

УДК 621.036:681.20

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ НИТЕОБРАЗНЫХ ТЕПЛО ВЫДЕЛЯЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ

© Александр Анатольевич Шульженко, Михаил Борисович Модестов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения
им. А.А.Благодярова Российской академии наук, Москва, Россия

aa_shulzhenko.01@mail.ru

Аннотация. В работе рассматриваются вопросы расчета тепловых полей тканых электронагревателей на основе высокоомных нитей, в том числе и углеродных. Новизной является рассмотрение особенностей тепловыделяющих элементов, имеющих структуру нитей. Работа представляет интерес для широкого круга специалистов не только занимающихся проектированием тканых, вязанных нагревательных элементов, но и работающих с многожильными проволочными электронагревателями.

Ключевые слова: тканый электронагреватель, углеродные нити, тепловыделяющие элементы, тепловые поля, структура электропроводных нитей.

FEATURES OF CALCULATION OF A THERMAL FIELD OF THREAD-LIKE HEAT-GENERATING ELEMENTS

© A.A. Shul'zhenko, M.B. Modestov

IMASH RAN, Moscow, Russia

aa_shulzhenko.01@mail.ru

Abstract. The paper deals with the calculation of thermal fields of woven electric heaters based on high-resistance threads, including carbon. The novelty is the consideration of the features of the heat-emitting elements having the structure of the threads. The work is of interest to a wide range of specialists not only engaged in the design of woven, knitted heating elements, but also working with multi-wire electric heaters.

Key words: woven electric heater, carbon filaments, heat-emitting elements, thermal fields, structure of electrically conductive threads.

Все большее распространение получают разработанные в машиностроительной отрасли тканые электронагреватели. Они используются в качестве нагревателей: в технологических линиях, осуществляющих фасовку тягучих жидких продуктов; для обогрева технических средств, например, аккумуляторов и при обогреве измерительных устройств в условиях Севера; при создании специзделий для обогрева биологических объектов, в том числе, человека и т.д.

В этих электронагревателях реализуется основное отличие перед другими – высокая степень эластичности, что обеспечивает возможность добиться высокой степени энергосбережения за счет применения контактного способа обогрева. Так широко известны тканые электронагреватели [1] с углеродными нитями в качестве тепловыделяющих элементов.

Однако, произвести расчет тканого электронагревателя довольно затруднительно. Связано это с конструктивными особенностями углеродных нитей, использующихся в качестве тепловыделяющих элементов. Поэтому, данная работа посвящена вопросу приведения

параметров углеродной нити к эквивалентной цилиндрической модели, виду, удобному для расчетов тепловыделения, а также рассмотрению особенностей при использовании известных математических соотношений, позволяющих произвести описание тепловых полей.

Расчет любой тепловой модели, в нашем случае цилиндрической, начинается с момента расчета мощности тепловыделяющего элемента, а именно, с определения его электрического сопротивления. Нахождение электрического сопротивления тепловыделяющего элемента, в нашем случае углеродной нити, производится, либо на основании ее паспортных данных, а именно, погонного сопротивления, либо путем прямого измерения погонных сопротивлений в используемых в тканых нагревателях углеродных нитях. По погонному сопротивлению и длине нити, можно определить ее сопротивление

$$R = \rho \cdot l$$

ρ – погонное сопротивление углеродной нити; l – длина углеродной нити.

Зная электрическое сопротивление и электрическое напряжение, приложенное к нити, можно определить мощность тепловыделяющего элемента.

Еще более сложная задача стоит при расчете тепловых процессов, так как для этого необходимо знать не только мощность тепловыделяющих элементов, а и площадь их поверхности. Это связано с тем, что температура имеет обратно пропорциональную зависимость от площади поверхности [2]

$$t \sim \frac{P}{S} = \frac{U^2}{S \cdot \rho \cdot l}$$

t – текущее значение температуры; S – площадь поверхности тепловыделяющего элемента; P – мощность тепловыделяющего элемента; U электрическое напряжение, приложенное к концам тепловыделяющего элемента.

Сложность точного расчета площади поверхности тепловыделяющего элемента на основе углеродной нити связана с тем, что поверхность углеродной нити представляет собой очень сложную структуру, состоящую из большого количества очень гибких филаментов, распределенных по объему нити случайным образом.

Поэтому, для получения удобной для расчета теплового поля детерминированной цилиндрической модели тепловыделяющего элемента делаются допущения, например, об однородности структуры углеродной нити, о ее идеально круглой форме сечения по всей длине нити и т.д.

Оправданность таких допущений заключается в крайне малых сечениях филаментов и участие в формировании нити их большого числа. Так в поперечном сечении рассматриваемой нити количество филаментов достигает ~3000.

Еще одной причиной, позволяющей использовать цилиндрическую модель углеродной нити, является высокая степень скручивания, что обеспечивает большую плотность прилегания филаментов друг к другу и придает цилиндрическую форму нити.

Еще одна особенность связана с используемым в углеродной нити материалом. Как уже отмечалось, углеродная нить состоит из очень гибких эластичных и несколько рыхлых филаментов, не всегда достаточно плотно прилегающих друг к другу, что приводит на практике к невозможности с помощью средств линейного измерения определить ее диаметр (радиус) сечения, а этот параметр необходимо знать для определения площади поверхности тепловыделяющего элемента.

Так как прямым способом измерить точно радиус не представляется возможным, то используется косвенный метод определения приведенного радиуса углеродной нити.

Углеродная нить, как и любая другая нить, имеет свою линейную плотность γ_l , измеряемую в текс (текс – масса в граммах одного километра нити).

Зная линейную плотность γ_l и удельную массу γ_v углеродной нити можно определить площадь ее сечения

$$S_{сеч} = \pi r_0^2 = \frac{\gamma_l}{\gamma_v} \quad (2)$$

r_0 – приведенный радиус углеродной нити.

В соответствии со сделанным предположением, что сечение углеродной нити представляет собой круг, то, зная площадь сечения, можно определить приведенный радиус такой нити

$$r_0 = \sqrt{\frac{S_{сеч}}{\pi}} \quad (3)$$

В этом случае, зная радиус нити, можно рассчитать периметр сечения Π , площадь боковой поверхности и площадь торцов цилиндрической модели углеродной нити

$$\Pi = 2\pi r_0 \quad (4), \quad S_{бок} = \Pi \cdot l, \quad S_m = \pi \cdot r^2.$$

На основании полученных данных найдем, как осуществляется распространение температуры углеродной нити, обладающей цилиндрической формой при стационарном режиме передачи тепла.

Следует отметить, что описанные выше допущения и приближения будем учитывать с помощью коэффициента K .

Вопросу тепловыделения через боковую поверхность углеродной нити при наличии внутренних источников тепла было уделено достаточно внимания при расчетах теплового поля в проволоке [3, 4]. В этих и многих других работах были получены соотношения, позволяющие производить расчет теплового поля в пределах цилиндра

$$t_r = t_{жс} + \frac{q_v r_0}{2\alpha} + \frac{q_v}{4\lambda}(r_0^2 - r^2) = t_{жс} + \frac{P}{2\alpha\pi r_0 l} + \frac{P}{4\pi\lambda l}(1 - x'^2) \quad (1),$$

t_r – текущее значение температуры поперек нити; r' – текущее относительное значение радиуса цилиндрической модели нити; r_0 – значение условного радиуса на внешней поверхности цилиндрической поверхности углеродной нити; q_v – объемное тепловыделение углеродной нити; α – коэффициент теплоотдачи на поверхности углеродной нити; λ – коэффициент теплопроводности углеродной нити; l – длина углеродной нити.

Уделялось внимание исследователями и прохождению тепла вдоль проводника с внутренними источниками тепла. Так, например, при прохождении тепла через тонкую стенку при наличии в ней источников тепла, при одинаковых граничных условиях с обеих сторон стенки, этот процесс описывается [3, 4]

$$t_l = t_{жс} + \frac{q_v l_0}{2\alpha} + \frac{q_v}{8\lambda}(l_0^2 - y'^2) = t_{жс} + \frac{U^2}{2\alpha\pi_0^2 R} + K_2 \frac{U^2 l_0}{4\lambda\pi_0^2 R}(1 - y'^2) \quad (2),$$

t_l – текущее значение температуры вдоль нити; x – текущее значение длины нити; l_0 – длина нити; q_v – объемное тепловыделение углеродной нити; α – коэффициент теплоотдачи на поверхности углеродной нити; λ – коэффициент теплопроводности углеродной нити; U – напряжение, приложенное к концам углеродной нити; R – сопротивление углеродной нити.

Зная соотношения (1, 2) и граничные условия из которых они были получены, и считая, что граничные условия, в которых находится тепловыделяющий элемент на основе углеродной нити аналогичны, то можно для теплового расчета тепловыделяющего элемента на основе углеродной нити использовать формулы (1, 2), но сделав некоторые преобразования, учитывающие отличия в геометрических формах.

В тонкой стенке, для которой был сделан ранее тепловой расчет (2), тепловые потери с торцов стенки не учитывались. В ней рассматривались теплопроводность только через стенку и теплоотдача с поверхности стенки, то есть, решалась одномерная задача передачи тепла.

Однако, углеродная нить отличается от тонкой стенки. Так поперечное сечение углеродной нити намного меньше ее длины. Больше того, условный радиус углеродной нити $r_0 \rightarrow 0$. Поэтому, в отличие от тонкой стенки теплоотдачей с торцов углеродной нити можно пренебречь, а теплоотдача будет происходить только с боковой поверхности приведенного цилиндра. В то же время, распространение тепла путем теплопроводности в углеродной нити благодаря существенно большему значению коэффициента теплопроводности λ по сравнению с теплопроводностью внешней среды, будет происходить вдоль нити, и закон изменения температуры будет такой же, как в тонкой стенке. Изменения температуры поперек нити практически не будет, так как радиус нити $r_0 \rightarrow 0$. Следует так же учесть, что распространение температуры не будет ограничиваться только нитью. Поэтому, согласно [5], тепловое поле тепловыделяющего элемента в поперечном сечении можно записать

$$t = t_{ж} + \frac{q_v r_0}{2\alpha} \cdot e^{-|1-x/a|}, \quad (3)$$

a_1 – координата нахождения теплоносителя по оси X; x – текущее значение ординаты.

При этих условиях, слагаемым из формулы (1), определяющим распространения тепла внутри нити, вдоль ее диаметра, можно пренебречь, ввиду его малости. Тогда формула (1) с учетом выражения (3) и вышеперечисленных отклонений примет вид

$$t_r = t_{ж} + K_1 \frac{P}{2\alpha\pi_0 l} \cdot e^{-|1-x/a|}, \quad (4)$$

K_1 – поправочный коэффициент при теплоотдаче с боковой поверхности цилиндра.

Это же условие влияет и на распространение тепла вдоль тепловыделяющего элемента, описанное в формуле (2), и слагаемым, определяющим теплоотдачу с поверхности торцов нити, можно также пренебречь, и тогда формулу (2) для нашего теплоносителя можно записать

$$t_v = t_{ж} + K_2 \frac{U^2 l_0}{4\lambda\pi_0^2 R} (1 - y'^2) \quad (5)$$

K_2 – поправочный коэффициент при передаче тепла вдоль углеродной нити.

Учитывая (4) и (5), можно получить выражение, описывающее трехмерное тепловое поле, формируемое углеродной нитью

$$t = t_{ж} + \begin{cases} K_1 \frac{U^2 l_0}{8\lambda\pi_0^2 R} (1 - y'^2) \\ K_2 \frac{P}{2\alpha\pi_{0y} l} \cdot e^{-|1-x/a|} \end{cases} \quad (6)$$

Тепловое поле, создаваемое углеродной нитью, лежащей на поверхности XY, показано на рис. 1.

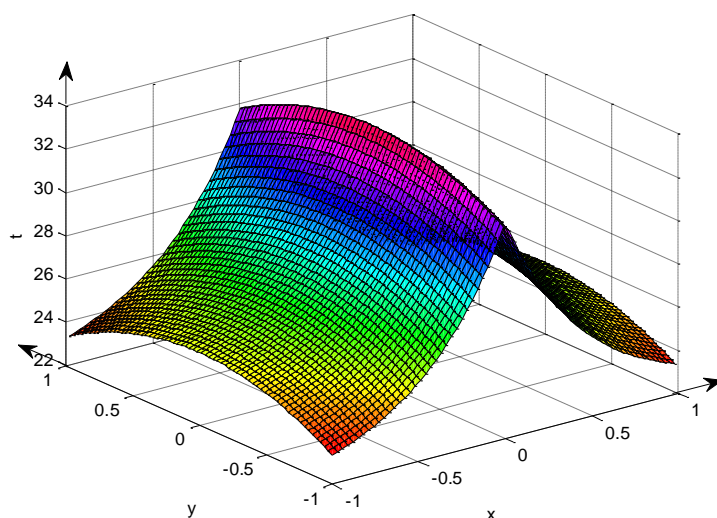


Рис. 1. Расчетное тепловое поле тепловыделяющего элемента на основе углеродной нити, расположенного в плоскости XY.

Как правило, тканый электронагреватель включает в себя не одну, а несколько углеродных нитей. На рис. 2 показан тканый электронагреватель, состоящий из 5 параллельно расположенных углеродных нитей, отстоящих друг от друга на некотором расстоянии. Тепловое поле такого нагревателя будет являться суммой тепловых полей 5 тепловыделяющих элементов [5].

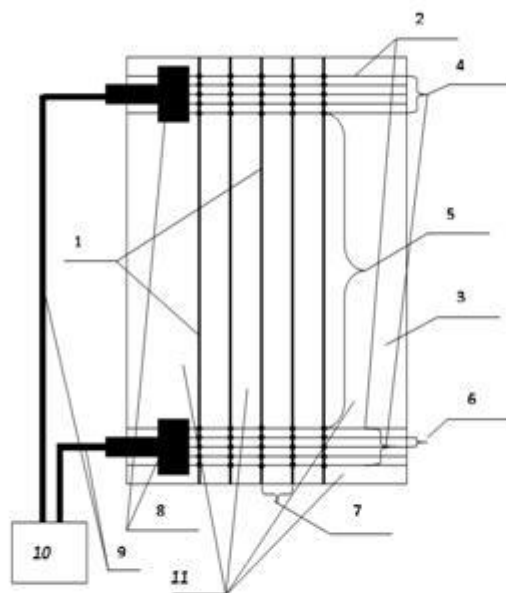


Рис. 2. Внешний вид тканого нагревателя, состоящего из 5 углеродных и 5 мишурных нитей.

1 – углеродные нити, 2 – мишурные нити, 3 – фоновые нити, 4 – контактные площадки, 5 – активная длина углеродных нитей l_a , 6 – расстояние между мишурными нитями в контактных площадках l_n , 7 – расстояние между углеродными нитями, 8 – средство соединения мишурных нитей в контактной площадке с проводом, 9 – провода, 10 – источник электропитания; 11 – фоновые электроизоляционные нити.

$$t = t_{\text{ж}} + \begin{cases} K_1 \frac{U^2 l_0}{4 \lambda \pi_0^2 R} (1 - y^2) \\ K_2 \frac{P}{2 \alpha \pi_0 y l} \cdot \sum_1^n e^{-|1-x/a_n|} \end{cases},$$

n – количество тепловыделяющих элементов в тканом электронагревателе.

Суммарное распределение температуры на поверхности тканого электронагревателя, состоящего из 5 тепловыделяющих элементов на основе углеродных нитей и лежащего в плоскости XY, показано на рис. 3.

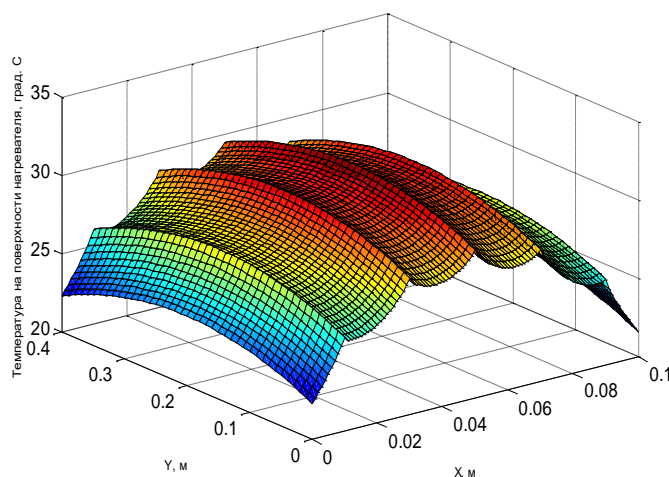


Рис. 3. Суммарное расчетное тепловое поле тканого электронагревателя с 5 тепловыделяющими элементами на основе углеродных нитей, расположенного в плоскости XY.

Выводы. Были получены геометрические размеры, позволившие построить цилиндрическую модель тепловыделяющего элемента на основе углеродной нити.

Используя выведенные ранее формулы, описывающие тепловые процессы, происходящие в объектах тепловыделения, имеющих несколько другие геометрические формы, но с аналогичными граничными условиями, были получены соотношения, позволяющие довольно точно описать с их помощью тепловые поля, создаваемые тепловыделяющими элементами из углеродных нитей.

Получено суммарное распределение теплового поля тканого электронагревателя.

Данный подход к решению тепловых задач и полученные соотношения может использоваться широким кругом специалистов, занимающихся проектированием нагревательных устройств на основе тепловыделяющих элементов из углеродной нити или тонких многожильных проводов.

Список литературы

1. Шульженко А.А., Модестов М.Б. Тканые электронагревательные элементы и примеры их применения // Вестник научно-технического развития. – 2017. - №7. - С. 30-40.
2. Шульженко А.А., Андрианов Н.А., Модестов М.Б. Тепловые модели углеродных нитей // Вестник научно-технического развития. – 2014. - № 7. - С. 34-41.
3. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. - М.: Энергоиздат, 1981. - 416 с.
4. Сайт. URL: <http://www.files.lib.sfu-kras.ru>. (дата обращения 23.05.2018).
5. Шульженко А.А., Модестов М.Б. Расчет теплового поля нагревательных элементов, изготовленных на основе электронагревательной ткани. 7 краткий отчет об основных результатах научно-исследовательских работ за 2005-2006 гг. - М.: ИМАШ РАН, 2006. - С. 88-91

Дата поступления: 29 мая 2018 г.