

УДК 536(075.8)

ЗАВИСИМОСТЬ МЕЖДУ СИЛОЙ И ТЕПЛОВЫМ ПОТОКОМ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ С ИМПУЛЬСНЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ НАГРЕВОМ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ПРОВОДНИКА

© 2020 г. А. В. Костановский¹, *, М. Е. Костановская¹

¹ФГБУН Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

*E-mail: Kostanovskiy@gmail.com

Поступило в редакцию 19.03.2020 г.

После доработки 05.08.2020 г.

Принято к публикации 11.09.2020 г.

На примере экспериментальных данных, полученных при импульсном электрическом нагреве проволоки из ниобия, впервые показано, что при скорости изменения температуры $dT/d\tau \approx 5 \times 10^7$ К/с выполняется линейная зависимость между потоком и силой — основополагающее предположение линейного режима в термодинамике.

DOI: 10.31857/S0040364420050130

ВВЕДЕНИЕ

Линейный режим в термодинамике активно изучается с начала прошлого века и по настоящее время, так как стационарные и нестационарные задачи, в которых имеет место градиент температуры $\text{grad}(T)$, или нестационарные задачи в отсутствие $\text{grad}(T)$ все чаще реализуются в современных технологических процессах. В теории линейный режим определен неоднозначно: предполагается справедливой гипотеза о локальном термодинамическом равновесии; должны выполняться соотношения взаимности Онсагера; локальное производство энтропии $p = \sum_k F_k J_k$ линейно зависит от сил F_k и потоков J_k ; выполняются линейные феноменологические законы, в которых потоки линейно зависят от соответствующих сил $J_k = \sum_j L_{kj} F_j$ (L_{kj} — феноменологические коэффициенты) [1, 2]. Экспериментальное подтверждение теоретических закономерностей линейного режима имеет фундаментальное значение. Ранее в работе [3] было показано, что линейность между потоком и силой в эксперименте электростатической левитации, в котором реализуется самопроизвольное охлаждение сферического образца молибдена в твердой фазе (максимальная скорость изменения температуры во времени $dT/d\tau \approx 2 \times 10^3$ К/с), строго не выполняется.

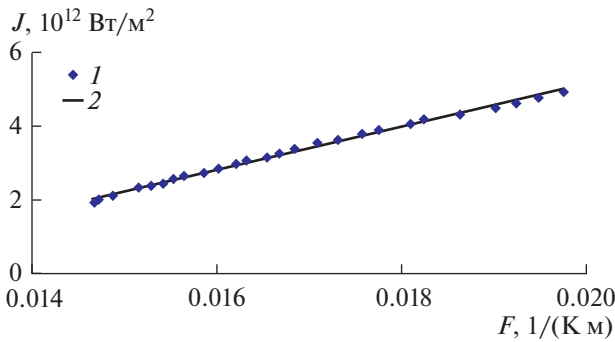
Цель данной работы состоит в проверке выполнения линейной зависимости между потоком и силой при более высоких значениях $dT/d\tau$. Для решения поставленной задачи выбран эксперимент с импульсным электрическим нагревом об-

разца ниобия, в котором максимальная скорость изменения температуры составляет $dT/d\tau \approx 5 \times 10^7$ К/с [4]. Работа [4] долгое время являлась единственным исследованием, в котором одновременно в микросекундном диапазоне были приведены временные зависимости подводимой электрической мощности $IU = f(\tau)$ (где I — сила тока, U — падение напряжения между зондами) и яркостной температуры образца $T_{\text{ярк}}(\tau)$ (использовался многоканальный шлейфный осциллограф) при импульсном электрическом нагреве проводника.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Образец из ниобия чистотой 99.9% представлял собой проволочку радиусом $r = 0.8$ мм и общей длиной 63.5 мм. Падение напряжения U определялось на центральном участке образца длиной $L = 25$ мм. Яркостная температура $T_{\text{ярк}}(\tau)$ поверхности образца измерялась пирометром на длине волны 0.65 мкм, диаметр пятна визирования составлял 0.5 мм, быстродействие пирометра — 1 мкс. С использованием закона Вина, данных о температурной зависимости (линейная функция) спектральной нормальной излучательной способности ниобия [5] и $T_{\text{ярк}}(\tau)$ найдено изменение действительной температуры от времени $T(\tau)$. Диапазон изменения температуры начинался с 2000 К и достигал температуры плавления Nb $T_{\text{melt}} = 2750$ К.

В [6] численно смоделированы условия проведения эксперимента [4], которые показали, что за время нагрева от 2000 до 2750 К $\Delta\tau = (56.6-42.6) \times 10^{-6}$ с температура части образца, находящаяся



Зависимость между потоком и силой в эксперименте с импульсным электрическим нагревом проволоочки из ниобия: 1 – результат обработки экспериментальных данных [4] по (2) и (3), 2 – линейная интерполяция полученных данных.

между зондами, сохраняла равномерное распределение по радиусу и по длине в каждый момент времени. Это позволяет использовать понятие локальной плотности изменения энтропии ds , рассчитываемой на единицу объема dS/V , где dS – изменение энтропии, V – объем части образца, заключенного между зондами. Напомним, что переход к локальным значениям следует из предположения о выполнении гипотезы о локальном термодинамическом равновесии.

Ранее в [7] была показана правомерность отнесения экспериментальных условий к линейному режиму в термодинамике при выполнении критерия Максвелла–Каттанео–Вернотте

$$\tau_p(dq(\tau)/d\tau)/q(\tau) \ll 1. \tag{1}$$

Для конкретного момента времени работы [4] было рассчитано отношение произведения скорости изменения теплового потока $dq(\tau)/d\tau$ и времени релаксации теплового потока τ_p к величине плотности теплового потока $q(\tau) \approx \epsilon_{th}\sigma(T(\tau)^4 - 300^4)$, где ϵ_{th} – полусферическая интегральная излучательная способность, σ – константа Стефана–Больцмана, время $\tau_p = 10^{-12} - 10^{-8}$ с для металлов известно с точностью до нескольких порядков.

Оценка, выполненная по неравенству (1), показывает, что условия эксперимента [4] отвечают линейному режиму термодинамики.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В процессе импульсного нагрева металлических образцов извне вводится электрическая энергия, при этом потери теплоты и массы с поверхности проволоочки во внешнюю среду пренебрежимо малы по сравнению с вводимой электрической теплотой [8]. По определению часть экспериментального образца, заключенную меж-

ду зондами, можно рассматривать как “закрытую систему” [1].

По определению [1] локальное производство энтропии равно

$$p(x, \tau) \equiv \frac{d_i s}{d\tau},$$

где $d_i s$ – изменение энтропии, обусловленное необратимыми процессами внутри системы. Прохождение электрического тока через сопротивление является необратимым диссипативным процессом, превращающим электрическую энергию в теплоту. Для электрического тока, проходящего по образцу, можно найти изменение энтропии $d_i S$ [1]:

$$\frac{d_i S}{d\tau} = \frac{UI}{T},$$

или

$$p(x, \tau) = \frac{UI}{TV},$$

где $V = S_{об}L$ – объем образца, заключенного между зондами, $S_{об}$ – площадь поперечного сечения. В рассматриваемом случае потоком является

$$J = UI/(\pi r^2) \text{ Вт/м}^2, \tag{2}$$

а движущей силой

$$F = 1/(TL) \text{ 1/(К м)}. \tag{3}$$

На рисунке приведена зависимость $J = f(F)$. С увеличением силы поток также возрастает. Аналогичная зависимость $J = f(F)$ имеет место и в стационарных задачах теплопроводности, когда увеличение градиента температуры приводит к возрастанию потока теплоты – закон Фурье. Отличие состоит только в том, что сила, поток и производство энтропии в стационарных “градиентных” задачах являются величинами постоянными. В случае импульсного нагрева проводника и сила, и поток, и плотность производства энтропии начинают зависеть от времени. Ранее зависимость потока от силы в эксперименте с импульсным электрическим нагревом не исследовалась. В данной задаче поток линейно зависит от силы, следовательно, анализируемые экспериментальные данные [4] соответствуют линейному режиму термодинамики согласно неравенству (1) и рисунку.

В частности, из рисунка следует, что при скорости изменения температуры $dT/d\tau \approx 5 \times 10^7$ К/с в металлическом проводнике выполняется основное предположение линейного режима: поток линейно зависит от силы (достоверность аппроксимации линейной функцией $R^2 = 0.996$) $J \times 10^{12} = 579.152F - 6.444$. Сравнивая полученные данные с результатами эксперимента самопроизвольного охлаждения молибдена [3, 9], в котором было показано, что при скорости изменения тем-

пературы $dT/d\tau \approx -10^3$ К/с линейность между потоком и силой выполнялась приближенно ($R^2 \approx 0.55$), можно сделать вывод, что для металлов в широком диапазоне изменения $dT/d\tau = 10^3-10^7$ К/с указанная закономерность выполняется. При этом оба исследования – и охлаждение сферического образца молибдена в эксперименте, основанном на методе электростатической левитации, и импульсный электрический нагрев проволоочки из ниобия – соответствуют определению “закрытой системы” и выполняется условие отсутствия градиента температуры по объему образца.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На примере экспериментальных данных, полученных при импульсном электрическом нагреве проволоочки ниобия, впервые показано, что при скорости изменения температуры $dT/d\tau \approx 5 \times 10^7$ К/с выполняется линейная зависимость между потоком и силой, что подтверждает основополагающее предположение линейного режима в термодинамике. Представляет определенный интерес распространение выводов, полученных в данной работе, на более высокие значения $dT/d\tau$, а также на более широкий круг веществ и материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Пригожин И., Кондепуди Д.* Современная термодинамика от тепловых двигателей до диссипативных структур. Пер. с англ. М.: Мир, 2002. 461 с.
2. *Moratto V., García-Perciante A.L., García-Colín L.S.* Transport-theoretical Derivation of the Entropy Production in Relativistic Binary Mixtures of Ideal Fluids // *J. Non-Equilib. Thermodyn.* 2012. V. 37. № 2. P. 179.
3. *Костановский А.В., Костановская М.Е.* Термодинамическое приложение метода электростатической левитации // *Измерительная техника.* 2012. № 9. С. 34.
4. *Cezairliyan A., McClure J.L.* A Microsecond-Resolution Transient Technique for Measuring the Heat of Fusion of Metals: Niobium // *Int. J. Thermophys.* 1987. V. 8. № 5. P. 577.
5. *Латыев Л.Н., Петров В.А., Чеховской В.Я., Шестаков Е.Н.* Излучательные свойства твердых материалов. Спр. / Под общ. ред. Шейндлина А.Е. М.: Энергия, 1974. 470 с.
6. *Костановский А.В., Костановская М.Е.* Определение плотности производства энтропии в эксперименте импульсного электрического нагрева // *Измерительная техника.* 2020. № 3. С. 29.
7. *Костановский А.В., Костановская М.Е.* Критерий применения параболического уравнения теплопроводности // *Письма в ЖТФ.* 2008. Т. 34. № 12. С. 6.
8. *Асиновский Э.И., Кириллин А.В.* Нетрадиционные методы исследования термодинамических свойств веществ при высоких температурах. М.: Янус-К, 1997. 158 с.
9. *Костановский А.В., Костановская М.Е.* О роли потока в нестационарной тепловой задаче охлаждения сферы из молибдена в эксперименте электростатической левитации // 2017. *ТВТ.* Т. 55. № 6. С. 696.