

УДК 621.036:681.20

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПЫТОВ Ф.ЛЕРУ

© Александр Анатольевич Шулженко, Михаил Борисович Модестов

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

aa_shulzhenko.01@mail.ru

Аннотация. В данной работе проведено математическое моделирование тепловых процессов, происходивших в системе, описанной при проведении опытов французского ученого Ф.Леру в 1867г. Результаты, полученные с помощью моделирования на основе оригинальной программы, полностью совпадают с результатами хорошо известных натурных экспериментов. Данный материал представляет интерес для специалистов-разработчиков различных нагревательных устройств, а также студентов, обучающихся по профильным специальностям.

Ключевые слова: эффект Томсона, тепловые поля, внешние тепловые поля, внутренние тепловые поля.

EXPERIMENTS OF F.LERU

© A.A.Shul'zhenko, M.B.Modestov

IMASH RAN, Moscow, Russia

aa_shulzhenko.01@mail.ru

Annotation. In this paper, the mathematical modeling of thermal processes occurring in the system described in the French scientist's experiments in 1867 was carried out. The results obtained with the help of simulation based on the original program fully coincided with the results obtained in the course of experiments. This material is of interest to specialists-developers of various heating devices, as well as students enrolled in related specialties.

Keywords: Thomson effect, thermal field, an external thermal field, thermal field internal.

Все большее применение в различных технических системах находят тканые электронагреватели. Во многих случаях в этих нагревателях используются в качестве тепловыделяющих элементов углеродные (графитовые) нити. Углеродные нити обладают свойствами, которые отличают их от металлов. Одним из них является то, что коэффициент Томсона на четыре порядка больше, чем у металлов, как следствие – можно предположить, что эффект Томсона вносит более существенный вклад в происходящие тепловые процессы. Поэтому очень важно знать, как влияет эффект Томсона на тепловой процесс в углеродных нитях.

Открытие У.Томсоном, эффекта, являющегося одним из проявлений термоэлектричества, сразу привлекло внимание физиков-экспериментаторов. Связано это с тем, что большинство выражений, определяющих термоэлектрические соотношения, и эффект Томсона в том числе, получены феноменологическим путем, и требовали экспериментального доказательства. Одним из таких исследователей был французский ученый Ф.Леру.

Согласно [1], для доказательства эффекта Томсона в 1867г. он провел эксперимент, в котором использовал схему, показанную на (рис.1).

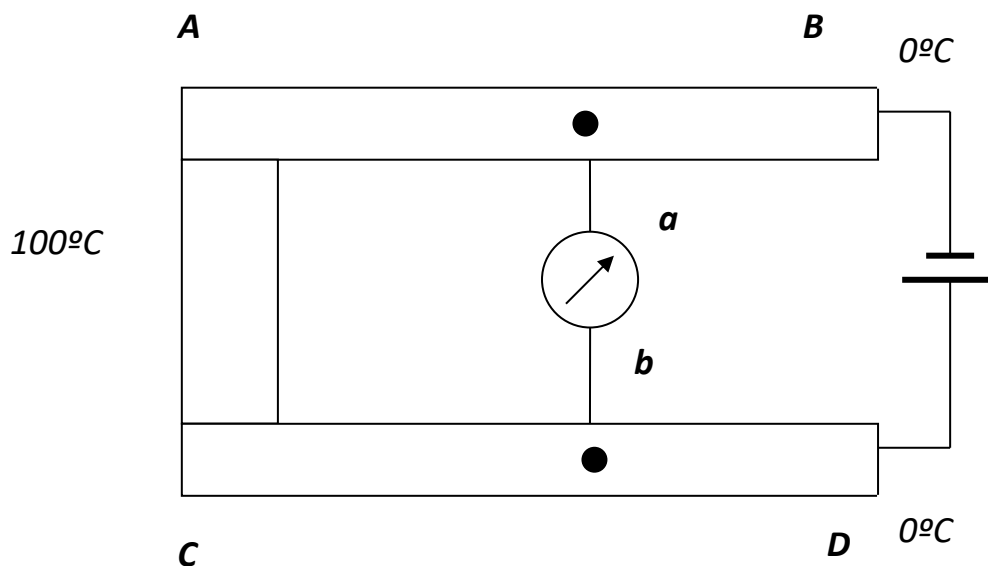


Рис. 1. Общая схема опытов Ф.Леру по доказательству эффекта У.Томсона.

В этом опыте он нагревал середину стержня AC в точке E до температуры $100^{\circ}C$, а концы стержней B и D - до температуры $0^{\circ}C$.

Для упрощения, будем считать, что стержни, используемые в эксперименте, сделаны из одного материала.

В качестве измерителей температуры Ф.Леру, одним из первых, использовал термопары, что позволило ему повысить точность измерений.

Будем считать, что стержни AB , CD имели одинаковую длину, и все три стержня обладали одинаковой площадью сечения.

Так как толщина стержней много меньше их длин, то можно считать, что в поперечном сечении температура не изменялась.

Для большей наглядности, можно представить систему стержней, показанную на рис.1, вытянутой в длину (рис. 2).

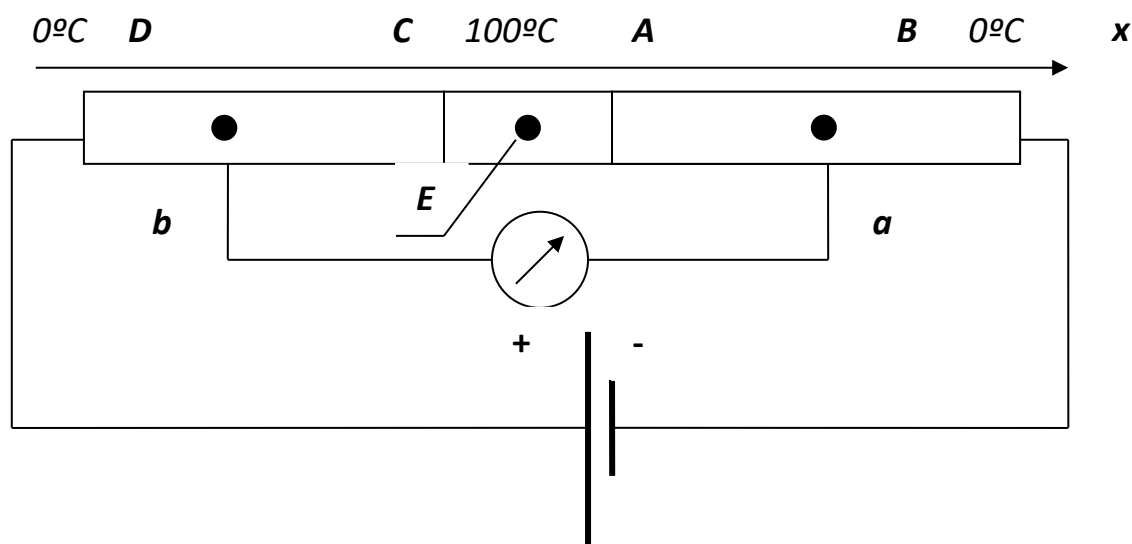


Рис. 2. Преобразованная схема опытов Ф.Леру, проведенных для доказательства эффекта У.Томсона.

Когда электрическое поле не воздействовало на проводники в рамках системы, показанной на рис.2, температуры в точках *a* и *b*, измеряемые с помощью термопар, были одинаковыми. Температурное поле в стержнях, неподключенных к источнику электропитания, можно описать выражением при общей относительной длине стержней $AB+AC+CD=1$

$$\left\{ \begin{array}{l} T = \exp(k'k''x) \quad \text{при } A \leq x \leq B \\ T = \exp(\text{abs}(k'(k''(x-(AB+AC))-1))) \quad \text{при } C \leq x \leq D \\ T(x) = T(AC) = 100^\circ\text{C} \quad \text{при } A \leq x \leq C \\ T(x) = T(0) = T(1) = 0^\circ\text{C} \\ T_{cp} = T_l \end{array} \right. \quad (1)$$

$T(x)$ – текущее значение температуры, k' , k'' – поправочные коэффициенты; x – текущее значение координаты.

Распределение температур в системе стержней, когда они не подключены к источнику электропитания, показано на рис.3, кривая 1. В силу симметрии схемы нагрева и охлаждения стержней в точках *a* и *b* температуры будут одинаковы.

Теперь рассмотрим, как формируется тепловой сигнал при воздействии не только теплового, а и электрического полей. То есть, в общем случае, присутствует одновременно и источник внутреннего тепловыделения, и источник внешнего теплового воздействия, и перемещение электронов под воздействием электрического поля.

Внешняя температура в стержнях в точке *E* также поддерживалась на уровне 100°C , а на концах стержней, в точках *B* и *D* - 0°C (рис.2).

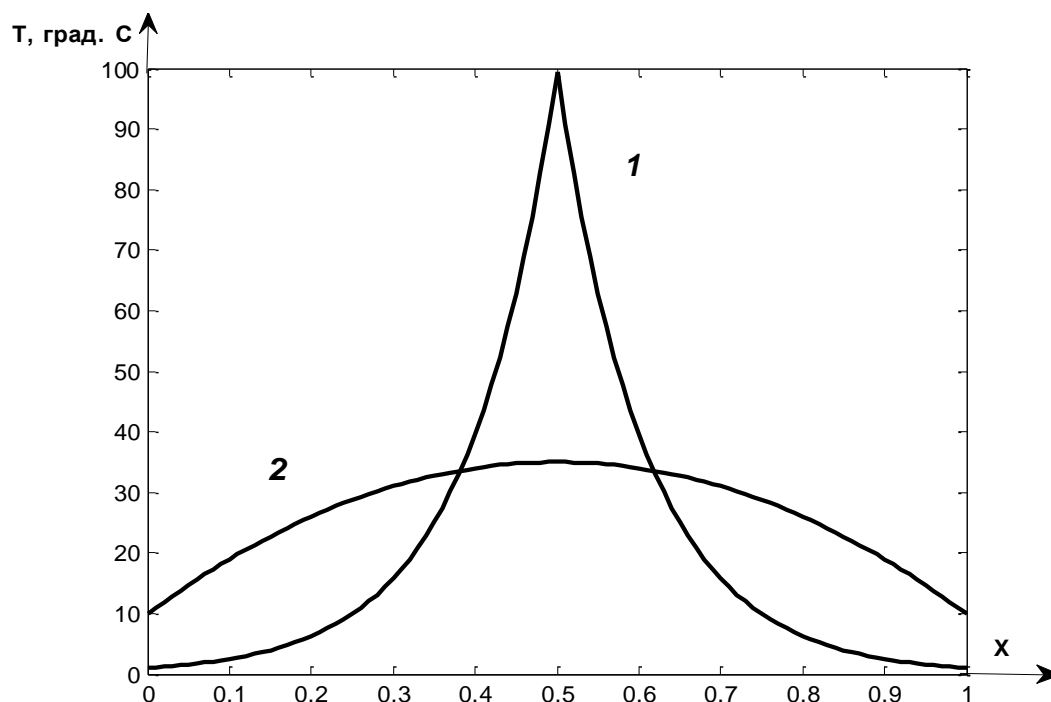


Рис.3. Тепловые поля, получаемые: 1 - при отключенном электропитании за счет нагрева и охлаждения частей стержня; 2 – тепловыделяющим элементом только при прохождении электрического тока.

Подключая электропитание к системе стержней, получаем тепловое поле, которое образуется внутренним источником тепла, за счет прохождения электрического тока без учета эффекта

Томсона. Этот тепловой процесс можно описать с помощью одномерного уравнения Фурье для стационарных процессов [2]

$$\lambda \frac{\partial^2 \Delta T}{\partial x'^2} + q_v = 0 \quad (2)$$

λ – коэффициент теплопроводности стержня; $\Delta T = T - T_{cp}$, T – текущее значение температуры, T_{cp} – температура окружающей среды, $x' = \frac{x}{l}$ – текущее относительное значение

координаты; $q_v = \frac{P}{v} = \frac{P}{S_{сеч} \cdot l}$ – объемное тепловыделение; $S_{сеч}$ – площадь сечения стержней; l – суммарная длина стержней; P – мощность источника электропитания; v – суммарный объем стержней.

Аналитическим решением этого уравнения, согласно [3], является выражение

$$T_{нх} = T_{cp} + \frac{P}{2 \cdot \alpha_{ст} \cdot S_{сеч}} + \frac{P \cdot l}{2 \cdot \lambda_{ст} \cdot S_{сеч}} (x' - x'^2) \quad (3)$$

α – коэффициент теплоотдачи во внешнюю среду.

На рис.3 кривая 2 показывает температурное поле, согласно (3), образованное за счет пропускания электрического тока. То есть, данное тепловое поле тоже обладает симметричным распределением температур.

Таким образом, при проведении опыта Ф.Леру одновременно в системе стержней действуют четыре тепловых поля:

- тепловое поле, созданное с помощью внешнего нагрева стержней в точке E , $T(x) = T_{внеш} (l/2) = 100^\circ C$;
- тепловое поле, образованное за счет пропускания электрического тока, то есть внутренних источников тепла;
- тепловое поле, поддерживающее температуру $0^\circ C$ на концах стержней в точках C и D ;
- температура внешней среды.

Будем считать, что температура внешней среды постоянна и равна T_{cp} .

При прохождении электрического тока в условиях присутствия всех тепловых полей проявляется эффект Томсона, который описывается выражением

$$\frac{dP}{dx'} = \tau \cdot I \cdot \frac{dT}{dx'} \quad (4)$$

τ – коэффициент Томсона; I – значение электрического тока, протекающего по стержням.

Согласно [1, 3], при совпадении направленности теплового и электрического полей происходит поглощение энергии, а при противоположной направленности теплового и электрического полей выделение энергии. В результате, суммарное тепловое поле перестает быть симметричным и происходит его смещение.

В отличие от (1), при постановке задачи Каши добавляется выражение, описывающее тепловое поле, образованное за счет нагрева проходящим электрическим током: одномерное уравнение Фурье для стационарных процессов (2), и уравнением Томсона (4). В общем, задачу Каши можно записать

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda \frac{\partial^2 \Delta T}{\partial x'^2} + q_v = 0 \\ \frac{dP}{dx'} = \tau \cdot I \cdot \frac{dT}{dx'} \\ T = \exp(k'k''x') \quad \text{при } 0 \leq x' \leq 0.5 \\ T = \exp(\text{abs}(k'(k''(x-0.5)-1))) \quad \text{при } 0.5 \leq x' \leq 1 \\ T(x) = T(0) = T(1) = 0^\circ\text{C} \\ T(x) = T(1/2) = 100^\circ\text{C} \end{array} \right. \quad (5)$$

Используя метод непосредственной аппроксимации, формируем программу решения системы уравнений (5) в среде MATLAB.

Результат решения показан на рис.4 сплошной линией.

Как хорошо видно из этого решения, температуры T_a и T_b в точках стержней a и b , к которым были подключены термопары и показанные на рис.4, будут различны.

При смене направления электрического поля (на рис.4 показано пунктирной линией) направленность теплового поля в точках измерения будет меняться на противоположную.

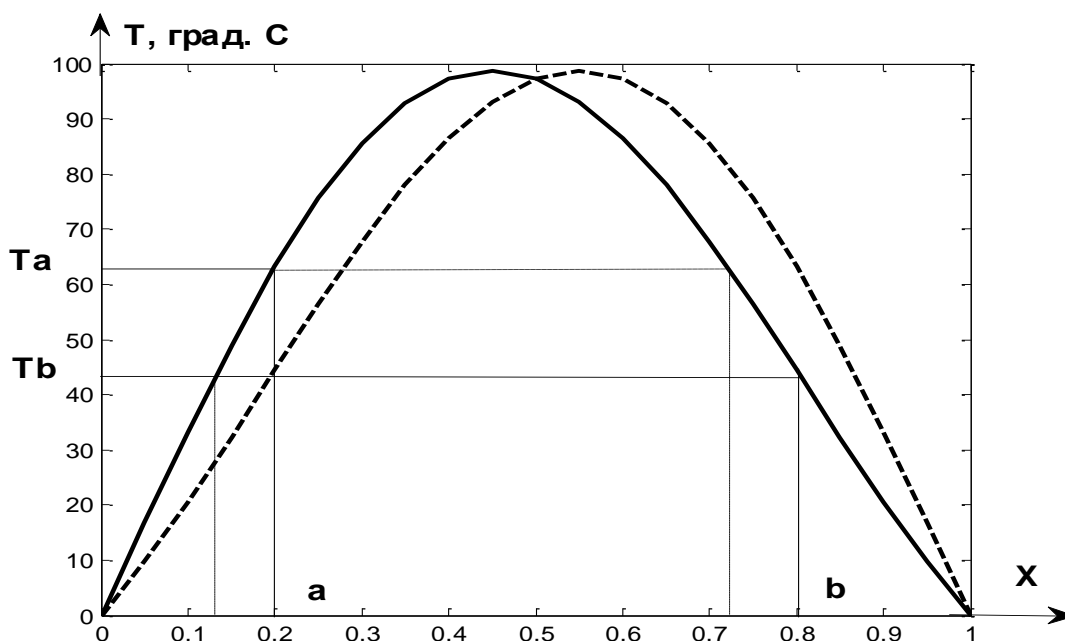


Рис.4. Тепловые поля, распределенные вдоль проводников при проведении опытов Ф.Леру (при одновременном воздействии внутренних и внешних источников тепла) при разных направлениях электрического поля (сплошная и пунктирная линии).

Таким образом, полученный результат, позволяет наглядно продемонстрировать тепловые процессы, происходящие не только в двух точках, как это было сделано при проведении опытов, а и во всей системе стержней, и совпадает с результатом эксперимента, проведенного Ф.Леру, и показавшего, что при прохождении по стержням электрического тока, при одновременном воздействии симметричного теплового поля, образуется суммарное несимметричное тепловое поле (рис.4).

Проведенное моделирование позволяет глубже разобраться в природе возникновения эффекта Томсона, и представляет интерес для специалистов, занимающихся

проектированием нагревателей, особенно для биологических объектов, и студентов, профильных специальностей.

Список литературы

1. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Учебное пособие: Для вузов. Электричество.Т.3. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. - 656 с.
2. Шульженко А.А., Модестов М.Б. Влияние эффекта Томсона на распределение температуры в тепловыделяющих элементах – углеродных нитях//Вестник научно-технического развития. – 2012. - № 6. - С. 33-40.
3. Шульженко А.А., Модестов М.Б. Метод расчета тепловыделяющих элементов на основе углеродных (графитовых) нитей// Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2015. - № 4. - С. 103-110.

Дата поступления: 19 октября 2018 г.