

## О влиянии эффекта Томсона на импульсный нагрев сильноточных электрических контактов

© А.Г. Меркушев, М.А. Павлейно, О.М. Павлейно, В.А. Павлов

Санкт-Петербургский государственный университет,  
Научно-образовательный центр „Электрофизика“ физического факультета,  
198504 Санкт-Петербург, Петродворец, Россия  
e-mail: pavleyno@mail.ru

(Поступило в Редакцию 6 марта 2014 г.)

Импульсный нагрев сильноточных электрических контактов характеризуется наличием значительных градиентов температуры в контактной области, что приводит к проявлению эффекта Томсона — возникновению термоэлектрических токов. Сделана количественная оценка роли данного эффекта на фоне традиционно рассматриваемого выделения джоулева тепла. Проведено численное моделирование импульсного нагрева электрических контактов в пакете Comsol, на основе которого показано, что термоэлектрические токи вносят крайне малый вклад в нагрев в случае, если контакты выполнены из меди.

Электрические контакты входят в состав практически любой цепи — от устройств микроэлектроники до токоведущих систем высоковольтных электрических аппаратов. Рабочие токи при этом могут составлять от микроампер до сотен килоампер. Следствием этого является чрезвычайно широкое разнообразие типов контактных устройств. В каждом устройстве происходит механическое контактирование двух (или более) физически различных проводников, которое обеспечивает возможность прохождения сквозь них электрического тока. Особенность прохождения тока через электрические контакты заключается в том, что проводящей является не вся видимая поверхность соприкосновения проводников, а некоторая совокупность так называемых контактных пятен, составляющих лишь незначительную ее часть [1]. Это приводит к тому, что плотность тока, а следовательно, и плотность мощности джоулева нагрева в окрестности контактных пятен может быть на несколько порядков больше, чем вдали от них.

Такое неравномерное распределение мощности вызывает неравномерный нагрев. В окрестности контактных пятен наблюдаются значительные градиенты температуры. Особенно сильно это проявляется при импульсном нагреве. Соответствующие количественные оценки для сильноточных контактов приведены в [2].

Хорошо известно, что в неравномерно нагретых проводниках, помимо тока проводимости, возбуждаются термоэлектрические (ТЭ) токи [3], возмущающие распределение мощности (эффект Томсона). Возникает вопрос о том, насколько сильное влияние они оказывают на нагрев контактов, в частности сильноточных. К настоящему времени в научной и технической литературе единого мнения на этот счет не сложилось. Более того, можно встретить диаметрально противоположные утверждения, касающиеся необходимости учета эффекта Томсона при расчете нагрева сильноточных контактов [4,5]. В настоящей работе мы сделаем количественные оценки, позволяющие проанализировать вклад токов различной природы в импульсный нагрев контактов.

В неравномерно нагретом металле градиент температуры  $\nabla T$  наряду с электрическим полем способен создавать электрический ток

$$j = \sigma(E + S\nabla T), \quad E = -\nabla\varphi, \quad (1)$$

где  $j$  — плотность тока,  $\sigma = \sigma(T)$  — проводимость,  $S = S(T)$  — коэффициент Зеебека,  $\varphi$  и  $E$  — потенциал и напряженность электрического поля.

Наличие члена с градиентом температуры в формуле (1) в соответствии с [3] приводит к следующему выражению для плотности потока энергии  $q$ :

$$q = (\varphi - ST)j - \kappa\nabla T, \quad (2)$$

где  $\kappa$  — коэффициент теплопроводности.

Рассмотрим объемную плотность мощности  $w$ , выделяемой в некоторой точке проводника:

$$w = -(\nabla, q) = (\nabla, \kappa\nabla T) + \frac{1}{\sigma} j^2 + \mu(\nabla T, j). \quad (3)$$

Здесь  $\mu = T \frac{dS}{dT}$  — коэффициент Томсона. В (3) было учтено, что  $(\nabla, j) = 0$ . Первый член в правой части (3) описывает теплопроводность, второй — джоулево тепловыделение, а третий член характеризует эффект Томсона.

С учетом сделанных выше замечаний система, описывающая нагрев металлического проводника протекающим током, принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} (\nabla, j) &= 0, \quad j = -\sigma(\nabla\varphi - S\nabla T), \\ \rho C \frac{\partial T}{\partial t} &= (\nabla, \kappa\nabla T) + \frac{1}{\sigma} j^2 + \mu(\nabla T, j). \end{aligned} \quad (4)$$

В [1] приведены экспериментальные данные о зависимости от температуры коэффициента Томсона для некоторых металлов в широком диапазоне температур (рис. 1, сплошные линии).

Стоит заметить, что коэффициент Томсона может быть как положительным, так и отрицательным для

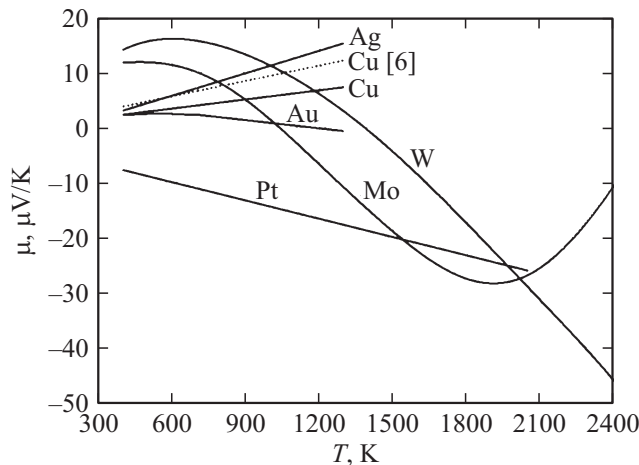


Рис. 1. Зависимость коэффициента Томсона от температуры для металлов.

разных металлов, и даже изменять знак при изменении температуры для одного и того же материала. Для некоторых металлов, таких как Ag, Cu, Au, Pt, зависимости практически линейные, для других (Mo, W) зависимости оказываются более сложными, нелинейными и немонотонными.

В работе [6] получено приближенное аналитическое выражение для температурной зависимости коэффициента Зеебека чистых металлов

$$S(T) \approx \alpha T, \quad \alpha = -\frac{\pi^2 k^2}{3eE_{F0}} \xi, \quad (5)$$

где  $k$  — постоянная Больцмана,  $e$  — заряд электрона,  $E_{F0}$  — уровень Ферми металла при абсолютном нуле,  $\xi$  — численный поправочный коэффициент, учитывающий рассеивание электронов в металле. Пропорциональный характер зависимости  $S$  от  $T$  в (5) приводит к тому, что коэффициент Томсона  $\mu$  совпадает с  $S$ . Отметим, что в общем случае, когда  $S$  зависит от  $T$  иным образом, это не так.

Коэффициент  $\xi$  имеет различные значения для разных металлов. Для меди  $\xi = -1.79$  и  $S(T) \approx 9.29 \cdot 10^{-9} T$ .

Зависимость  $S(T)$  для меди, полученная из (5), приведена на рис. 1 пунктирной линией. Она дает завышенные по сравнению с экспериментальными данными значения коэффициента Томсона. Так как нашей задачей является оценка возможного влияния термоэлектрических токов на нагрев контактов, то мы будем использовать для расчетов зависимость (5), дающую большие значения коэффициента Томсона при любом значении температуры.

Опираясь на систему уравнений (4), можно провести качественную оценку роли эффекта Томсона, сопоставляя величины с одинаковой размерностью. В выражении для плотности тока в (4) есть два „конкурирующих“ члена:  $\nabla\varphi$  и  $S\nabla T$ . Первый связан с током проводимости, второй — с ТЭ-током. Составим безразмерную величину  $\eta_1$ , показывающую, какую долю ТЭ-ток составляет от

тока проводимости:

$$\eta_1 = \frac{|S\nabla T|}{|\nabla\varphi|}. \quad (6)$$

В тех областях, где  $\eta_1 \ll 1$ , ТЭ-токи слабо выражены на фоне токов проводимости.

Возмущение, создаваемое при учете эффекта Томсона в уравнении теплопроводности в системе (4), можно оценить на основе соотношения

$$\frac{1}{\sigma} j^2 + \mu(\nabla T, j) = \sigma [(\nabla\varphi)^2 - (2S + \mu)(\nabla T, \nabla\varphi) + S(S + \mu)(\nabla T)^2]. \quad (7)$$

Будем считать, что токоведущая система выполнена из материала, для которого справедлива линейная модель (5) температурной зависимости для  $S$ . В этом случае, как было отмечено выше,  $\mu = S$ . Поэтому (7) примет вид

$$\frac{1}{\sigma} j^2 + \mu(\nabla T, j) = \sigma [(\nabla\varphi)^2 - 3S(\nabla T, \nabla\varphi) + 2S^2(\nabla T)^2]. \quad (8)$$

Теперь составим безразмерную величину  $\eta_2$ , которая показывает, какую долю от „классического“ джоулева тепловыделения составляют члены, связанные с эффектом Томсона:

$$\eta_2 = \frac{|2S^2(\nabla T)^2 - 3S(\nabla T, \nabla\varphi)|}{|(\nabla\varphi)^2|}. \quad (9)$$

Можно указать два асимптотических представления для  $\eta_2$ :

$$\eta_2 \underset{\eta_1 \ll 1}{=} O(\eta_1), \quad \eta_2 \underset{\eta_1 \gg 1}{=} O(\eta_1^2). \quad (10)$$

Таким образом, при достаточно слабых ТЭ-токах возмущение мощности эффектом Томсона пропорционально величине термотока. Когда термоток превосходит ток

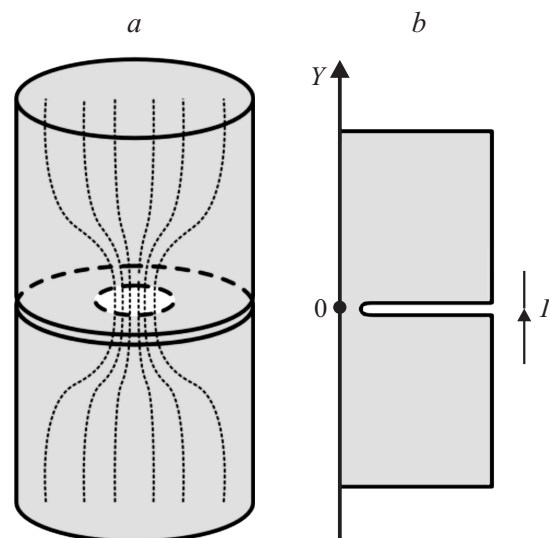
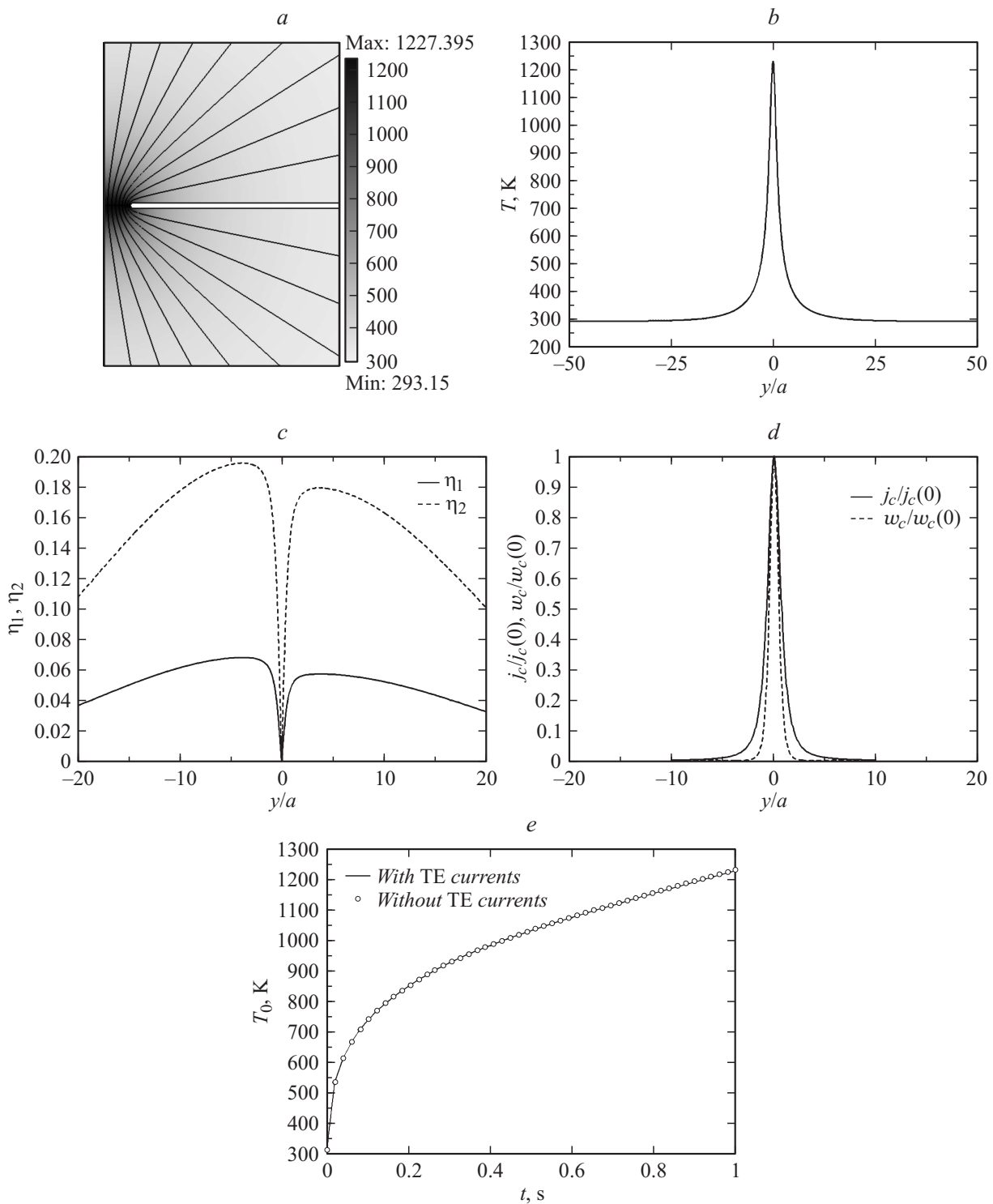


Рис. 2. Схематичное изображение контактной системы цилиндр–цилиндр (а) и ее осевое сечение (б).



**Рис. 3.** Распределение линий тока и температуры в окрестности контактного пятна (a). Распределение температуры вдоль оси Y (b). Распределение коэффициентов  $\eta_1$  и  $\eta_2$  в контактной окрестности (c). Распределение плотности тока проводимости и плотности джоулева тепловыделения в контактной окрестности (d). Температура в центре контактного пятна с учетом и без учета эффекта Томсона (e).

проводимости, то возмущение мощности оказывается квадратичным. В результате грубая оценка роли эффекта Томсона в данной токоведущей системе сводится к выяснению, является ли безразмерная величина  $\eta_1$  малой, или нет.

Приступим к количественной оценке роли термоэлектрических токов при импульсном нагреве электрических контактов. Проведем численный расчет в пакете Comsol нагрева двух медных цилиндрических проводников, соединенных одним контактным пятном круглой формы,

расположенным на оси симметрии. Для определенности выберем радиус контактного пятна  $a = 1 \text{ mm}$ , а размеры самих электродов — много больше размеров пятна. Такое значение размеров контактного пятна характерно для медных сильноточных контактов, когда сила контактного нажатия составляет сотни Ньютонов. На рис. 2 схематично представлены расчетная модель и линии тока, а также ее сечение.

Рассмотрим нагрев данной системы постоянным током  $I$ , протекающим в течение  $1 \text{ s}$ . Величина тока выбрана такой, чтобы обеспечить нагрев контактного пятна до температуры, близкой к температуре плавления меди.

В процессе моделирования численно решается система уравнений (4). Учитывая малую длительность нагрева, расчеты можно проводить, пренебрегая теплообменом между контактной системой и окружающим воздухом, задав адиабатические условия для тепловых полей на внешней границе системы.

На рис. 3, *a* представлено распределение линий тока и температуры в окрестности контакта спустя  $1 \text{ s}$  после включения тока. Наибольший нагрев наблюдается в ближайшей окрестности контактного пятна, что обусловлено сгущением линий тока. Распределение температуры вдоль оси симметрии в окрестности контактного пятна приведено на рис. 3, *b*. Значение температуры максимально на контактной поверхности и быстро падает с удалением от нее. Так, на расстоянии, равном  $5a$ , температура уменьшается на  $800^\circ$ . Таким образом, в окрестности контактного пятна наблюдаются большие градиенты температуры, что, в свою очередь, приводит к возникновению ТЭ-токов.

На рис. 3, *c* представлены распределения вдоль оси симметрии контактов величин  $\eta_1$  и  $\eta_2$ , которые, как было сказано, позволяют оценить вклад ТЭ-токов и связанной с их протеканием мощности нагрева на фоне токов проводимости и мощности джоулева тепловыделения. В центре контактного пятна, где градиент температуры равен нулю, протекает только ток проводимости, поэтому  $\eta_1(0) = \eta_2(0) = 0$ . При отходе от поверхности пятна вглубь контактов эти величины начинают возрастать, достигая максимальных значений на расстоянии приблизительно  $3-4a$ . В этой области относительный вклад ТЭ-токов оказывается заметным.

Для того чтобы оценить влияние эффекта Томсона на нагрев контактов, следует рассмотреть также распределение тока проводимости  $j_c$  и плотности мощности джоулева тепловыделения  $w_c$  (рис. 3, *d*). Сравнивая зависимости, приведенные на рис. 3, *c*, *d*, можно заключить, что в тех областях, где величины  $\eta_1$  и  $\eta_2$  заметно отличны от нуля, ток проводимости и соответствующая ему мощность оказываются пренебрежимо малыми по сравнению с их значениями в непосредственной окрестности контактного пятна. Так, в области максимума  $\eta_2$  мощность джоулевых потерь меньше своего значения в центре пятна приблизительно в 700 раз.

Это позволяет предположить, что термоэлектрические токи практически не оказывают влияния на им-

пульсный нагрев медных контактов. Справедливость этого предположения подтверждается сравнением зависимости температуры в центре контактного пятна  $T_0$  от времени, рассчитанной в двух приближениях: с учетом ТЭ-токов и без них, когда нагрев осуществляется только токами проводимости (рис. 3, *c*).

Итак, в работе проанализировано влияние ТЭ-токов на импульсный нагрев электрических контактов. Показано, что для медных сильноточных контактов их влияние на нагрев в широком диапазоне температур пренебрежимо мало. Это позволяет решать соответствующие задачи в упрощенной постановке, учитывая только токи проводимости, что существенно упрощает проведение расчетов.

## Список литературы

- [1] Хольм Р. Электрические контакты. М.: Изд-во ин. лит., 1961. 464 с.
- [2] Chalyi A.M., Dmitriev V.A., Pavleino M.A., Pavleino O.M. // ISSN 1068-3755, Surface Engin. and Appl. Electrochem. 2013. Vol. 49. N 5. P. 433–439.
- [3] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика, М.: Наука, 1982. Т. 8. С. 143–148.
- [4] Самойлов В.В. Аналитическое и численное моделирование процессов электро- и теплопереноса в многоточечных электрических контактах: Дис. канд. физ.-мат. наук. Ульяновск: УГУ, 2004. 149 с.
- [5] Ким Е.И., Омельченко В.Т., Харин С.Н. Математические модели тепловых процессов в электрических контактах, Алма-Ата: Наука, 1977. 236 с.
- [6] Kasap S. // Department of Electr. Engin., University of Saskatchewan, Canada, 2001. 11 p.