

УДК 621.036:681.20

ТЕПЛОВЫЕ МОДЕЛИ УГЛЕРОДНЫХ НИТЕЙ**© Александр Анатольевич Шульженко, Николай Алексеевич Андрианов,
Михаил Борисович Модестов***Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН,
ecometer@mail.ru*

Аннотация. В статье проводится анализ различных моделей углеродных нитей: физических и математических. Применение этих моделей, позволяет более точно отразить в тепловых расчетах структуру углеродных нитей, а так же учесть степень влияния технологических процессов на тепловые процессы, происходящие в углеродных нитях.

Ключевые слова: углеродные (графитовые) нити, тепловые поля, температура, модели, физические, математические.

Все более широкое применение эластичных тканых электронагревателей, являющихся элементами энергосберегающих технологий, предполагает использование в качестве тепловыделяющих элементов самых разнообразных материалов: одножильных и многожильных металлических проволок, нитей различной плотности и структур и др. Особое место в этом спектре тепловыделяющих элементов играют углеродные (графитовые) нити [1-5]. Их достоинствами являются высокая эластичность, способность выдерживать большую нагрузку на разрыв, электропроводность, способность долго работать при значительных токовых нагрузках и т.д. [4, 6]. При тепловых расчетах обычно используют модель углеродной нити в виде проволоки - тонкого цилиндра. Такая тепловая модель хорошо описана в целом ряде источников [7, 8]. Однако, наблюдается большие расхождения между расчетными результатами, полученными таким способом, и экспериментальными данными. Расхождения настолько существенные, что отличия могут достигать десятков раз. Такие результаты говорят о несоответствии используемой для расчетов цилиндрической модели – реальной картине тепловых полей. Поэтому целесообразно определить, какие свойства углеродных нитей необходимо еще учесть и на этой базе сформировать новую модель, более точно подходящую для описания тепловых процессов, происходящих в тепловыделяющих элементах из углеродной нити. С этой целью проведем анализ математических выражений, наиболее полно отражающих тепловые процессы, происходящие в цилиндрической модели.

Пусть углеродная нить располагается, как показано на рис. 1.

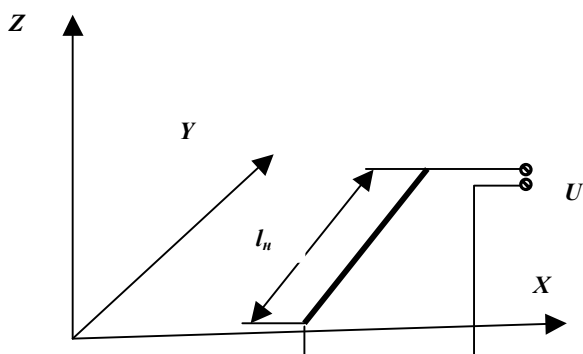


Рис. 1. Расположение углеродной нити в плоскости XY.

U – напряжение источника постоянного тока; l_n – длина тепловыделяющего элемента из углеродной нити.

Согласно [9, 10] имеем следующее

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta T_{1x'} = \frac{P_1}{2\pi r_n \alpha_{\Sigma} l_n} \cdot [1 - |x'| \cdot (1 - \ln|x'|)] \quad \text{при } x' > 1, x' < -1 \\ \Delta T_{2x'} = \frac{P_1}{2\pi r_n \alpha_{\Sigma} l_n} + \frac{P_1}{4\pi \lambda_n} [1 - (x')^2] \quad \text{при } -1 \leq x' \leq 1 \\ \Delta T_{y'} = \frac{P_1}{4\pi \lambda_n} (y' - (y')^2) \quad \text{при } 0 \leq y' \leq 1 \end{array} \right. \quad (1)$$

$\Delta T_{1x'}$, $\Delta T_{2x'}$ – текущие значения температур углеродной нити по оси X ; $\Delta T_{y'}$ – текущее значение температур углеродной нити по оси Y ; P_1 – электрическая мощность, потребляемая одной углеродной нитью; x' – текущее относительное значение ординаты по сечению нити; r_n – эквивалентный радиус углеродной нити; y' – текущее относительное значение по длине нити; α_{Σ} – коэффициент теплоотдачи с поверхности углеродной нити в воздушную среду; λ – коэффициент теплопроводности углеродной нити; l_n – длина тепловыделяющего элемента из углеродной нити.

Данные соотношения были получены при следующих основных допущениях. Работа тепловыделяющего элемента на основе углеродной нити рассматривалась при прохождении по нему постоянного тока. Углеродная нить находилась в однородной внешней среде и сама нить представляла собой однородное тело. Согласно [9], так как диаметр нити крайне мал, то температура внутри нити, вдоль ее радиуса, практически не изменяется, и равна температуре на ее поверхности. Предполагалось, что в процессе теплоотдачи участвует только боковая поверхность углеродной нити, так как длина ее намного больше поперечного сечения. Суммарное распределение температур в углеродной нити по оси X представлено в виде системы выражений

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta T_{1x'} = \frac{P_1}{2\pi r_n \alpha_{\Sigma} l_n} \cdot [1 - |x'| \cdot (1 - \ln|x'|)] \quad \text{при } x' > 1, x' < -1 \\ \Delta T_{2x'} = \frac{P_1}{2\pi r_n \alpha_{\Sigma} l_n} \quad \text{при } -1 \leq x' \leq 1 \end{array} \right. \quad (2),$$

графическое изображение которых показано на рис.2.

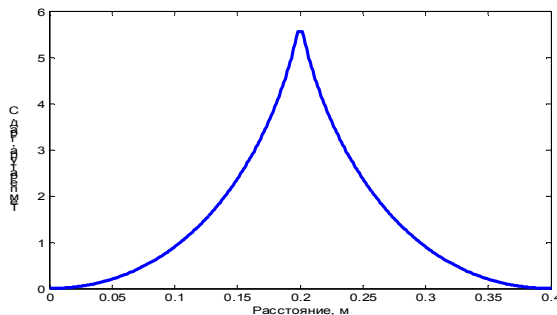


Рис.2. Суммарное тепловое поле тепловыделяющего элемента на основе углеродной нити по оси X .

Согласно [10], температура распределяется вдоль тепловыделяющего элемента на основе углеродной нити (вдоль оси Y) в соответствии с

$$\Delta T_{y'} = \frac{P_1}{4\pi\lambda r_n} (y' - (y')^2) \quad \text{при } 0 \leq y' \leq 1 \quad (3)$$

Для упрощения, перераспределение температуры вдоль углеродной нити с учетом эффекта Томсона рассматривать не будем.

Таким образом, выражения (2), (3) совместно описывают тепловое состояние углеродной нити, имеющей цилиндрическую модель. Суммарное тепловое поле углеродной нити показано на рис. 3.

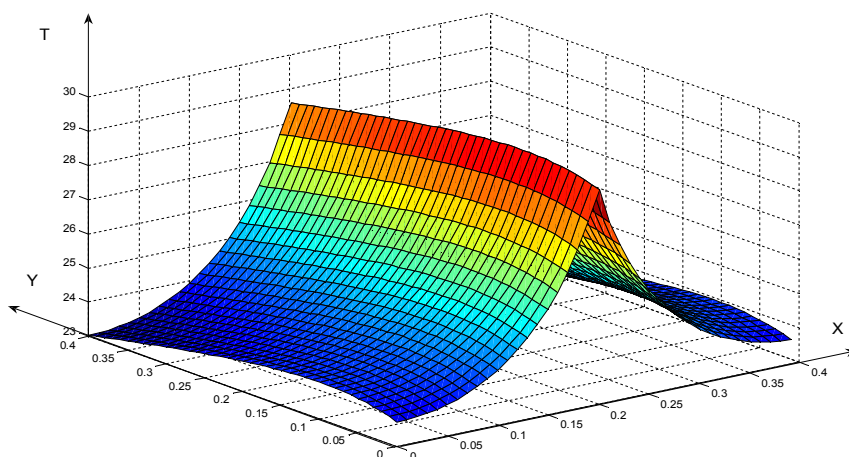


Рис. 3. Суммарное тепловое поле тепловыделяющего элемента на основе углеродной нити, расположенного в плоскости XY .

Из выражений (1, 2, 3) следует, что температура, генерируемая углеродными нитями, прямо пропорциональна мощности и обратно пропорциональна площади боковой поверхности нити, то есть

$$T \sim \frac{P}{S_{бок}} \quad (4)$$

Углеродная нить в качестве тепловыделяющего элемента обычно используется не отдельно, а в составе электронагревательной ткани, в сочетании с другими углеродными нитями. При изготовлении электронагревательной ткани нити проходят все технологические этапы, связанные с изготовлением ткани. В ходе такой технологической обработки происходят отклонения параметров нити от первоначальных. Как было отмечено в [9] изменение электрических параметров в процессе обработки не превышает 10%. Необходимо выяснить, изменение каких еще параметров влияет на тепловыделение углеродной нити.

Для этого проведем детальный анализ строения углеродной нити (рис. 4).

При расчете теплового поля, создаваемого углеродной нитью, как отмечалось выше, применялась цилиндрическая модель. При использовании цилиндрической модели обычно делается предположение, что диаметр филамента углеродной нити настолько мал, что можно пренебречь влиянием его на боковую поверхность нити. Также предполагалось, что нить скручена настолько плотно, что внутренняя часть нити представляет собой одно однородное пространство, то есть моделью нити может служить цилиндр. Померить диаметр углеродной нити не представляется возможным из-за ее высокой эластичности, поэтому для определения диаметра используется косвенный метод – расчет эквивалентного диаметра углеродной нити через ее электрическое сопротивление, удельную электропроводность, удельный вес, удельную плотность. То есть цилиндрическая модель требует довольно больших допущений, сильно искажающих объективное представление о тепловыделяющем

элементе на основе углеродной нити. Об этом же говорит и фотография углеродной нити, полученная с помощью микроскопа. На ней отчетливо видно, что углеродная нить представляет собой переплетенные пучки, состоящие из большого количества элементарных углеродных волокон – филаментов. Согласно техническим данным на углеродную нить УВИС-НШ-215 [11] количество филаментов в сечении нити составляет ~ 3000.



Рис. 4. Углеродная нить.

Как видим на рис.4, боковая поверхность углеродной нити имеет более сложную по сравнению с цилиндром поверхность. Принимая во внимание выражение (4), можно предположить, что при сохранении мощности и площади сечения нити температура на поверхности реальной нити будет ниже, чем у цилиндрической модели за счет большей площади боковой поверхности. Рассмотрим, какие модели, помимо цилиндрической, могут быть использованы для расчета тепловых полей тепловыделяющего элемента на основе углеродной нити.

Предположим, что углеродная нить плотно сплетена. Для удобства рассмотрения введем следующие ограничения. Пусть длина углеродной нити и длина филамента будут одинаковы. Тогда можно считать, что в сечениях по всей длине нити будет постоянное количество филаментов. В этом случае электрическое сопротивление по всей длине нити будет одинаковым и мощность, рассеиваемая на каждом одинаковом фрагменте по длине нити, будет постоянной. Будем считать, что диаметры нити и филаментов, много меньше их длин. Тогда теплоотдачу можно учитывать только с боковой поверхности нити. Будем полагать, что филаменты в нити расположены так плотно, что между ними практически нет зазоров, то есть они образуют однородное пространство. Будем считать, что внешние филаменты располагаются по окружности цилиндрической модели нити, соприкасаясь друг с другом (рис. 4). Пусть эта поверхность образуется из m филаментов. Будем считать, что находящиеся на поверхности нити филаменты имеют сечения в виде круга. Для упрощения расчетов сделаем допущение, что точки соприкосновения между соседними филаментами, находящимися на поверхности нити, разбивают внешнюю окружность филамента пополам.

Пусть $S_{спл}$ – площадь боковой поверхности плотно сплетенной нити, образуемая филаментами, расположенными на поверхности нити; m – количество филаментов, расположенных по боковой поверхности плотно сплетенной нити; r_ϕ – радиус одного филамента; $S_{цил}$ – боковая поверхности цилиндрической модели нити; r_n – радиус цилиндрической модели нити; l_n – длина нити .

Площадь боковой поверхности показанной на рис. 5 модели нити будет равна $S_{спл} \approx m \cdot \pi \cdot r_\phi \cdot l_n$. Количество филаментов, образующих боковую поверхность плотно сплетенной нити УВИС-НШ-215, m можно определить

$$m \approx \frac{2 \cdot \pi \cdot r_n}{2 \cdot r_\phi} = \frac{\pi \cdot 0,22 \cdot 10^{-3}}{4,1 \cdot 10^{-6}} = 168$$

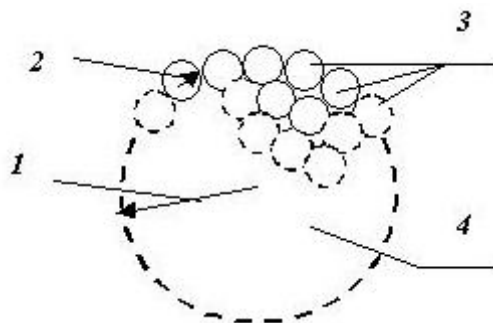


Рис. 5. Модель плотно сплетенной углеродной нити: 1- радиус углеродной нити, 2 – радиус филамента, 3 – филамент, образующие внешнюю поверхность углеродной нити, 4 – углеродная нить.

Как показано в [9], площадь боковой поверхности модели плотно сплетенной нити $S_{спл} = m\pi r_\phi l_n$ будет больше площади боковой поверхности цилиндрической модели нити $S_{цил} = 2\pi r_n \cdot l_n$

$$K = \frac{S_{спл}}{S_{цил}} \approx \frac{m\pi r_\phi l_n}{2\pi r_n \cdot l_n} \approx \frac{m\pi r_\phi \cdot l_n}{2m r_\phi \cdot l_n} = \frac{\pi}{2}$$

Увеличение площади боковой поверхности в модели типа «плотно сплетенной нити» приводит к снижению температуры, рассчитанной с помощью цилиндрической модели, в 1,57 раза.

Теперь рассмотрим тепловую модель углеродной нити, когда все филаменты нити находятся на некотором расстоянии друг от друга и участвуют в образовании боковой поверхности нити, то есть она находится в полностью «распущенном» состоянии (рис. 6), когда она состоит, как бы из отдельных филаментов.

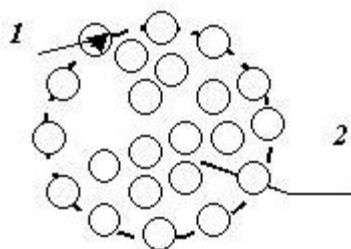


Рис.6. Модель полностью «распущенной» углеродной нити: 1 – радиус ворсинки, 2 – углеродная нить.

В этом случае

$$S_{распл} \approx n \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_\phi \cdot l_n$$

n – общее количество филаментов в сечении нити.

Определим, чему равно число n для углеродной нити типа УВИС-НШ-215. Согласно проведенным экспериментам погонное сопротивление одной углеродной нити равно $R_n = 318 \text{ ом/м}$, а погонное сопротивление одного филамента $R_\phi = 900\,000 \text{ ом/м}$, тогда n равняется

$$n = \frac{R_\phi}{R_n} = \frac{900000}{318} = 2830$$

Для этого типа углеродной нити площадь боковой поверхности модели полностью распущенной нити $S_{распл}$ будет больше площади боковой поверхности модели плотно сплетенной нити $S_{спл}$

$$L = \frac{S_{распл}}{S_{спл}} \approx \frac{n \cdot 2\pi \cdot r_{\phi} \cdot l_n}{m \cdot \pi \cdot r_{\phi} \cdot l_n} = \frac{2n}{m}$$

L – отношение площади поверхности расплетенной нити к площади поверхности плотно сплетенной нити; r_{ϕ} – радиус одного филамента; $S_{распл}$ – площадь поверхности «распущенной» нити, то есть суммарная площадь боковых поверхностей всех филаментов, входящих в нить; $S_{спл}$ – площадь поверхности плотно сплетенной нити, образуемая филаментами, расположенными на поверхности нити; n – общее количество филаментов в расплетенной нити; m – количество филаментов, расположенных по боковой поверхности плотно сплетенной нити.

В варианте нити УВИС-НШ-215 число $L = 34$.

Таким образом, рассчитанная в соответствии с цилиндрической моделью температура на поверхности нити может быть выше реальной от 1,6 до 52,9 раз.

Из проведенного анализа можно сделать очень важный вывод, который заключается в очень высокой степени влияния на температурный режим углеродной нити изменений площади боковой поверхности. Эти изменения в основном связаны с технологическими операциями при обработке нити в ходе изготовления электронагревательных тканей. Для сравнения можно отметить, что уровень изменений электрических параметров нити в ходе прохождения технологических операций при изготовлении электронагревательной ткани, который согласно [9] не превышает 10% от первоначальных значений.

Интересной иллюстрацией для всего вышесказанного является завязывание узла на оборвавшейся в процессе производства нити.

В ходе проведенных экспериментов было определено, что в этом случае происходит существенный подъем температуры в месте расположения технологического узла на одной из углеродных нитей в нагревателе, из углеродных нитей, расположенных на некотором расстоянии друг от друга рис. 7.

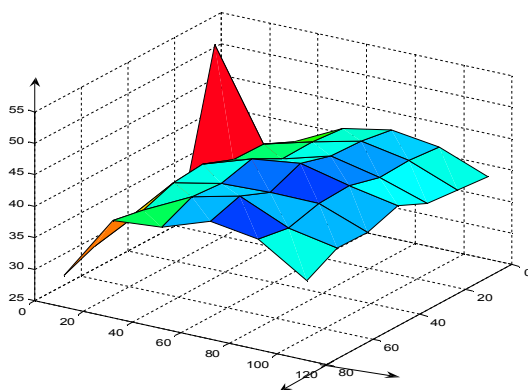


Рис. 7. Распределение температуры на поверхности тканого нагревателя с углеродными нитями в качестве тепловыделяющих элементов, на одной из которых завязан технологический узел.

Как видно из выражения (4) температура на поверхности нити прямо пропорциональна мощности и обратно пропорциональна площади боковой поверхности нити.

Предположим, что углеродная нить в процессе обработки не претерпела никаких изменений, то есть в этом случае для расчета можно принять модель плотно сплетенной нити.



Рис. 8. Внешний вид углеродной нити в области узла.

На рис. 8, в месте узла, сечение углеродной нити увеличилось, то есть увеличилось количество филаментов в сечении и электрическое сопротивление нити в этом месте уменьшилось. При завязывании узла ток, протекающий по нити, практически не изменился, так как $I_n \gg I_{узн}$. Мощность, рассеиваемая в области узла, должна уменьшиться, так как

$$P = I_n^2 R_{узн} = I_n^2 \rho 2n \quad (\rho - \text{погонное электрическое сопротивление углеродной нити})$$

и количество филаментов, проходящих через узел, будет больше числа филаментов в сечении обычной нити без узла. Одновременно должна увеличиться площадь поверхности нити в области узла. А так как $T \sim \frac{P \downarrow}{S_{нов} \uparrow}$, то температура должна упасть. Однако, как показано на

рис. 7, в области нахождения узла температура возросла. Почему это происходит? Объяснить это явление с помощью плотно скрученной или цилиндрической модели углеродной нити невозможно. Ответ на этот вопрос можно найти, если внимательно посмотреть на рис. 4. На этом рисунке видно, что нить после ткачества представляет собой не однородное тело, а множество филаментов, не плотно прилегающих друг к другу. То есть, вокруг каждого филамента имеем некоторое пространство. В этом случае, площадь поверхности нити существенно отличается от площади поверхности нити с плотно прилегающими филаментами. В пределе площадь поверхности расплетенной нити может быть в L раз больше площади поверхности нерасплетенной нити. В реальной нити, после ее технологической обработки, температура на ее поверхности будет меньше, чем в нити с плотно прижатыми филаментами, так как при одинаковой рассеиваемой мощности суммарная площадь боковой поверхности будет больше $T \downarrow \sim \frac{P = const}{S_{нов} \uparrow}$. Теперь

рассмотрим, что происходит с распределением температур в нити при завязывании узла. При завязывании узла в реальной нити площадь боковой поверхности как в самом узле, так в особенности, и в области входа нити в узел и выхода из него, за счет сдавливания будет не увеличиваться, а уменьшаться, что при сохраняемых электрических параметрах приведет к росту температуры в области узла. Это явление является негативным, так как рост температуры происходит довольно значительный и может привести к нежелательным последствиям, возникаемым в результате локального перегрева.

Выводы. Для уменьшения эффекта локального перегрева, необходимо в процессе ткачества уменьшать трение нити о рабочие поверхности деталей ткацкого оборудования, то есть уменьшить «распушиваемость».

Благодаря проведенному анализу были осуществлены технологические усовершенствования, которые позволили существенно снизить эффект трения, и добиться

существенного уменьшения нежелательного воздействия технологического оборудования на нить в процессе производства электронагревательной ткани. В результате было достигнуто существенное уменьшение разрывки и «распушивания» нити, что при завязывании технологических узлов на нити, снижает температурные изменения в области этих узлов, да и количество обрывов при снижении трения также уменьшается. Испытания показали, что температура на поверхности реального тепловыделяющего элемента на основе углеродной нити стали более близкими к температуре, рассчитанной по модели с плотно скрученной углеродной нитью.

Усовершенствование производства позволили повысить срок службы изделий из электронагревательной ткани.

Использование в реальных ситуациях математических моделей наиболее полно отвечающих этим случаям позволяет получить возможность более точно сделать предварительные расчеты тепловых полей, создаваемых как отдельными, так и группами тепловыделяющих элементов из углеродных нитей.

Список литературы

1. Kochman A., Gurevich A. Electroconductive textile heating element and method of manufacture. 1998. Appl. № 855,595
2. Belluco U., Peruzzo L. Electrically conducting set of fibers in sheet form. European Patent Application, 1993. Bul. № 93/40.
3. Шульженко А.А., Корнев В.Н., Модестов М.Б. Электронагревательная ткань, нагревательный элемент на ее основе и средство соединения нагревательного элемента с источником электропитания (варианты). Патент РФ № 2145984. Б.И., 2000. № 6.
4. Коновальчик А.В. Время углеродного волокна. Сайт URL: <http://www.promvest.info> (дата обращения 23.09.2013).
5. Можайский О. Водолазный костюм // Рационализатор и изобретатель, 2004. № 3. Сайт URL: <http://www.i-g.ru> (дата обращения 23.09.2013).
6. Технические характеристики продукции. ООО «УВИКОМ». Проспект. М.О.: ООО УВИКОМ, 1997.
7. Справочник машиностроителя. Т. I. Под ред. акад. Чудакова Е.А., М.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1950.- 1036 с.
8. Мухачев Г.А., Щукин В.К. «Термодинамика и теплопередача», М.: Высшая школа, 1991.- 480 с.
9. Шульженко А.А., Андрианов Н.А., Модестов М.Б., Мнев Б.А. Особенности расчета тканого нагревателя с углеродными электропроводными нитями // Проблемы машиностроения и надежности машин, 2010. № 6.- С. 93.
10. Шульженко А.А., Модестов М.Б., Мнев Б.А. Расчет теплового поля тканого нагревателя со сплошным расположением высокоомных нитей // Проблемы машиностроения и надежности машин, 2009. № 5.- С. 112-117.