

УДК 536.3

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ ТЕПЛОВОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ И РЕАКЦИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

А.А.Шульженко, М.Б.Модестов, Б.А.Мнев

Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Россия, Москва

В нашей стране, где 60% территории являются территориями Севера или приравненным к ним, большое значение придается вопросам обогрева.

Но не только из-за нахождения в северном регионе мира уделяется такое большое внимание обогревателям. Во многих случаях необходим обогрев и в нормальных условиях, например, для медицинских целей: для вывода людей из состояния гипотермии, для поддержания требуемого для больного температурного режима и др.

Для этих целей применяются самые разнообразные нагреватели. Эти нагреватели работают и выделяют тепло за счет использования различных физико-химических процессов. Эти нагреватели имеют самые разнообразные назначения и обладают различными мощностями, габаритами. И к этому многообразию нагревателей в последнее время добавился еще целый класс - тканые нагреватели.

В тканых нагревателях в качестве тепловыделяющих элементов используются электропроводные нити и/или провода. В нагревателях они могут иметь различные сочетания. Обычно, при конструировании того или иного нагревателя, делается предварительный расчет, а затем производится доводка опытным путем. Но весь расчет сводится к получению мощностных параметров нагревателя, тепловых потоков, что не является достаточным для тканых нагревателей, особенно, если они используются для обогрева биологических объектов, в частности, человека. Так как в этом случае тканые нагреватели работают в условиях непосредственного контакта с обогреваемым объектом, то необходимо обеспечить температурное согласование нагревателя и обогреваемого объекта, человека. Поэтому было бы целесообразно получить возможность рассчитать не только мощностные параметры или даже температуры в отдельных точках, а иметь представление о температурных полях, создаваемых этими нагревателями. Для этого рассмотрим, как работает наиболее типичный тканый нагреватель, показанный на рис. 1.

Структурно тканый нагреватель представляет собой прямоугольный кусок ткани, включающий в себя, по меньшей мере, одну группу из параллельных электропроводящих нитей 1, вплетенных по основе в фоновую часть ткани 3, образованную переплетением электроизоляционных основных и уточных нитей. На базе группы высокоомных нитей образуется: активная часть нагревателя 5 и как минимум две контактные площадки 4,- служащие для электрического соединения активной части нагревательного элемента с источником электропитания. Контактные площадки создаются также и при помощи групп параллельных уточных низкоомных нитей 2, образующих контактное соединение при переплетении с группой основных электропроводящих нитей, при этом активная нагревательная часть 5 размещена между двумя группами уточных низкоомных нитей [1]

Для упрощения сначала рассмотрим процессы, происходящие в нагревателе, состоящем из одной основной электропроводящей нити.

Сформулируем условия, при которых работает такой нагреватель.

Будем считать, что нагреватель лежит в плоскости $X\bar{Y}$.

Отдельная электропроводящая нить или проволока представляет собой дискретный тепловой элемент (рис. 2а, 2б), расположенный параллельно оси \bar{Y} .

Поверхность, на которой лежит тканый нагреватель, обладает идеальными термоизоляционными свойствами.

Будем считать, что электропроводная нить настолько тонкая, что ее проекция на ось \bar{X} представляет собой точку. В этом случае коэффициент теплоотдачи с торцов электропроводной нити будет отсутствовать.

В данном нагревателе сопротивление электропроводной нити существенно больше сопротивления электроподводящих контактных площадок, поэтому теплотери на контактных площадках не учитываются.

Будем считать, что температура внешней среды во времени и в пространстве неизменна.

Тканые нагревательные элементы работают обычно при невысоких уровнях температур, поэтому будем полагать, что физические параметры этих нагревателей не меняются от температуры их нагрева.

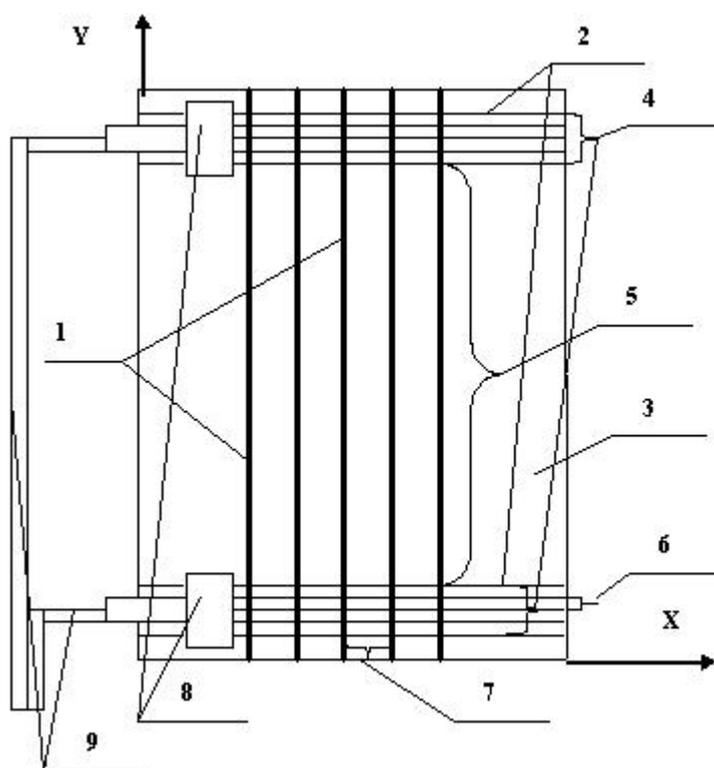


Рис. 1. Тканый нагреватель из 5 высокоомных и 5 низкоомных нитей.

1 – электропроводящие нити, 2 – низкоомные нити, 3 – фоновые нити, 4 – контактные площадки, 5 – активная длина электропроводящих нитей 1, 6 – расстояние между низкоомными нитями в контактных площадках, 7 – расстояние между электропроводящими нитями, 8 – средство соединения проводников, 9 – провода.

Так как тканые нагреватели используются обычно в изделиях, работающих в течение долгого времени, то за это время система нагреватель - обогреваемый объект – внешняя среда входит в режим температурного насыщения. Поэтому будем рассматривать стационарный тепловой процесс

$$\frac{\partial \Delta T}{\partial \tau} = 0$$

$\Delta T = T - T_{cp}$, T – текущая температура, T_{cp} – температура окружающей среды.

Тканые нагреватели работают от электрических источников энергии. Весь электрический ток в рассматриваемом тканом нагревателе проходит только через электропроводящую нить. Тепловой поток является векторной величиной [2, 3, 4]

$$\mathbf{q} = \mathbf{P}/S$$

где \mathbf{P} – мощность, потребляемая электропроводящей нитью, S – площадь поверхности, через которой проходит тепловой поток. Пусть ось \mathbf{P}/S перпендикулярна плоскости \mathbf{XY} , в пределах которой лежит тканый нагреватель. Вектор теплового потока нормален к изотермической поверхности и направлен в сторону убывания температуры. Так как нагреватель лежит на идеальной термоизоляционной поверхности и толщина его стремится к 0, то тепловой поток этого нагревателя распространяется над поверхностью тканого нагревателя. Вектор теплового потока, созданного и локализованного в пределах электропроводящей нити, можно представить в виде пространственного импульса, перпендикулярного плоскости \mathbf{XY} , протяженного на всю длину электропроводящей нити по оси \mathbf{Y} (рис. 3а) и равного диаметру электропроводной нити, вдоль оси \mathbf{X} (рис. 2в).

Рассмотрим, как ведет себя система: электропроводящая нить, генерирующая тепло, - внешняя среда,- то есть какова реакция этой системы на воздействие такого нелинейного сигнала.

В реальной среде элемент, вырабатывающий тепловую энергию и имеющий конечные размеры, создает тепловой поток. Если считать, что изотермические поверхности вокруг точки (проекция на ось \mathbf{X} электропроводящей нити) представляют собой концентрические окружности, при условии одинаковости теплофизических свойств окружающей среды и теплоизоляционных материалов, то чем дальше от нити, генерирующей тепло, тем меньше уровень переносимого тепла. Проекция векторов теплового потока на направления параллельные оси \mathbf{P}/S вдоль оси \mathbf{X} в общем виде можно представить

$$q_x = q / \cos \varphi$$

φ – угол, между направлением теплового потока (нормалью к изотермической поверхности) и направлением, проходящим через текущую точку на оси \mathbf{X} , параллельным оси \mathbf{P}/S . Ось \mathbf{P}/S перпендикулярна плоскости \mathbf{XY} .

Как уже отмечалось, тканый нагреватель расположен в плоскости \mathbf{XY} . Нагреватель лежит на плоской поверхности, являющейся идеальным теплоизолятором. Толщина нагревателя стремится к нулю. Закономерность распределения теплового потока, создаваемого этим нагревателем, вдоль оси \mathbf{X} , показана на кривой 1 рис. 2г.

В одной и той же точке изотермической поверхности, при разных коэффициентах теплопередачи, в используемых теплоизоляционных материалах, уровни тепловых потоков будут разные [2, 3, 4].

Если использовать материалы с низкими значениями коэффициента

теплопередачи, то есть с лучшими теплоизоляционными свойствами, тепло, создаваемое электропроводящей нитью, будет хуже передаваться через эти материалы – кривая 3 рис.2г. И, наоборот, при использовании материалов с высокими значениями, коэффициента теплопередачи сопротивление теплоизоляции снижается и улучшается передача тепла – кривая 2 на рис. 2г.

Распределение температур вдоль оси X нагревателя показано на рис. 2д.

Теперь рассмотрим нагреватель, состоящий не из одной, а из нескольких (пяти) электропроводящих нитей, расположенных параллельно вдоль оси Y , через некоторое расстояние по оси X , в плоскости XY . Закономерность распределения тепловых потоков, создаваемых каждой электропроводящей нитью этого нагревателя, вдоль оси X , показана на рис. 2е. Так как вдоль оси X закономерности распределения тепловых потоков всех электропроводящих нитей имеют одинаковое направление векторов, то результирующий тепловой поток в каждой точке будет являться суммой векторов тепловых потоков пяти электропроводящих нитей (рис. 2ж).

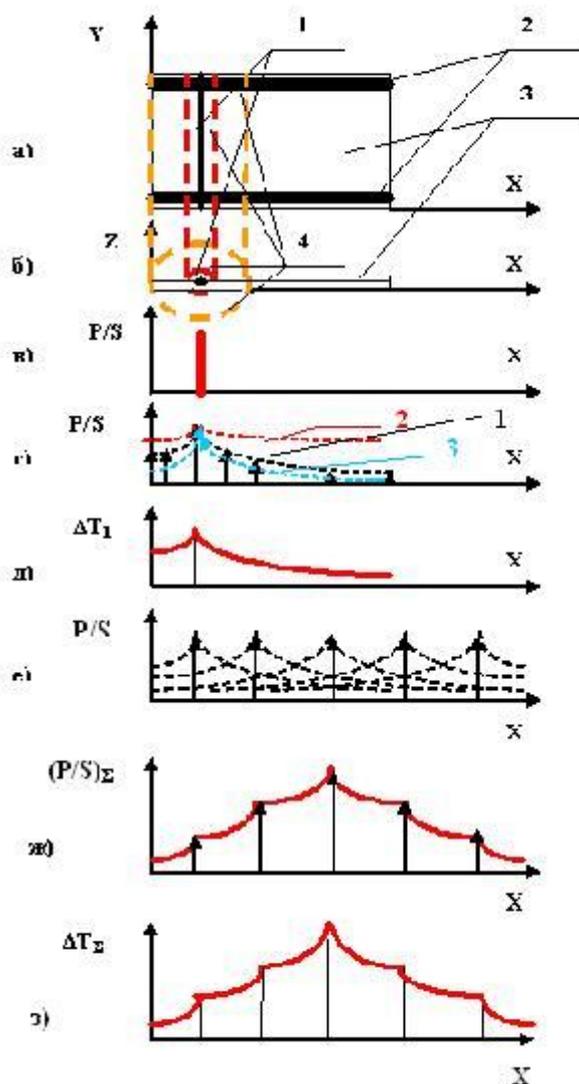


Рисунок 2. Тепловые процессы, происходящие вдоль оси X в тканом нагревателе, состоящем из одной электропроводящей нити:

- а) конструкция нагревателя (вид на плоскость **XY**) и прохождение изотермических поверхностей;
- б) конструкция нагревателя (вид на плоскость **ZX**) и прохождение изотермических поверхностей;
- в) представление пространственного импульса вдоль оси **X**;
- г) распределение вдоль оси **X** теплового потока, создаваемого системой тканый нагреватель из одной нити-внешняя среда;
- д) распределение температур по оси **X** на поверхности тканого нагревателя, состоящего из одной электропроводящей нити;
- е) распределение вдоль оси **X** тепловых потоков, создаваемых каждой нитью в системе тканый нагреватель из пяти нитей-внешняя среда;
- ж) суммарное распределение вдоль оси **X** тепловых потоков, создаваемых тканым нагревателем, состоящим из 5 нитей;
- з) суммарное распределение температур по оси **X**, обеспечиваемое тепловыми потоками, создаваемыми тканым нагревателем, состоящим из 5 нитей.

Распределение температур, происходящее в тканом нагревателе по оси **X**, описываются выражением [5, 6]

$$\Delta T_x = \left(\frac{d}{\lambda} + \frac{1}{\alpha}\right) \frac{P_1}{ld} \sum_1^n [|d - a_n| - |x - a_n| (\ln|d - a_n| - \ln|x - a_n| + 1)]$$

d – ширина нагревателя; l – длина нагревателя; a_n – координата по оси **X** расположения электропроводящей нити; λ – коэффициент теплопроводности электроизоляционных нитей; α – коэффициент теплоотдачи с поверхности тканого нагревателя; P_1 – мощность, потребляемая одной электропроводящей нитью; $\Delta T_x = T_x - T_{cp}$, T_x – текущее значение температуры по оси **X**, T_{cp} – температура окружающей среды.

Вдоль оси **Y** происходят тепловые процессы, показанные на рис. 3.

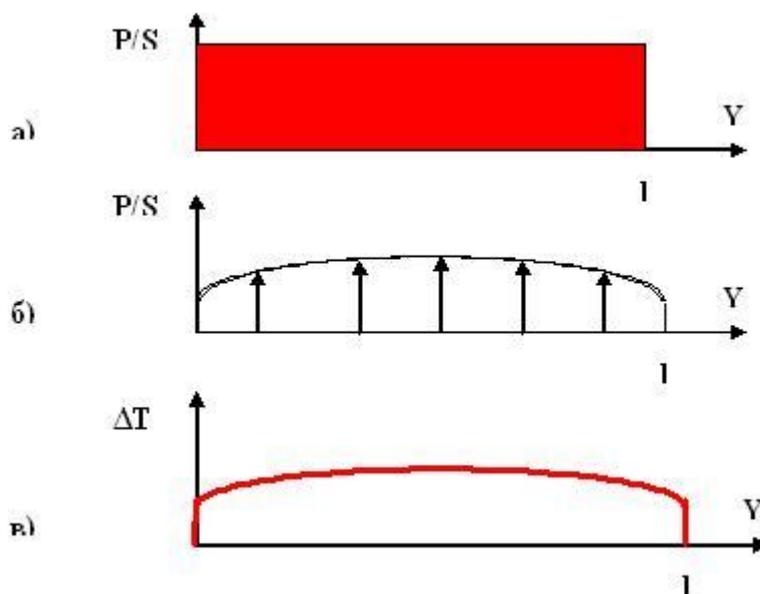


Рис. 3. Тепловые процессы, происходящие вдоль оси **Y** в тканом нагревателе,

состоящем из одной электропроводящей нити:

а) представление пространственного импульса вдоль оси **Y** при равномерном тепловыделении электронагревательной нити;

б) распределение вдоль оси **Y** теплового потока, создаваемого системой тканый нагреватель-внешняя среда;

в) распределение температур вдоль оси **Y** на поверхности тканого нагревателя.

Предположим, что тканый нагреватель состоит из электропроводящих нитей и электроизоляционных нитей, обладающих одинаковыми тепловыми свойствами.

Рассмотрим тепловые процессы, происходящие в пределах электропроводящей нити с равномерным тепловыделением. Если разбить электропроводящую нить на элементарные фрагменты, то они так же обеспечивают одинаковое тепловыделение.

Тепловой поток будет распространяться и за пределами электропроводящей нити, и форма потока за пределами нити будет повторять форму теплового потока, сформированного электропроводящей нитью.

Сложение в каждой точке оси **Y** проекций на направления параллельные оси **P/S** векторов тепловых потоков элементарных фрагментов электропроводящей нити приводит к получению следующей закономерности изменения температур

$$\Delta T_y = T_y - T_{cp} = \left(\frac{l}{\lambda} + \frac{1}{\alpha}\right) \frac{P_1}{ld} \left(\frac{y}{2l} - \frac{y^2}{2l^2}\right)$$

T_y – текущее значение температуры по оси **Y**.

Как уже говорилось, нагреватель лежит в плоскости **XY** и тепловой поток направлен вверх над нагревателем. Ось **P/S** перпендикулярна плоскости **XY**. Проекция на направления, параллельные оси **P/S**, векторов теплового потока, вдоль осей **X** и **Y**, принадлежащих плоскости **XY**, так же будут перпендикулярны плоскости **XY**.

В этом случае, результирующий тепловой отклик системы тканый нагреватель-внешняя среда на пространственный импульс можно описать с помощью суммы значений проекций векторов теплового потока на направления параллельные оси **P/S**, распространяющихся как вдоль оси **X**, так и оси **Y**, в каждой точке тканого нагревателя, расположенного в плоскости **XY**.

Суммарный тепловой поток обеспечивает следующее распределение температур на поверхности тканого нагревателя (рис. 4)

$$\Delta T_{xy} = \Delta T_x + \Delta T_y$$

Еще одним выводом является то, что для выравнивания температур на поверхности тканого нагревателя в пределах требуемых значений нужно или уменьшать расстояния между электропроводящими нитями, и/или использовать материалы с хорошей электропроводностью.

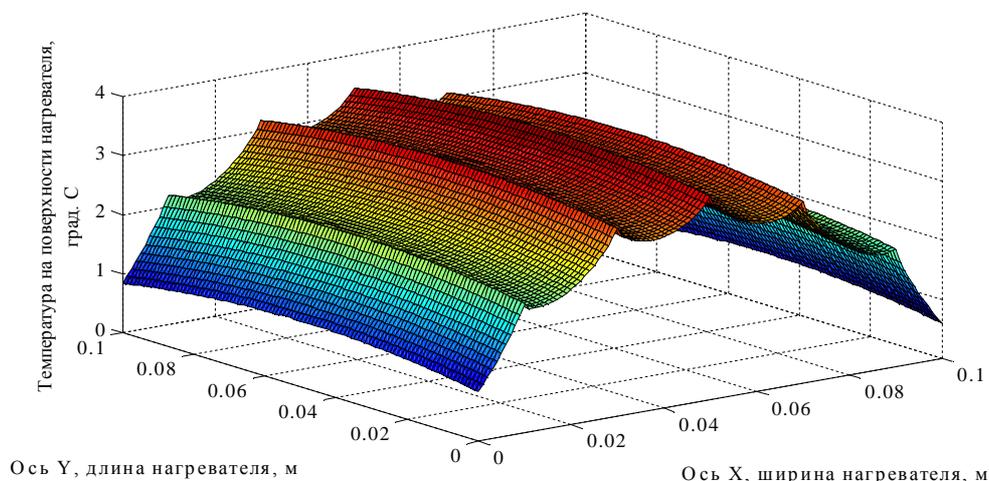


Рисунок 4. График распределения температуры на поверхности тканого нагревателя, состоящего из 5 электропроводящих нитей, равномерно расположенными по оси X.

Проведенные эксперименты в точности подтвердили теоретические расчеты (рис. 5). Некоторые расхождения от расчетных значений объясняются, неравномерностью сечения электропроводящих нитей по длине и погрешностями измерений.

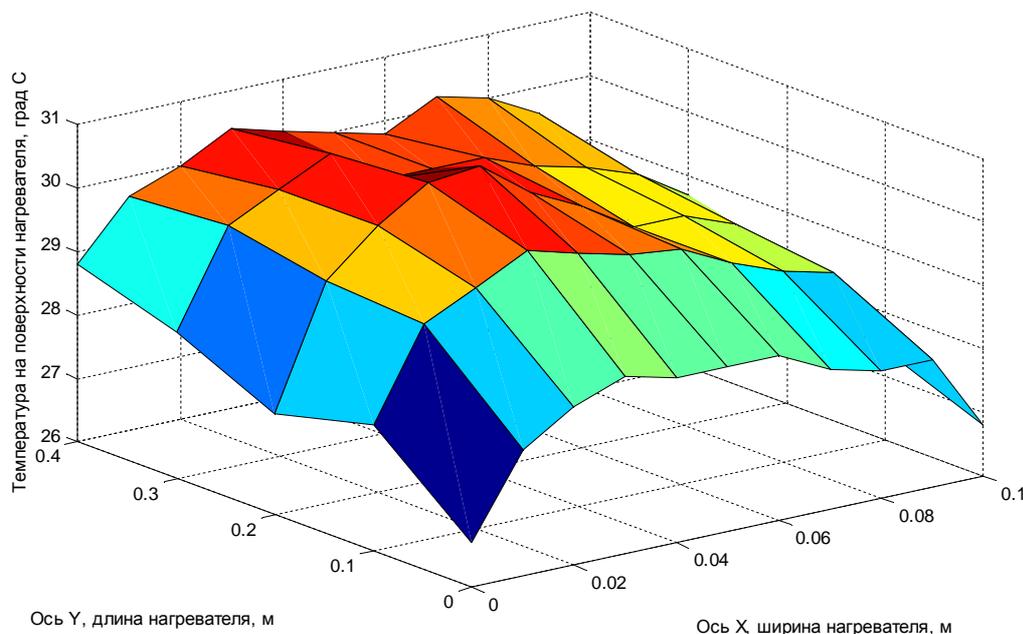


Рис. 5. Экспериментально полученные данные по распределению температуры на поверхности тканого нагревателя.

Таким образом, с помощью полученных векторных представлений о реакции внешней среды на воздействие нелинейного пространственного импульса были выведены математические соотношения, позволяющие рассчитывать температурные поля на поверхностях тканых нагревателей. Эти результаты можно использовать не

только при расчетах тканых нагревателей, а и других нагревателей, имеющих близкую структуру, например, водяных нагревателей «сухого типа» для водолазных костюмов и др. Возможно и решение обратной задачи – на основании требуемых конфигураций температурных полей на поверхностях тканых нагревателей возможно рассчитать их конструкцию.

Литература

1. 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, М.: Бюллетень № 6.
2. Жуковский В.С. Основы теории теплопередачи - Л.: «Энергия», 1969
3. Кирпичев М.В., Михеев М.А., Эйгенсон Л.С. «Теплопередача», Л.: Государственное энергетическое издательство, 1940
4. Мухачев Г.А., Щукин В.К. Термодинамика и теплопередача - М.: Высшая школа, 1991
5. Шульженко А.А. Методы расчета теплового поля тканых нагревательных элементов - М.: Информационные технологии в проектировании и производстве - 2007, № 3
6. Шульженко А.А. Расчет теплового поля тканых нагревательных элементов - М.: Проблемы машиностроения и надежности машин, 2008, № 2

Поступила: 05.05.09.