Методика определения активной компоненты напряжения на образце в экспериментах по импульсному джоулеву нагреву

А. М. Кондратьев и А. Д. Рахель
Объединенный институт высоких температур РАН, Ижорская ул., 13, стр.2, Москва 125412, Россия

E-mail: arkondrat@gmail.com

Статья поступила в редакцию 23 ноября 2018 г.

Аннотация. Представлен метод определения индуктивности контура, образованного делителем напряжения и образцом, в экспериментах по импульсному джоулеву нагреву. В этом контуре, в процессе протекания через образец импульса тока, наводится ЭДС индукции, которую необходимо учитывать при определении активного падения напряжения на образце. Установлено, что, исходя из геометрии этого контура, его индуктивность может быть оценена с погрешностью около 10%. Показано, что при внесении поправки на ЭДС индукции при определении активной компоненты падения напряжения на образце для экспериментов с реальными образцами такая погрешность в определении индуктивности вносит погрешность в измерения напряжения менее 0.5%. https://doi.org/10.33849/2018127

1. ВВЕДЕНИЕ

Импульсный нагрев электрическим током широко используется для изучения свойств металлов, графита и некоторых других проводящих материалов при высоких температурах и давлениях. Экспериментальная методика, которая позволила получить уникальные данные по теплофизическим свойствам расширенных жидких металлов и графита [1–3] заключается в том, что образец в форме тонкой полоски помещается между двумя пластинами оконного материала (сапфир, кварцевое стекло) и нагревается импульсом электрического тока амплитудой 10–100 кА и временем нарастания порядка 1 мкс. Во время процесса нагрева измеряются временные зависимости тока, протекающего через образец, напряжения на образце и смещения его поверхности, вызванные тепловым расширением. Такая диагностика позволяет получить временные зависимости для тепла, рассеянного в образце, удельного сопротивления образца, его плотности, давления, внутренней энергии и других величин. Однако, переменный ток, который течет по образцу, индуцирует в цепи высоковольтного делителя, используемого для измерения напряжения на образце, значительную электродвижущую силу (ЭДС). Чтобы определить активную компоненту напряжения, которая входит в выражения для тепла и сопротивления, необходимо вычесть индуктивный вклад из полного (измеренного) напряжения.

На рисунке 1 представлена принципиальная электрическая схема экспериментальной установки. Импульс тока через образец, помещенный между двумя пластинами оконного материала, создается путем разряда через образец конденсатора C.

Как видно из рисунка 1, образец с делителем напряжения образуют контур, в котором будет наводиться ЭДС индукции, когда по образцу будет протекать большой переменный ток. Таким образом, измеренное в эксперименте напряжение будет суммой активного падения напряжения на образце и индуктивной составляющей:

$$U(t) = U_R(t) + L_S \frac{dI(t)}{dt}$$

где U — полное падение напряжения, измеряемое делителем, U_R — активное падение напряжения на образце,

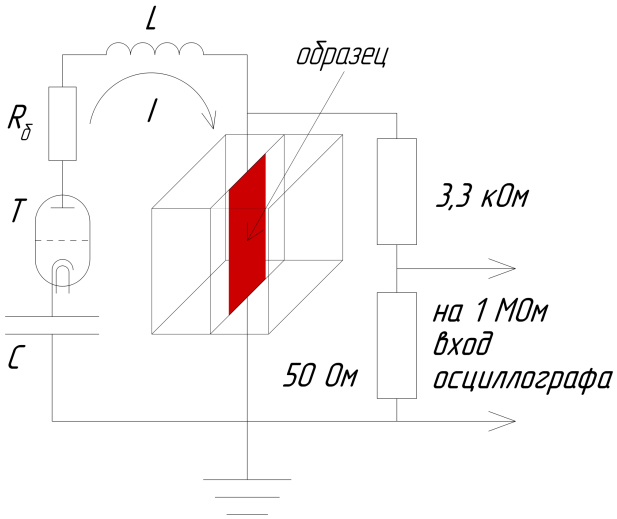

Рисунок 1. Принципиальная схема экспериментального измерения напряжения на образце. C — конденсатор, T — тиратрон, R — токоограничивающее сопротивление, L — индуктивность разрядного контура установки. Также схематично показан резистивный делитель напряжения, с помощью которого измеряется падение напряжения на образце.

I — ток через образец, L_S — индуктивность контура, образованного образцом и делителем напряжения. Заметим еще раз, что сопротивление образца и рассеянное в нем джоулево тепло определяются через активную составляющую напряжения U_R [3].

Для получения точных экспериментальных результатов необходимо правильно учитывать влияние ЭДС индукции на проводимые измерения. Для уменьшения этого влияния можно попытаться уменьшить площадь контура, в котором наводится ЭДС. На рисунке 2 схематично показан образец, верхний и нижний электроды, между которыми расположен образец. Электроды обладают осью симметрии, а образец установлен с некоторым смещением от этой оси. Высоковольтное плечо делителя расположено в латунном цилиндре, соединенном с нижним токоподводом, имеющим потенциал земли. Низкоомное плечо, представляющее собой 50-омную проходную нагрузку, устанавливается непосредственно

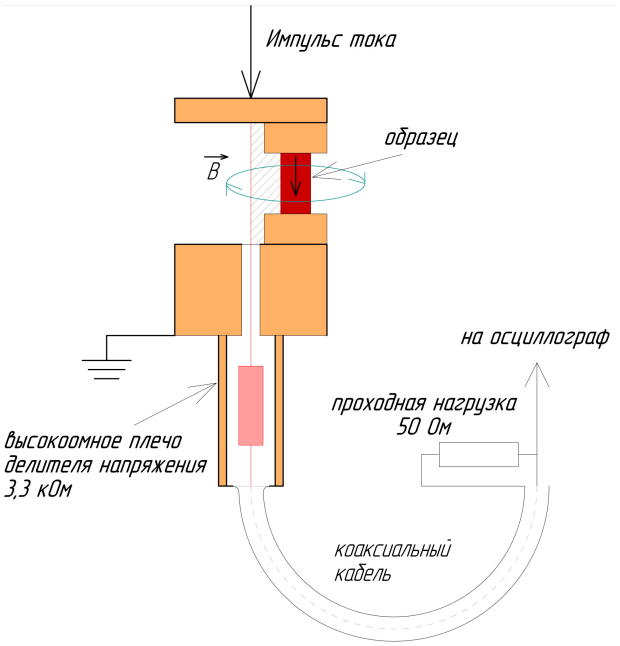

Рисунок 2. Конструкция делителя напряжения.

на входе осциллографа и соединяется с высокоомным плечом с помощью коаксиального кабеля. Проводник, соединяющий верхний электрод с высоким потенциалом и делитель напряжения, расположен в канале, просверленном по оси нижнего электрода. Такая геометрия позволяет устранить влияние переменного магнитного поля на делитель напряжения. Контур, в котором наводится ЭДС на рисунке 2 показан штриховкой. Поскольку образец в экспериментах [1–3] представляет собой прямоугольный параллелепипед (отрезок фольги), толщина которого гораздо меньше его длины и ширины, то индуктивность этого образца в процессе эксперимента меняется незначительно. Это обстоятельство, а также определенное положение прямолинейного проводника, соединяющего электрод с высоким потенциалом и делитель напряжения, позволяют определить индуктивность этого контура по простой аналитической формуле и вычесть индуктивный вклад из полного напряжения.

Однако, необходимо убедиться в том, что указанный контур является единственным источником ЭДС, а также необходимо оценить точность, с которой мы определяем индуктивность.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНДУКТИВНОСТИ КОНТУРА

Для решения этой задачи был изготовлен специальный цилиндрический резистор из манганиновой фольги (рисунок 3). Этот резистор представлял собой цилиндр из тефлона диаметром 10 мм и длиной 43 мм с просверленным по оси отверстием диаметром 2.5 мм. На концах этого цилиндра была нарезана внешняя резьба, на которую были накручены цилиндры из латуни диаметром 10 мм и длиной 5 мм, при этом длина сборки составляла 43 мм. Затем на полученную сборку был плотно намотан и прижат тремя пластиковыми хомутами отрезок манганиновой фольги толщиной 50 мкм, шириной 31.4 мм и длиной 34 мм таким образом, что фольга образовывала

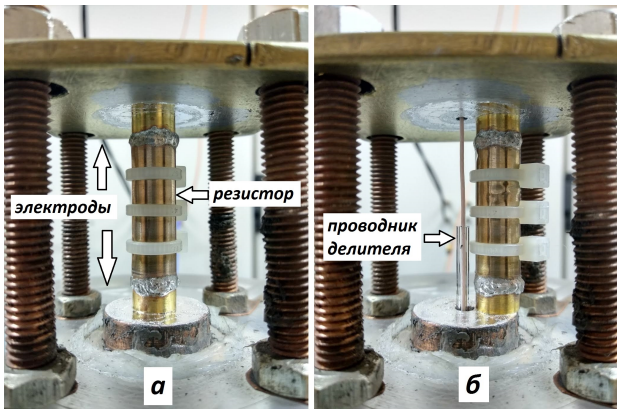

Рисунок 3. Фотография цилиндрического резистора из манганиновой фольги: (а) — резистор установлен коаксиально с проводником делителя напряжения, (б) — резистор установлен сбоку от проводника (там же, где в эксперименте располагаются образцы).

цилиндр диаметром 10 мм и длиной 34 мм. После этого концы полученного цилиндра из фольги были припаяны по окружности к латунным торцам. Поскольку манганин имеет очень низкий температурный коэффициент сопротивления, то при протекании по нему импульса тока, его сопротивление будет оставаться постоянным. Оценки показывают, что, пропуская через этот резистор ток амплитудой в 20 кА, он нагреется не более чем на 80 °C, а максимальная рабочая температура для манганина составляет 100 °C. Сопротивление этого резистора, измеренное в стационарных условиях с помощью четырехпроводной схемы, оказалось равным 8.87 ± 0.05 мОм.

Резистор монтировался двумя способами. Сначала были проведены эксперименты, в которых проводник делителя проходил внутри резистора (рисунок 3(а)). Это позволило полностью устранить контур, в котором наводится ЭДС индукции. Через резистор пропускался импульс тока амплитудой около 20 кА и измерялись временные зависимости тока через резистор и падение напряжения на нем. Поскольку в этом случае нет индуктивного вклада, сопротивление резистора может быть определено по формуле:

$$R(t) = \frac{U(t)}{I(t)} \tag{1}$$

где $U(t)$ и $I(t)$ — падение напряжения на резисторе и ток через него, соответственно. Полученная зависимость сопротивления от времени $R(t)$ для пяти экспериментов представлена на рисунке 4.

Как видно из рисунка 4, измеренное сопротивление не зависит от времени и хорошо согласуется со значением, полученным в стационарных условиях. Этот результат указывает на то, что индуктивный вклад в падение напряжения в этом случае отсутствует и, значит, на других участках делителя напряжения не наводится заметная ЭДС. Из рисунка 4 следует, что постоянное значение сопротивления устанавливается не сразу, а за время около 150 нс, что связано с особенностями работы используемого трансформатора тока в момент коммутации.

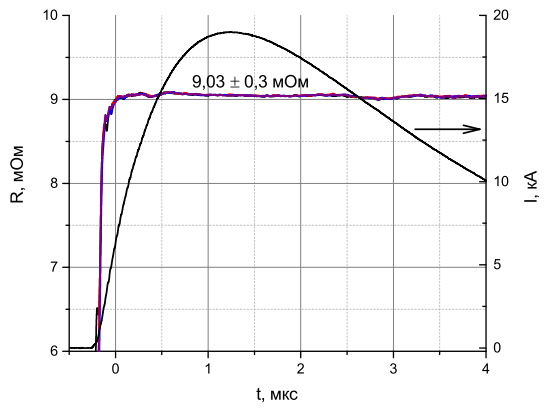

Рисунок 4. Временные зависимости сопротивления резистора и протекающего по нему тока для пяти экспериментов (монтаж резистора такой, как на рисунке 3(а)). Указано полученное значение сопротивления резистора.

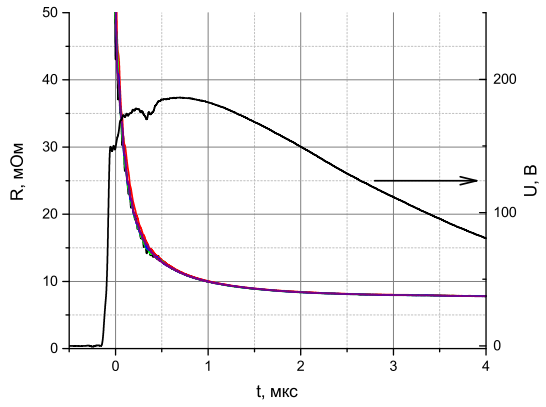

Рисунок 5. Временные зависимости сопротивления резистора и падения напряжения на нем для пяти экспериментов (монтаж резистора такой, как на рисунке 3(б)). Импульс тока был таким же, как на рисунке 4.

Во второй серии экспериментов резистор устанавливался на том месте, где в реальных экспериментах располагаются образцы (см. рисунок 3(б)). Слева от резистора виден проводник, идущий к высоковольтному плечу делителя напряжения. Резистор и этот проводник образуют контур, в котором наводится ЭДС. На рисунке 5 представлены результаты измерения сопротивления резистора в такой конфигурации. Сопротивление рассчитывалось по формуле (1) без внесения поправки на индуктивность. Также показана кривая измеренного напряжения. Из этого рисунка отчетливо видно влияние ЭДС индукции на результаты измерения сопротивления.

Если ЭДС индукции наводится только в контуре, показанном на рисунке 3(б), то, ввиду постоянства индуктивности этого контура, её значение можно определить. Для этого необходимо подобрать значение индуктивности, при котором сопротивление резистора, вычисленное по формуле:

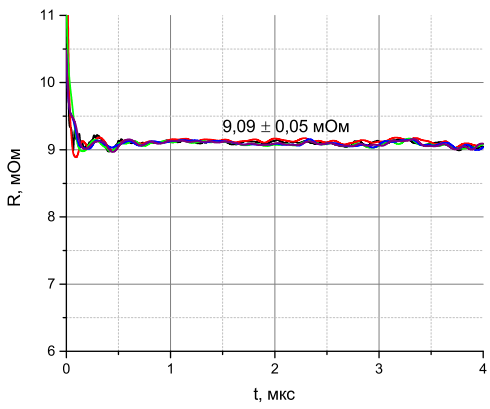

Рисунок 6. Сопротивление резистора, вычисленное по формуле (3) как функция времени для пяти экспериментов (схема монтажа как на рисунке 3(б)).

$$R(t) = \frac{U(t) - L_S \frac{dI(t)}{dt}}{dI} \tag{2}$$

не будет зависеть от времени. На рисунке 6 показаны зависимости $R(t)$ для значения $L_S = 4$ нГ. Из рисунка видно, что сопротивление уже не зависит от времени, а само значение сопротивления хорошо согласуется с измеренным в стационарных условиях значением.

Величину индуктивности L_S, которая входит в (2) можно оценить. Если пренебречь концевыми эффектами, то эта индуктивность определяется выражением [4]

$$L_S = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \ln \frac{r_R + a}{r_R} \tag{3}$$

где r_R — радиус манганинового резистора (5 мм), a — расстояние от резистора до проводника делителя (2.7 мм), l — длина резистора (43 мм), μ_0 — магнитная постоянная. Подставляя эти значения в формулу (3), получаем $L_S = 3,7$ нГ, что близко к величине 4 нГ, найденной путем подбора.

На рисунке 7 показано, как влияет погрешность в определении L_S на результаты определения удельного сопротивления для эксперимента с графитом. Для образца графита марки HOPG показан график зависимости приведенного сопротивления образца от рассеянного в нем тепла при использовании двух различных значений индуктивности, отличающихся на 10%. Видно, что такая вариация индуктивности слабо влияет на величину сопротивления, изменяя её примерно на 0.5%, что значительно меньше погрешности наших измерений.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлен метод определения индуктивности контура, образованного делителем напряжения и образцом, в экспериментах по импульсному джоулеву нагреву. Установлено, что, исходя из геометрии контура, образованного образцом и делителем напряжения, индук-

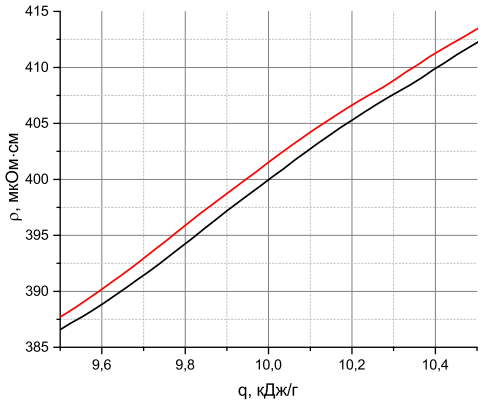

Рисунок 7. Влияние погрешности в определении индуктивности на результаты реального эксперимента. Показана зависимость приведенного сопротивления графита марки HOPG от тепла, рассеянного в образце. Красная кривая — значение индуктивности 4.0 нГ, черная кривая — значение индуктивности 3.6 нГ.

тивность этого контура может быть оценена с погрешностью порядка 10%. Показано, что для экспериментов с реальными образцами такая погрешность в определении индуктивности влияет на результаты экспериментов в пределах 0.5%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Korobenko V N and Rakhel A D 2007 *Phys. Rev. B* **75** 064208
2. Korobenko V N and Rakhel A D 2013 *Phys. Rev. B* **88** 13420
3. Кондратьев А М, Коробенко В Н и Рахель А Д 2018 *ЖЭТФ* **154** 1168–1182
4. Сивухин Д В 1977 *Общий курс физики* т. 3 (Москва: Наука)