

---

ТЕПЛО- И МАССООБМЕН,  
СВОЙСТВА РАБОЧИХ ТЕЛ И МАТЕРИАЛОВ

---

**ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗЛУЧАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ ТОНКОЙ  
ВОЛЬФРАМОВОЙ ПРОВОЛОКИ С ОКИСЛЕННОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ  
В РЕЖИМЕ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ**

© 2023 г. М. Г. Зеодино<sup>а, б, \*</sup>, А. А. Пронкин<sup>а, б</sup>, Д. А. Крыницкая<sup>б</sup>

<sup>а</sup>Объединенный институт высоких температур РАН, Ижорская ул., д. 13, корп. 2, Москва, 125412 Россия

<sup>б</sup>Национальный исследовательский университет “Московский энергетический институт”,  
Красноказарменная ул., д. 14, Москва, 111250 Россия

\*e-mail: zeodinovmg@mpei.ru

Поступила в редакцию 29.07.2022 г.

После доработки 13.09.2022 г.

Принята к публикации 28.09.2022 г.

Современные средства диагностики позволяют по-новому подходить к решению теплофизических задач, значительно экономя время измерений: те измерения, на которые ранее тратились часы, сейчас можно проводить за считанные минуты. Предложена методика определения излучательной способности тонкой металлической проволоки в течение нескольких минут в режиме нестационарной теплопроводности. Многие исследователи, в том числе и Г.М. Кондратьев, предложивший определять излучательную способность методом регулярного режима, пытались реализовать данную методику на практике, но столкнулись с техническими проблемами, свойственными экспериментальной работе: необходимостью обеспечения глубокого вакуума и применения приборов с высоким быстродействием. Технические сложности вынуждали исследователей ограничивать область температур, увеличивать время эксперимента или проводить компьютерное моделирование процесса нагрева-охлаждения. Практическая реализация данной методики оказалась возможной благодаря использованию быстродействующей системы измерений на основе микроконтроллера Arduino Uno и аналого-цифрового преобразователя L-Card E14-140, способной записывать сигналы через 40 мс. Для миниатюризации установки и снижения уровня помех применены литий-ионные аккумуляторы. Значения излучательной способности вольфрамовой проволоки с окисленной поверхностью, определенные выбранным методом и калориметрическим методом в температурном диапазоне 400–870 К, полностью коррелируют между собой. Температурный диапазон ограничивается только напряжением применяемого аккумулятора.

**Ключевые слова:** нестационарная теплопроводность, излучательная способность, вольфрамовая проволока с окисленной поверхностью, темп охлаждения, радиационный теплообмен

**DOI:** 10.56304/S0040363623030086

При получении новых материалов необходимо знание их теплофизических свойств, таких как коэффициенты теплопроводности и теплоемкости, плотность, удельная теплоемкость, излучательная и отражательная способности. При этом, как правило, стоит задача получить такие знания с минимальными затратами времени и средств. Поэтому исследования проводятся на образцах небольших размеров в виде тонких дисков, пластин или покрытий, проволоки и т.д. Исследования отражательной и излучательной способностей термостойких материалов являются особенно актуальными в настоящее время при проектировании эффективных систем теплозащиты аппаратов, летающих на гиперзвуковых скоростях.

**МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ТЕПЛОВОГО ПОТОКА**

Для расчета теплового потока с поверхности нагретого тела необходимо иметь данные исследований интегральной излучательной способности выбранного тела. Среди большого числа известных методов можно выделить радиационный, калориметрический, метод регулярного режима и метод непрерывного нагревания с постоянной скоростью [1, 2].

Радиационный метод основан на сравнении потоков излучения от исследуемого и эталонного тела (тела с заранее известной излучательной способностью или модели абсолютно черного тела) при любых температурах. Слабое место данного метода — появление искажений при измере-

нии температуры с помощью термопары, закрепленной на поверхности тела. Размеры приемной площадки фотоэлемента, сфокусированного на объект измерения, должны быть меньше размеров объекта, что не всегда возможно при определении температуры тонких цилиндрических тел (проволок). Кроме того, при измерениях высоких температур необходимо применять дополнительные оптические элементы, такие как зеркала и линзы, что вносит дополнительные погрешности и усложняет измерительный участок.

Более распространенным является калориметрический метод, в основу которого положено непосредственное измерение теплового потока без использования эталонов сравнения [3, 4]. В экспериментальной установке, использующей калориметрический метод, нужно обеспечивать минимальные тепловые потери в окружающую среду, т.е. поддерживать высокий вакуум для исключения конвективных потоков, и уменьшить тепловые потери через контактные площадки, элементы крепления и термопары. Кроме того, необходимо поддерживать постоянную температуру окружающей среды и выполнять измерения на довольно длинном исследуемом теле для обеспечения равномерного распределения температуры на рабочем участке в выбранном температурном диапазоне. Излучательная способность экспериментального образца в пределах данного диапазона должна иметь слабую зависимость от температуры.

Метод регулярного режима можно использовать при нагреве и охлаждении исследуемого материала. Применение его позволяет значительно сократить время измерений. Данный метод был предложен Г.М. Кондратьевым [5] и реализован при температурах около 300 К. Коэффициент теплоотдачи состоит из конвективно-кондуктивной  $\alpha_k$  и излучательной  $\alpha_{\text{и}}$  составляющих. Автор предложил использовать два тела, одно из которых является эталонным, выполненным из различных металлов и имеющих одинаковую форму и размеры. При тождественности конвективно-кондуктивных составляющих коэффициента теплоотдачи эталонного  $\alpha_k^{\text{э}}$  и исследуемого  $\alpha_k^{\text{м}}$  металлов с помощью разностного метода, включающего конвективно-кондуктивные составляющие коэффициента теплоотдачи, можно определить излучательную способность неизвестного материала, зная только излучательную способность эталона. При этом автор [5] отмечал, что теоретически безразлично, при каком значении  $\alpha_k$  проводить опыт. Важно, чтобы коэффициент теплоотдачи был одинаков. Но на практике оказалось, что необходимо выполнение дополнительного условия  $\alpha_k \ll \alpha_{\text{и}}$ , так как разность  $(\alpha_k^{\text{э}} + \alpha_{\text{и}}^{\text{э}}) - (\alpha_k^{\text{м}} + \alpha_{\text{и}}^{\text{м}})$  (здесь  $\alpha_k^{\text{э}}$ ,  $\alpha_{\text{и}}^{\text{э}}$  — коэффициент теплоотдачи эталонного металла;

$\alpha_k^{\text{м}}$ ,  $\alpha_{\text{и}}^{\text{м}}$  — коэффициент теплоотдачи исследуемого металла) не должна иметь слишком малое значение, поскольку в противном случае потребуются обеспечить высокую точность измерений. Поэтому для исследований желательно использовать вакуумную установку.

Метод регулярного режима для определения излучательной способности при температурах 323–873 К впервые был применен в МЭИ в 1958 г. [6]. Для реализации данного метода были выбраны материалы с известной излучательной способностью — графит в качестве эталона и исследуемые металлы и металлические покрытия в виде длинных тонких цилиндрических тел, что позволило обеспечить условия  $Bi \leq 0.1$ ,  $Fo > 0.3$ ,  $\psi \approx 1.0$  (здесь  $Bi$ ,  $Fo$  — числа Био и Фурье;  $\psi$  — коэффициент неравномерности температурного поля). Экспериментальная установка состояла из двух печей, каждая из которых имела по семь нагревателей. Продолжительность нагрева и измерения составляла 40–100 мин. Первая печь служила для предварительного нагрева, во второй проводились опыты.

Метод нагревания с постоянной скоростью аналогичен методу регулярного режима. Отличие состоит в том, что температура окружающей среды не является постоянной, а изменяется с постоянной скоростью.

В последующие годы неоднократно делались попытки использовать регулярный режим для определения излучательной способности материалов, но все ограничивалось теоретическими расчетами или математическим моделированием эксперимента [7–9]. Основной проблемой, повидимому, являлось создание экспериментальной установки с быстродействующей измерительной схемой, а реализация радиационного и калориметрического методов оказалась более простой.

Несмотря на то что метод регулярного режима позволяет значительно сократить время эксперимента, это время зависит от числа Фурье  $Fo > 0.3$ . Определять излучательную способность за более короткие промежутки времени было предложено в [10] по темпу охлаждения в центре тонкого диска. По кривой изменения температуры в центре образца вычисляли темп охлаждения при средней температуре по объему материала. Время эксперимента определялось быстродействием (1 с) электронного потенциометра ЭПП-09М2.

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ИЗЛУЧАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ ВОЛЬФРАМОВОЙ ПРОВОЛОКИ

Исследование излучательной способности вольфрамовой проволоки в режиме нестационар-

ной теплопроводности выполняли на экспериментальной установке, схема которой показана на рис. 1. Вольфрамовая проволока с окисленной поверхностью диаметром 0.3 мм и длиной 285 мм заключена в стеклянную колбу, из которой откачан воздух. Колба имеет двойные стенки, пространство между которыми частично заполнено водой, обеспечивающей температуру на внутренней поверхности стенки колбы, равную температуре окружающей атмосферы. Так как основная проблема при исследовании состояла в точности определения темпа охлаждения проволоки, то необходимо было исключить влияние всех наводок в измерительную часть стенда. В качестве нагревателя был выбран литий-ионный аккумулятор 2, способный обеспечить нагрев проволоки до температуры 870 К. Измерительная часть состояла из аналого-цифрового преобразователя L-Card E14-140 3, персонального компьютера, микроконтроллера Arduino UNO 4, образцовой катушки сопротивления 100 Ом 5, а также питающего измерительную часть экспериментальной установки литий-ионного аккумулятора 6.

Запуск схемы происходил при включении кнопки 7. Подаваемое на вольфрамовую проволоку напряжение через транзисторный ключ 8 регулировалось микроконтроллером 4 с помощью кнопок 7 “Увеличение напряжения” и 9 “Уменьшение напряжения”. После прогрева вольфрамовой проволоки до заданной температуры в течение примерно 120 с кнопкой 10 отключался нагревающий аккумулятор и запускалась измерительная схема. С учетом падения напряжения на вольфрамовой проволоке, ее геометрических размеров и тока, протекающего через нее, рассчитывали удельное электрическое сопротивление вольфрама. Продолжительность измерительной ча-

сти эксперимента для вольфрамовой проволоки не превышала 80 с.

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА ИЗЛУЧАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ

Уравнение теплового баланса в режиме нестационарной теплопроводности выглядит следующим образом:

$$-c \frac{\partial \bar{\vartheta}_v}{\partial \tau} d\tau = \alpha \bar{\vartheta}_F F d\tau,$$

где  $c$  – полная теплоемкость тела, Дж/К;  $\bar{\vartheta}_v$ ,  $\bar{\vartheta}_F$  – средняя по объему и по поверхности температура, К;  $\tau$  – время, с;  $F$  – площадь поверхности теплообмена, м<sup>2</sup>;  $\alpha$  – средний коэффициент теплоотдачи, учитывающий конвективно-кондуктивную и излучательную составляющие, Вт/(м<sup>2</sup> · К).

При охлаждении в воздушной среде давлением примерно 0.01 Па тонкой металлической проволоки радиусом  $r_0$  и длиной  $2L_0$  выражение для числа Био можно записать в виде

$$Bi_r = \frac{\alpha r_0}{\lambda} \rightarrow 0; \quad Bi_L = \frac{\alpha L_0}{\lambda} \rightarrow 0,$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м · К).

При этом  $\psi = \frac{\bar{\vartheta}_F}{\bar{\vartheta}_v} \rightarrow 1$ , т.е.  $\bar{\vartheta}_v \approx \bar{\vartheta}_F$ . При переходе к конечным разностям уравнение теплового баланса преобразуется к виду

$$\begin{aligned} -c \frac{(T_1 - T_B) - (T_2 - T_B)}{\tau_2 - \tau_1} = \\ = -c \frac{T_1 - T_2}{\tau_2 - \tau_1} = \alpha \left( \frac{T_1 + T_2}{2} - T_B \right) F, \end{aligned}$$

где  $T_1$ ,  $T_2$  – температура исследуемого материала в моменты времени  $\tau_1$  и  $\tau_2$ , К, причем  $T_1$  и  $T_2$  мало различаются между собой;  $T_B$  – температура окружающей среды (воздуха), К.

Выражение для темпа охлаждения, рассчитанного по методу конечных разностей,  $m_{к.р}$ , с<sup>-1</sup>, можно записать в виде

$$m_{к.р} = - \frac{1}{\frac{T_1 + T_2}{2} - T_B} \frac{T_1 - T_2}{\tau_2 - \tau_1}.$$

Уравнение, аналогичное уравнению первой теоремы Кондратьева [5], имеет следующий вид:

$$\alpha = \frac{mc}{F}, \quad (1)$$

где  $m$  – темп охлаждения.

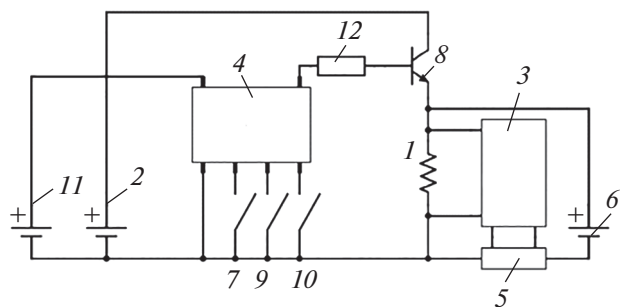


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

1 – вольфрамовая проволока; 2, 6 – литий-ионный аккумулятор; 3 – аналого-цифровой преобразователь L-Card E14-140; 4 – микроконтроллер Arduino UNO; 5 – катушка сопротивления 100 Ом; 7, 9, 10 – управляющие кнопки; 8 – транзисторный ключ KT829A; 11 – блок питания микроконтроллера Arduino UNO; 12 – резистор, ограничивающий ток транзисторного ключа

Для регулярного режима темп охлаждения  $m_{p,p}$  определяется по формуле

$$m_{p,p} = \frac{\ln(T_1 - T_b) - \ln(T_2 - T_b)}{\tau_2 - \tau_1}.$$

В соответствии с экспериментальными данными темпы охлаждения  $m_{к,p}$  и  $m_{p,p}$  при близких значениях  $T_1$  и  $T_2$  в моменты времени  $\tau_1$  и  $\tau_2$  различаются не более чем на 0.04%. Далее темп охлаждения  $m$  можно считать определенным по методу конечных разностей.

В процессе нестационарного теплообмена в вакууме при  $\alpha \rightarrow 0$  температура среды (воздуха)  $T_b$ , окружающей проволоку, остается неизменной, температура внутренней поверхности стенок колбы  $T_c$  не известна, но условия проведения экспериментов обеспечивают  $T_c \approx T_b$ . Поэтому в разностном методе в том случае, когда исследуемый образец участвует только в радиационном теплообмене, коэффициенты теплоотдачи вычисляются по уравнениям

$$\begin{aligned}\alpha_1(T_1 - T_b) &= \varepsilon_1 \sigma (T_1^4 - T_c^4); \\ \alpha_2(T_2 - T_b) &= \varepsilon_2 \sigma (T_2^4 - T_c^4),\end{aligned}$$

где  $\alpha_1, \alpha_2$  — коэффициент теплоотдачи в моменты времени  $\tau_1$  и  $\tau_2$ ;  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  — излучательная способность в моменты времени  $\tau_1$  и  $\tau_2$ ;  $\sigma$  — константа Стефана — Больцмана.

При выборе достаточно малого температурного интервала, в пределах которого  $\alpha_1 \approx \alpha_2 \approx \alpha$  и  $\varepsilon_1 \approx \varepsilon_2 \approx \varepsilon$ , можно записать:

$$\alpha(T_1 - T_2) = \varepsilon \sigma (T_1^4 - T_2^4).$$

Если принять

$$f = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{T_1 - T_2},$$

то с учетом выражения (1) можно получить следующую формулу для расчета излучательной способности:

$$\varepsilon = \frac{mc}{fF}. \quad (2)$$

### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ИЗЛУЧАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ ВОЛЬФРАМОВОЙ ПРОВОЛОКИ

С учетом зависимости электрического сопротивления  $\rho$ , Ом · м, от температуры для вольфрама [11]

$$T(\rho) = -2.404 \times 10^{15} \rho^2 + 4.387 \times 10^9 \rho + 70.1$$

была получена температурная зависимость  $\ln(T_1 - T_2) = f(\tau)$ , представленная на рис. 2, в про-

$\ln(T_1 - T_2)$

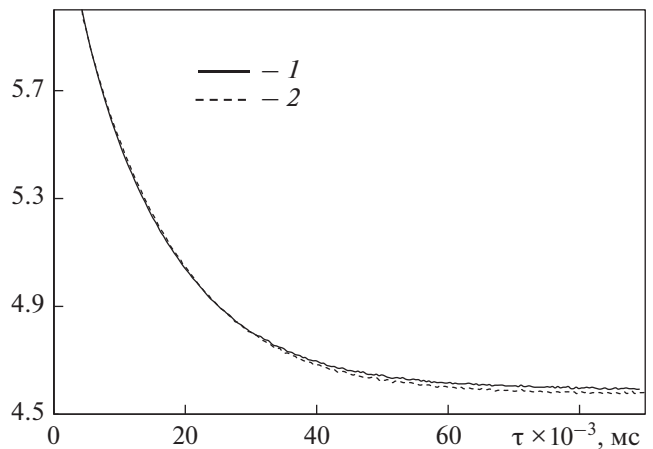


Рис. 2. Зависимость  $\ln(T_1 - T_2)$  от времени при охлаждении после отключения мощности нагрева 3.2 (1) и 0.9 Вт (2)

цессе охлаждения после прекращения нагрева проволоки при мощности 0.9 и 3.2 Вт. Температурные кривые полностью совпадают одна с другой, регулярный режим наступает при  $\tau > 100$  с, при этом излучательная способность изменяется с изменением температуры, поэтому получить линейную зависимость  $\ln(T_1 - T_2) = f(\tau)$  невозможно. Однако при разделении графической зависимости, полученной в нестационарном режиме, на достаточно малые кусочно-линейные участки можно рассчитать излучательную способность для любой температуры внутри исследуемого температурного диапазона. Ширину температурного диапазона  $T_1 - T_2$  выбирали в пределах 10 и 20 К. При этом излучательная способность, вычисленная по формуле (2), в пределах выбранных температурных диапазонов не изменялась, что подтверждало правильность применения кусочно-линейного приближения. В соответствии с температурной зависимостью теплоемкости

$$\begin{aligned}c(T) &= 1.67 \times 10^{-11} T^3 - \\ &- 3.77 \times 10^{-8} T^2 + 3.53 \times 10^{-8} T + 0.05\end{aligned}$$

была рассчитана интегральная излучательная способность вольфрамовой проволоки с окисленной поверхностью при систематической погрешности, не превышающей 4%.

Результаты, полученные методом нестационарной теплопроводности, представленные на рис. 3, коррелируют с данными калориметрического метода для вольфрамовой проволоки. Тем-

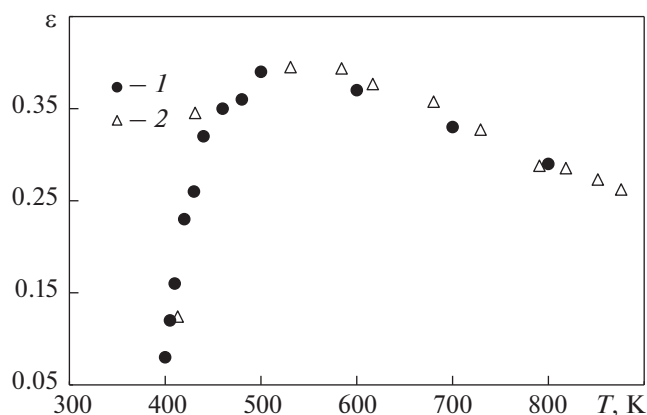


Рис. 3. Зависимость излучательной способности от температуры, полученная методом регулярного режима (1) и калориметрическим методом (2)

пературная зависимость излучательной способности вольфрамовой проволоки с окисленной поверхностью в выбранном диапазоне температур отлична от излучательной способности чистого вольфрама, так как на поверхности вольфрамовой проволоки имеется оксидная пленка, образовавшаяся за несколько лет работы. Для удаления этой пленки необходимо провести “отжиг” поверхности — нагреть проволоку до температуры 1673–1773 К. Мощности примененного в работе литий-ионного аккумулятора оказалось недостаточно для нагрева выше 870 К. Результаты измерений, проведенных впоследствии на вольфрамовой проволоке, которая не была ранее в работе, показали линейную зависимость излучательной способности от температуры.

В данной работе стояла задача реализовать метод, предложенный Г.М. Кондратьевым, в области высоких температур. В дальнейшем планируется применить данную измерительную схему для определения излучательной способности других материалов в более широком температурном диапазоне.

## ВЫВОДЫ

1. Время экспериментального исследования на установке для экспресс-анализа излучательной способности тонкой вольфрамовой проволоки с окисленной поверхностью методом нестационарной теплопроводности не превышает 5 мин.

2. Для реализации уравнения, положенного в основу расчета методом регулярного режима, необходимо исключить влияние конвективного теплообмена. Темп охлаждения в исследуемом

временном интервале, определенный методом конечных разностей, отличается от темпа охлаждения, определенного методом регулярного режима, на 0.04%.

3. Температурные зависимости излучательной способности вольфрамовой проволоки с окисленной поверхностью, полученные методом нестационарной теплопроводности и калориметрическим методом, практически полностью коррелируют между собой.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. М.: Энергия, 1975.
2. Излучательные свойства твердых материалов: справочник / под общ. ред. А.Е. Шейдлина. М.: Энергия, 1974.
3. Костановский А.В., Зеодинов М.Г., Костановская М.Е. Теплопроводность и излучательная способность графита DE-24 при температурах 2300–3000 К // Измерительная техника. 2010. № 12. С. 38–44.
4. Излучательная способность силицированного карбида кремния при 1400–2200 К / А.В. Костановский, М.Г. Зеодинов, М.Е. Костановская А.А. Пронкин // ТВТ. 2019. Т. 57. № 2. С. 301–303.
5. Кондратьев Г.М. Регулярный тепловой режим. М.: Гостехиздат, 1954.
6. Осипова В.А. Определение степени черноты металлов методом регулярного теплового режима // Теплоэнергетика. 1958. № 4. С. 59–63.
7. Уваров В.М., Громова Е.С., Хохлов Г.Г. К определению степени черноты тела // Национальная ассоциация ученых. 2020. № 52. С. 53–54.
8. Анализ нестационарного метода измерения интегрального коэффициента излучения / В.А. Архипов, И.К. Жарова, В.Д. Гольдин, Н.И. Куриленко, Г.Я. Мамонтов // Теплофизика и аэромеханика. 2012. Т. 19. № 6. С. 751–760.
9. Измерение степени черноты поверхностей образцов методом монотонного нагрева / Е.В. Лаповок, Д.А. Мосин, М.М. Пеньков, И.А. Уртминцев, С.И. Ханков // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59. № 4. С. 311–316.
10. Измерение степени черноты неорганических материалов на малогабаритных образцах / А.Г. Ромашин, А.А. Борзых, Б.Е. Тихонов, В.Г. Вережка, Ю.М. Потапов // ТВТ. 1971. Т. 9. № 3. С. 517–521.
11. Зинovieв В.Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах: справ. М.: Metallurgia, 1989.

## Investigation into the Emissivity of a Thin Tungsten Wire with Oxidized Surface in the Unsteady Heat Conduction Regime

M. G. Zeodinov<sup>a, b, \*</sup>, A. A. Pronkin<sup>a, b</sup>, and D. A. Krynitskaya<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences, Moscow, 125412 Russia

<sup>b</sup> National Research University Moscow Power Engineering Institute, Moscow, 111250 Russia

\*e-mail: zeodinovmg@mpei.ru

**Abstract**—Modern diagnostic tools offer a new approach to solving thermophysical problems, considerably saving measurement time: those measurements that previously required hours can now be made in just a few minutes. A procedure is proposed for determining the emissivity of a thin metal wire within several minutes in the regime of unsteady-state heat conduction. Many researchers, including G.M. Kondrat'ev, who proposed to determine the emissivity by the regular regime method, tried to implement this procedure in practice but faced technical problems inherent in experimental work, including the requirements for high vacuum and taking measurements using fast-response instruments. Technical difficulties forced researchers to limit the temperature range, increase the experiment time, or perform computer simulations of the heating-cooling process. This procedure can be implemented in practice due to the use of a fast-response measurement system based on an Arduino Uno microcontroller and an L-Card E14-140 analog-to-digital converter capable of recording signals at 40 ms intervals. Lithium-ion batteries were used to miniaturize the unit and reduce the interference level. The values of emissivity of a tungsten wire with an oxidized surface, determined by the selected and the calorimetric method in the temperature range of 400–870 K, are in good agreement. The temperature range is limited only by the voltage of the used battery.

**Keywords:** unsteady-state heat conduction, emissivity, tungsten wire with oxidized surface, cooling rate, radiative heat transfer