энергии с некоторым смещением, благодаря которому нулевой вес конструкции достигается при небольшом нагреве газа относительно окружающей среды. В качестве бортовых источников энергии обычно используются теплогенераторы на жидком или газообразном топливе, однако с появлением высокоэффективных химических аккумуляторов и легких фотоэлектрических элементов становятся перспективными электрические нагреватели. При проектировании таких нагревателей одним из простых технических решений является размещение в рабочем объеме дирижабля объемной токопроводящей решетки из проволоки с большим удельным сопротивлением [4]. Это позволяет достичь равномерного и достаточно быстрого нагрева газа, не применяя устройства для его перемешивания [5].

В связи с наличием ограничений массы конструкции дирижабля подвод электрической энергии от бортового аккумулятора к электронагревателю производится только к двум точкам. Это позволяет сократить применение проводов большого сечения в питающих цепях, однако значительно усложняет расчет электронагревателя. Компьютерное моделирование электрической цепи открывает возможность определения соотношения сопротивлений проводников в различных участках электронагревателя в соответствии с требуемым количеством выделяющейся теплоты [6].

Цель исследований: составить алгоритм расчета параметров электронагревателя в виде параллелепипеда, образуемого токопроводящими элементами и располагаемого внутри рабочего объема дирижабля.

²Термодинамические свойства гелия / В.В. Сычев, А.А. Вассерман, А.Д. Козлов и др. М.: Изд-во стандартов, 1984. 320 с.

³Справочник по физике / Х. Кухлинг; Пер. с нем. М.: Мир, 1985. 520 с.

Материалы и методы

В процессе исследования электронагрева газа в рабочем объеме дирижабля использованы законы электротехники, сведения из теории электрических цепей, методы математического анализа и программирования в среде Lazarus.

Результаты и их обсуждение

Наиболее распространенная форма современных дирижаблей соответствует эллипсоиду вращения, длинная ось которого располагается параллельно поверхности Земли. С целью максимального заполнения внутреннего пространства дирижабля объемной электронагревательной решеткой примем ее конфигурацию в виде параллелепипеда. Параллелепипед вписан во внутренний объем эллипсоида без контакта с его поверхностью, а источник энергии подключен к наиболее удаленным точкам электронагревателя. Объем газа и параметры дирижабля выбираются таким образом, чтобы при незначительном нагреве газа подъемная сила и сила тяжести находились в равновесии [7, 8].

Введем обозначения: $Oxyz$ – прямоугольная декартова система координат с горизонтальной осью Ox и вертикальной осью Oz ; U – номинальное напряжение источника тока, В; e – емкость источника тока, А·ч; t – максимальное время работы источника тока, ч; W – мощность источника тока, Вт; i, j – номера вершин (узлов) нагревателя в виде прямоугольного параллелепипеда ($1 \leq i < j; j = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8$); R_{ij} – сопротивление ребра (токопроводящего элемента) нагревателя между вершинами с номерами i, j соответственно, Ом; I_{ij} – ток на участке между узлами с номерами i, j соответственно, А; a – длина нагревательного элемента, представляющего малое ребро параллелепипеда вдоль осей Oy и Oz , м; b – длина нагревательного элемента, представляющего большое ребро параллелепипеда вдоль оси Ox , м; Q – среднее количество теплоты, выделяемое нагревательным элементом под действием тока в единицу времени на единицу длины нагревательного элемента, Вт/м.

Электрическая схема нагревателя с токопроводящими элементами в виде ребер прямоугольного параллелепипеда и источником постоянного тока, создающего разность потенциалов между вершинами параллелепипеда, показана на рисунке 1.

Сопротивления ребер параллелепипеда при заданных размерах требуется подобрать таким образом, чтобы скорость выделения теплоты от тока в токопроводящих элементах нагревателя на единицу

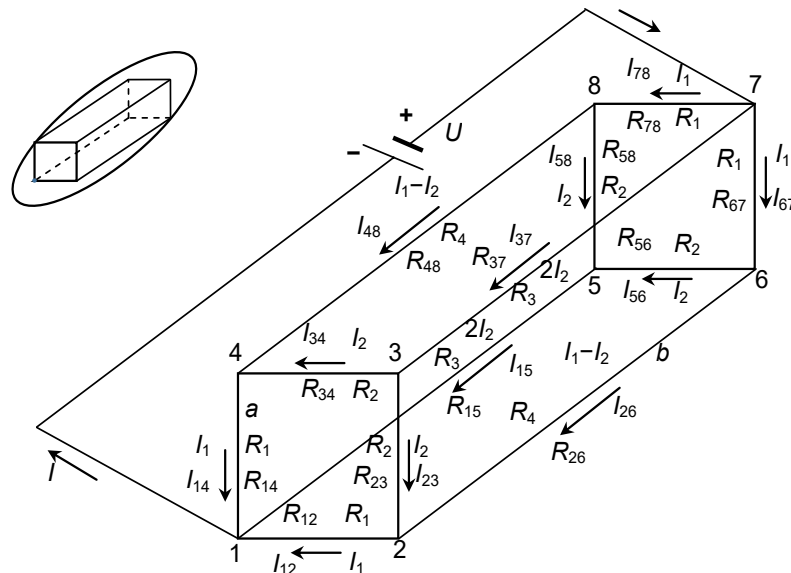


Рис. 1. Электрический нагреватель с источником тока:

1-2, 2-3, 3-4, 1-4, 5-6, 6-7, 7-8, 5-8, 1-5, 2-6, 3-7, 4-8 – нагревательные элементы (проводники) между узлами соответственно 1 и 2, 2 и 3, 3 и 4, 1 и 4, 5 и 6, 6 и 7, 7 и 8, 1 и 5, 2 и 6, 3 и 7, 4 и 8

Fig. 1. Electric heater with a current source:

1-2, 2-3, 3-4, 1-4, 5-6, 6-7, 7-8, 5-8, 1-5, 2-6, 3-7, 4-8 – heating elements (conductors) between nodes 1 and 2, 2 and 3, 3 and 4, 1 and 4, 5 and 6, 6 and 7, 7 and 8, 1 and 5, 2 and 6, 3 and 7, 4 and 8, respectively

длины провода оставалась постоянной. Уравнения Кирхгофа позволяют установить связь между сопротивлениями нагревательных элементов, напряжением источника питания и током в каждом нагревательном элементе [9]. Запишем их в следующем виде⁴:

$$\begin{cases}
 I_{12} + I_{14} + I_{15} - I = 0, \text{ узел 1} \\
 I_{23} + I_{26} - I_{12} = 0, \text{ узел 2} \\
 I_{37} - I_{23} - I_{34} = 0, \text{ узел 3} \\
 I_{34} + I_{48} - I_{14} = 0, \text{ узел 4} \\
 I_{56} + I_{58} - I_{15} = 0, \text{ узел 5} \\
 I_{67} - I_{26} - I_{56} = 0, \text{ узел 6} \\
 I - I_{37} - I_{67} - I_{78} = 0, \text{ узел 7}
 \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases}
 R_{12}I_{12} - R_{14}I_{14} + R_{23}I_{23} - R_{34}I_{34} = 0, \text{ контур 1, 2, 3, 4, 1} \\
 R_{56}I_{56} - R_{58}I_{58} + R_{67}I_{67} - R_{78}I_{78} = 0, \text{ контур 5, 6, 7, 8, 5} \\
 R_{12}I_{12} - R_{56}I_{56} + R_{26}I_{26} - R_{15}I_{15} = 0, \text{ контур 1, 2, 6, 5, 1} \\
 R_{67}I_{67} - R_{23}I_{23} + R_{26}I_{26} - R_{37}I_{37} = 0, \text{ контур 2, 6, 7, 3, 2} \\
 R_{34}I_{34} - R_{78}I_{78} + R_{37}I_{37} - R_{48}I_{48} = 0, \text{ контур 3, 7, 8, 4, 3} \\
 R_{15}I_{15} - R_{48}I_{48} + R_{58}I_{58} - R_{14}I_{14} = 0, \text{ контур 1, 5, 8, 4, 1} \\
 R_{14}I_{14} + R_{48}I_{48} + R_{78}I_{78} - U = 0, \text{ контур 1, 4, 8, 7, 1.}
 \end{cases} \quad (2)$$

В качестве неизвестных переменных выступают величины тока I_{ij} между узлами с номерами i, j и ток I в цепи источника напряжения U между

узлами 1, 7. При заданных сопротивлениях проводников и номинальном напряжении источника тока 7 уравнений (1) и 6 из 7 уравнений (2) позволяют определить 13 неизвестных токов в проводниках между узлами. Чтобы найти сопротивления нагревательных элементов, необходимо определить дополнительные условия и составить соответствующие дополнительные уравнения. Таким условием служит одинаковое для всех нагревательных элементов выделение тепла с единицы их длины [10]. Данные условия на основании закона Джоуля-Ленца для проводников длиной a и b запишем следующим образом⁵:

$$\begin{cases}
 R_{ij}I_{ij}^2 = Qa, 1 \leq i \leq 7; i < j \leq 8 \text{ контуры 1, 2, 3, 4; 5, 6, 7, 8} \\
 R_{ij}I_{ij}^2 = Qb, 1 \leq i \leq 7; i < j \leq 8 \text{ боковые четыре контура,}
 \end{cases} \quad (3)$$

где

$$Q = W / (8a + 4b). \quad (4)$$

Система нелинейных алгебраических уравнений (1), (2), (3) содержит 25 уравнений для определения 13 неизвестных токов и 12 неизвестных сопротивлений. Решение этой системы можно произвести на компьютере при использовании стандартных пакетов программ⁶.

⁵ Калашиников С.Г. Электричество. М.: Физматлит, 2003. 624.

⁶ Полянин А.Д., Зайцев В.Ф. Справочник по нелинейным уравнениям математической физики: точные решения. М.: Физматлит, 2002. 432 с.

⁴ Алешкевич В.А. Электромагнетизм. М.: Физматлит, 2014. 404 с.

Другой доступный путь заключается в том, чтобы упростить эту систему, воспользовавшись геометрической и электрической симметрией нагревательных элементов относительно центра параллелепипеда. Для этого примем равенство сопротивлений симметричных нагревательных элементов (рис. 1):

$$\begin{cases} R_1 = R_{12} = R_{14} = R_{67} = R_{78} \\ R_2 = R_{23} = R_{34} = R_{56} = R_{58} \\ R_3 = R_{15} = R_{37} \\ R_4 = R_{26} = R_{48} \end{cases} \quad (5)$$

Ввиду симметрии токи $I_{12}, I_{14}, I_{67}, I_{78}$ равны между собой. Введя переменную I_1 , запишем данные равенства:

$$I_{12} = I_{14} = I_{67} = I_{78} = I_1. \quad (6)$$

Аналогично токи $I_{23}, I_{34}, I_{56}, I_{58}$ равны между собой и равны I_2 :

$$I_{23} = I_{34} = I_{56} = I_{58} = I_2. \quad (7)$$

Уравнения (1) для узлов 3, 5 с учетом равенств (7) позволяют найти переменные I_{15}, I_{37} , обозначенные как I_3 , в виде:

$$I_3 = I_{15} = I_{37} = 2I_2. \quad (8)$$

Подставляя выражения (8) для I_{15}, I_{37} в уравнения (1) для узлов 1, 7 и учитывая равенства (6), выразим I через переменные I_1, I_2 :

$$I = 2I_1 + 2I_2. \quad (9)$$

Из уравнений (1) для узлов 2, 4, 6 с учетом равенств (5), (6) выразим оставшиеся токи I_{26}, I_{48} , обозначенные как I_4 , через переменные I_1, I_2 :

$$I_4 = I_{26} = I_{48} = I_1 - I_2. \quad (10)$$

Таким образом, с помощью уравнений (6)-(10) 13 неизвестных по токам выражаются через две неизвестные: I_1 и I_2 . В то же время и 12 неизвестных сопротивлений выражаются через 4 неизвестных значения R_1, R_2, R_3, R_4 . Для определения 6 неизвестных достаточно 6 уравнений. Можно убедиться, что уравнения Кирхгофа по току и первые два уравнения Кирхгофа по напряжению выполняются автоматически. Следующие четыре уравнения Кирхгофа по напряжению сводятся с учетом равенств (5)-(10) к одному уравнению, которое вместе с последним уравнением Кирхгофа запишется следующим образом:

$$\begin{cases} R_1 I_1 + R_4 (I_1 - I_2) - R_2 I_2 - R_3 2I_2 = 0 * \\ R_1 I_1 + R_2 I_2 + R_3 2I_2 = U ** \end{cases} \quad (11)$$

* – контуры 1, 2, 6, 5; 2, 6, 7, 3; 3, 7, 8, 4; 1, 5, 8, 4;

** – контуры между узлами 1, 7 с источником тока.

Оставшиеся 12 уравнений (3) с учетом равенств (5)...(10) приводятся к следующим независимым 4 уравнениям:

$$\begin{cases} R_1 I_1^2 = Qa, \text{ ребра } 1, 2; 1, 4; 6, 7; 7, 8 \\ R_2 I_2^2 = Qa, \text{ ребра } 2, 3; 3, 4; 5, 6; 5, 8 \\ R_3 4I_2^2 = Qb, \text{ ребра } 1, 5; 3, 7 \\ R_4 (I_1 - I_2)^2 = Qb, \text{ ребра } 1, 5; 3, 7. \end{cases} \quad (12)$$

Итак, исходная система уравнений (1), (2) и (3) с 25 неизвестными свелась к системе уравнений (11), (12) с шестью неизвестными. Уравнения (11) после подстановки в них выражений сопротивлений, найденных из уравнений (12), приводятся к виду:

$$\begin{cases} a / I_1 + b / (I_1 - I_2) - a / I_2 - b / (2I_2) = 0 \\ a / I_1 + a / I_2 + b / (2I_2) = U / Q. \end{cases}$$

Первое уравнение последней системы после умножения обеих частей на I_1 представляет собой квадратичное уравнение относительно неизвестной (I_1 / I_2) и при условии $I_1 > I_2$ имеет единственный корень. Неизвестные I_1, I_2 после этого однозначно определяются из второго уравнения этой системы как

$$I_1 = (a + ac + bc / 2) Q / U;$$

$$I_2 = (a / c + a + b / 2) Q / U$$

или с учетом (4):

$$I_1 = i_1 W / U; I_2 = i_2 W / U, \quad (13)$$

где

$$c = \left(4 + \frac{3b}{a} + \sqrt{\left(4 + \frac{3b}{a} \right)^2 - 8 \left(2 + \frac{b}{a} \right)} \right) / (4 + 2b / a);$$

$$i_1 = [1 + c + (b / a) c / 2] / (8 + 4b / a);$$

$$i_2 = [1 / c + 1 + (b / a) / 2] / (8 + 4b / a).$$

После нахождения токов найдем сопротивления из уравнений (12), заменив переменные Q и I_1, I_2 их выражениями в равенствах (4), (13). Запишем формулы для сопротивлений в следующем виде:

$$\begin{cases} R_1 = (U^2 / W) / \{ [8 + 4(b / a)] i_1^2 \} \\ R_2 = (U^2 / W) / \{ [8 + 4(b / a)] i_2^2 \} \\ R_3 = (U^2 / W) / \{ [8 / (b / a) + 4] 4i_2^2 \} \\ R_4 = (U^2 / W) / \{ [8 / (b / a) + 4] (i_1 - i_2)^2 \}. \end{cases} \quad (14)$$

При неизменном напряжении источника тока мощность тока и сопротивления нагревательных элементов связаны обратно пропорциональной

зависимостью. При неизменной емкости источника тока связь между максимальной продолжительностью работы нагревателя и мощностью тока также обратно пропорциональна и записывается так:

$$t = eU / W.$$

Таким образом, чем меньше сопротивления элементов нагревателя, тем больше мощность нагревателя и меньше продолжительность нагрева при неизменной емкости.

В результате анализа формул (13) и (14) становится очевидным, что при рассмотрении куба вместо параллелепипеда (при $b = a$) $R_1 = R_3$; $R_2 = R_4$; $I_1 = 2 I_2$. Алгоритм расчета тока и сопротивлений нагревательных элементов представим в такой последовательности:

- 1) задание исходных данных: b/a , U , W ;
- 2) расчет безразмерных токов i_1 , i_2 и токов I_1 , I_2 по формулам (13);
- 3) расчет токов в нагревательных элементах I_{12} , I_{14} , I_{67} , I_{78} по формулам (6), I_{23} , I_{34} , I_{56} , I_{58} по формулам (7), I_{15} , I_{37} по формулам (8), I_{26} , I_{48} по формуле (10);
- 4) расчет тока I в цепи источника по формуле (9);
- 5) расчет сопротивлений R_1 , R_2 , R_3 , R_4 по формулам (14);
- 6) расчет сопротивлений нагревательных элементов R_{12} , R_{14} , R_{67} , R_{78} , R_{23} , R_{34} , R_{56} , R_{58} , R_{15} , R_{37} , R_{26} , R_{48} по формулам (5).

Анализ уравнений (14) показывает, что сопротивления элементов нагревателя, обеспечивающие одинаковое тепловыделение во всех элементах на единицу длины, связаны только с тремя независимыми параметрами: отношением длин ребер параллелепипеда, напряжением источника тока и мощностью источника тока. Отношение длин ребер и напряжение источника тока являются неизменяемыми параметрами. Поскольку связь между сопротивлениями и мощностью является обратно пропорциональной, мощность источника тока можно увеличивать или уменьшать во время работы объемной решетки за счет изменения сопротивлений. При этом уменьшение или увеличение всех четырех сопротивлений должны производиться таким образом, чтобы эти изменения оказались пропорциональными относительно исходных значений с одинаковыми для всех коэффициентом пропорциональности. Исходные значения сопротивлений перед их изменением следует определять по формулам (12) при заданном значении мощности (рис. 1).

На рисунке 2 в качестве примера представлены зависимости сопротивлений электронагревателя (a) и токов (b) от отношения (b/a) при напряжении и мощности источника тока 12 В и 600 Вт⁷ соответственно.

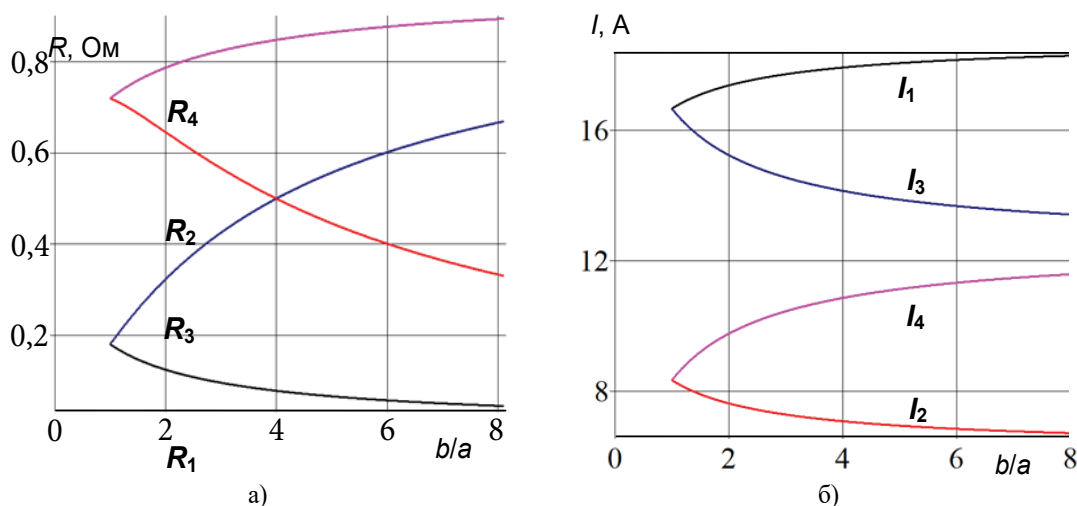


Рис. 2. Зависимости сопротивлений элементов нагревателя (a) и токов (b) от соотношения сторон параллелепипеда, образуемого токопроводящими элементами электронагревателя
Fig. 2. Dependencies of the resistance values of the heating elements (a) and currents (b) on the aspect ratio of the parallelepiped formed by the current-conducting elements of the electric heater

⁷Кирилин А.Н. Дирижабли. М.: МАИ-Принт, 2013. 415 с

Выводы

1. На основе разработанной модели системы электрического нагрева газа в дирижабле установлена зависимость сопротивления токопроводящих элементов нагревателя, обеспечивающих одинаковое тепловыделение во всех ребрах параллелепипеда на единицу длины, от отношения максимальной и минимальной длин этих ребер.

Список источников

1. Редькин А.В., Ялоза Ю.А., Ковалев И.Е. Оценка надежности конвертируемого летательного аппарата с гибридной силовой установкой и многвинтовой несущей системой // Научный Вестник МГТУ ГА. 2020. Т. 23, № 5. С. 76-96. <https://doi.org/10.26467/2079-0619-2020-23-5-76-96>
2. Редькин А.В., Ковалев И.Е., Костюченков А.Н. Рациональный облик высотного дирижабля и его энергоустановки для длительного барражирования в северных и арктических районах нашей страны // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. 2021. № 10. С. 28-37. EDN: NFFUTO
3. Дирижабль: Патент RU2751924 C1, МКП B64B1/06 (2006.01), МКП B64B1/62 (2006.01), МКП H01135/40 (2006.01) / Д.В. Белов, С.А. Андреев; заявка № 2020136535 от 11.01.2021, опублик. 10.07.2021, бюл. № 20. EDN: XCESVN
4. Воздухоплавательный аппарат: Патент RU197257 U1, МПК B64B1/62 / С.А. Андреев, Д.В. Белов; заявка № 2020106046, заявл. 10.02.2020, опублик. 16.04.2020, бюл. № 11. EDN: FOXVEE
5. Способ нагрева холодного газа гелия для системы наддува бака и устройство для его реализации: Патент RU2788240 C1, МКП B64G1/40 (2006.01), МКП F02K9/42 (2006.01), F02K9/94 (2006.01) / В.И. Трушляков В.А. Урбанский; заявка № 2021138966 от 27.12.2021, опублик. 17.01.2023, бюл. № 2. EDN: DWKLG1
6. Maruf N.I., Morales-Espana G., Sijm J. et al. Classification, potential role, and modeling of power-to-heat and thermal energy storage in energy systems: A review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2022;53(B):102553. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102553>
7. Торопов А.Л. Использование электрических котлов с иерархическим управлением нагрузкой для квартирного теплоснабжения // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17, № 11. С. 1488-1498. EDN: AHDIYI
8. Вадова Л.Ю. Способы и средства повышения эффективности работы трансформаторного нагревателя // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2022, № 8. С. 51-55. EDN: BEZBFZ
9. Комолддинов С.С., Кодиров А.А. Разработка сложного алгоритма электрической цепи // Universum: технические науки. 2021. № 11-5. С. 71-75. EDN: HHOMEO
10. Бодня А.В., Ньорба Е.А. Решение задач повышенного уровня сложности на расчет параметров разветвленных электрических цепей // Калининградский вестник образования. 2022. № 4 С. 42-54. EDN: GQRZGV

2. Мощность источника тока и выделение теплоты целесообразно регулировать во время работы изменением сопротивлений. Увеличение или уменьшение мощности достигается за счет, соответственно, прямо пропорционального уменьшения или увеличения исходных четырех независимых сопротивлений, рассчитанных по исходным данным при заданной мощности, с одинаковым коэффициентом пропорциональности.

References

1. Redkin A.V., Yaloza Yu.A., Kovalev I.E. Reliability assessment of convertible aircraft with hybrid propulsion system and multirotor lifting system. *Civil Aviation High Technologies*. 2020;23(5):76-96. (In Russ.) <https://doi.org/10.26467/2079-0619-2020-23-5-76-96>
2. Redkin A.V., Kovalev I.E., Kostyuchenkov A.N. Determination of rational concept of high-altitude airship and its power systems for long hovering in the northern and arctic regions of our country. *Polet*. 2021;10:28-37. (In Russ.)
3. Andreev S.A., Belov D.V. Airship: patent No. 2751924 Russian Federation, IPC B64B1/06 (2006.01), B64B1/62 (2006.01), H01135/40 (2006.01), 2021. (In Russ.)
4. Andreev S.A., Belov D.V. Airship: patent No. 197257 Russian Federation, IPC B64B1/62, 2020. (In Russ.)
5. Trushliakov V.I., Urbanskii V.A. Method for heating cold helium gas for a tank pressurization system and a device for its implementation: patent No. 2788240 Russian Federation, IPC B64G1/40 (2006.01), F02K9/42 (2006.01), F02K9/94 (2006.01), 2023. (In Russ.)
6. Maruf N.I., Morales-Espana G., Sijm J. et al. Classification, potential role, and modeling of power-to-heat and thermal energy storage in energy systems: A review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2022;53(B):102553. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102553>
7. Toropov A.L. Using electric boilers with hierarchical load control systems to supply heat to apartments. *Vestnik MGSU*. 2022;17(11):1488-1498.
8. Vadova L.Yu. Methods and means of increasing the efficiency of the transformer heater. *Mezhdunarodniy zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovaniy*. 2022;8:51-155. (In Russ.)
9. Komolddinov S.S., Kodirov A.A. Development of a complex electric circuit algorithm. *Universum: Tekhnicheskie nauki*. 2021;11-5:71-75. (In Russ.)
10. Bodnya A.V., Niorba E.A. Solving tasks of the increased level of complexity for calculating parameters of branched electrical circuits. *Kaliningradskiy vestnik obrazovaniya*. 2022;4:42-54. (In Russ.)

Информация об авторах

- ¹ **Белов Михаил Иванович**, д-р техн. наук, профессор;
belov@rgau-msha.ru; SPIN-код: 4508-0008;
<https://orcid.org/0000-0001-9907-8825>
- ² **Белов Дмитрий Владимирович**, ассистент;
dmitri.belov@rgau-msha.ru;
SPIN-код: 6722-9029; <https://orcid.org/0009-0005-8015-2067>
- ³ **Андреев Сергей Андреевич**, д-р техн. наук, доцент;
energo-andreev@rgau-msha.ru; SPIN-код: 8453-6024;
<https://orcid.org/0000-0001-8608-9904>
- ⁴ **Кабдин Николай Егорович**, канд. техн. наук, доцент;
energo-nek@rgau-msha.ru; SPIN-код: 7104-5110;
<https://orcid.org/0000-0002-4104-4187>
- ⁵ **Селезнева Дарья Михайловна**, канд. техн. наук, доцент;
energo-dms@rgau-msha.ru; SPIN-код: 7127-0084
- ^{1, 2, 3, 4, 5} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

Вклад авторов

М.И. Белов – концептуализация, методология, руководство исследованием;
Д.В. Белов – ресурсы;
С.А. Андреев – формальный анализ, создание черновика рукописи, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование;
Н.Е. Кабдин – формальный анализ;
Д.М. Селезнева – администрирование данных.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила 17.12.2024, после рецензирования и доработки 22.09.2025; принята к публикации 22.09.2025

Author Information

- Mikhail I. Belov**¹, DSc (Eng), Professor; belov@rgau-msha.ru;
<https://orcid.org/0000-0001-9907-8825>;
Scopus Author ID: 57212563127; ResearcherID: T-5622-2018
- Dmitry V. Belov**², Assistant Professor;
dmitri.belov@rgau-msha.ru;
<https://orcid.org/0009-0005-8015-2067>
- Sergey A. Andreev**³, DSc (Eng), Associate Professor;
energo-andreev@rgau-msha.ru;
<https://orcid.org/0000-0001-8608-9904>;
Scopus Author ID: 57212200432;
Scopus Author ID: 57205072878
- Nikolay E. Kabdin**⁴, CSc (Eng), Associate Professor;
energo-nek@rgau-msha.ru;
<https://orcid.org/0000-0002-4104-4187>;
Scopus Author ID: 57224401953
- Darya M. Selezneva**⁵, CSc (Eng), Associate Professor;
energo-dms@rgau-msha.ru
- ^{1,2,3,4,5} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation

Author Contribution

M.I. Belov – conceptualization, methodology, research supervision;
D.V. Belov – resources;
S.A. Andreev – formal analysis, writing – original draft preparation, review and editing of the manuscript;
N.E. Kabdin – formal analysis;
D.M. Selezneva – data curation

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

Received 17.12.2024; Revised 22.09.2025; Accepted 22.09.2025