

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

ФИЗТЕХ-ШКОЛА ЭЛЕКТРОНИКИ, ФОТОНИКИ И МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКИ

ПРАКТИКУМ КАФЕДРЫ ФОТОНИКИ

## **Измерение коэффициента теплообмена при конвективном охлаждении**

выполнили студенты 654а группы ФЭФМ

Агафонов Владислав  
Карпова Татьяна  
Полозов Никита

# Содержание

<b>1</b>	<b>Цель работы</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Оборудование, используемое в работе</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Теоретические положения</b>	<b>2</b>
<b>4</b>	<b>Экспериментальная установка</b>	<b>3</b>
<b>5</b>	<b>Результаты измерений</b>	<b>4</b>
5.1	Порядок выполнения измерений и обработки данных . . . . .	4
5.2	Экспериментальные зависимости температуры от времени при конвективном охлаждении . . .	4
5.3	Результаты обработки полученных данных . . . . .	8
5.4	Зависимость коэффициента теплообмена $h$ от диаметра медной проволоки . . . . .	8
<b>6</b>	<b>Вывод</b>	<b>9</b>

# 1 Цель работы

Экспериментальное измерение конвективного коэффициента теплообмена различных протяженных цилиндрических тел на воздухе

## 2 Оборудование, используемое в работе

1. Цифровой микрометр
2. Источник тока
3. Набор проводов длиной  $L = 27$  см с круглым сечением:
  - Медная проволока диаметром  $d_1 = 0.8$  мм с изоляцией из ПВХ диаметром  $d_{i1} = 1.95$  мм
  - Медная проволока диаметром  $d_2 = 0.57$  мм с изоляцией из ПВХ диаметром  $d_{i2} = 0.95$  мм
  - Медная проволока диаметром  $d_3 = 0.06$  мм
  - Медная проволока диаметром  $d_4 = 0.17$  мм
  - Медная проволока диаметром  $d_5 = 0.32$  мм
  - Медная проволока диаметром  $d_6 = 0.5$  мм
  - Медная проволока диаметром  $d_7 = 1.07$  мм

## 3 Теоретические положения

**Закон Ньютона-Рихмана** – эмпирическая закономерность, выражающая тепловой поток между телами через температурный напор; закон гласит, что плотность теплового потока ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ) на границе тел пропорциональна их разности температур, или *температурному напору*:

$$q = h\Delta T \quad (1)$$

Коэффициент пропорциональности  $h$  [ $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ] – коэффициент теплообмена (теплоотдачи) – определяет плотность теплового потока при перепаде температур на 1 К. Величина коэффициента теплообмена зависит от условий эксперимента и геометрии образца, поэтому определяется экспериментально.

Количество теплоты, отданное через площадку на границе раздела тел площадью  $S$  за время  $t$ , пропорционально разности этих температур этих тел (считаем, что она остаётся за это время постоянной):

$$Q = htS\Delta T \quad (2)$$

Закон Ньютона-Рихмана служит одним из видов граничных условий в задачах теплопроводности. Если внутренняя теплопроводность много больше коэффициента теплоотдачи, то внутри тела устанавливается почти однородная температура (если она одинакова также на всей его поверхности), уравнение охлаждения тела можно записать в виде

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{hS}{C}(T_{out} - T_0), \quad (3)$$

где  $C$  – полная теплоёмкость тела. В случае отсутствия внутренних источников тепла температура тела будет по экспоненте приближаться к температуре окружающей среды  $T_{out}$ :

$$T(t) = T_{out} + \exp\left(-\frac{hS}{C}t\right)(T_0 - T_{out}) \quad (4)$$

**Число Био** – один из критериев подобия стационарного теплообмена между нагретым или охлаждённым твёрдым телом и окружающей средой:

$$Bi = \frac{hl}{\lambda}, \quad (5)$$

где  $h$  – коэффициент теплоотдачи от поверхности тела к окружающей среде,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала тела. Число Био характеризует соотношение между перепадом температуры в двух точках тела, находящихся на характерном расстоянии  $l$  друг от друга, и температурным напором  $\Delta T = T_{surf} - T_{out}$ ; также оно представляет собой отношение термического сопротивления тела  $1/\lambda$  к термическому сопротивлению передачи тепла на поверхности  $1/h$ . Для геометрически подобных тел равенство чисел Био определяет подобие распределения температурных полей.

Формулы для оценки конвективного коэффициента теплопередачи в большинстве случаев являются эмпирическими для конкретных геометрий и типов потока. В случае конвективного охлаждения протяжённых горизонтальных цилиндрических тел выполняется соотношение

$$h = \frac{\lambda}{D} \left( 0.6 + \frac{0.387 Ra_D^{1/6}}{\left( 1 + \left( \frac{0.559}{Pr} \right)^{9/16} \right)^{8/27}} \right)^2, \quad (6)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности воздуха,  $D$  – внешний диаметр цилиндра,  $Pr$  – число Прандтля; при условии, что число Рэлея  $10^{-5} < Ra_D < 10^{12}$ .

**Число Рэлея**  $Ra$  – безразмерное число, определяющее поведение жидкости (газа) под воздействием градиента температуры. Если число Рэлея больше некоторого критического значения, равновесие жидкости (газа) становится неустойчивым и возникают конвективные потоки.

**Число Прандтля**  $Pr$  – один из критериев подобия тепловых процессов в жидкостях и газах, учитывает влияние физических свойств теплоносителя на теплоотдачу.

## 4 Экспериментальная установка

Измерение коэффициента теплообмена исследуемых образцов (медных проволок с различными диаметрами и покрытиями) проводятся методом разогрева металлической проволоки с последующим измерением сопротивления проволоки при её охлаждении. Разогрев проволоки осуществляется прохождением через неё электрического тока; измерение сопротивления проводится с помощью программируемого цифрового микроомметра, подключенного к компьютеру. Переключение установки из режима разогрева проволоки (положение 1 на рис. 1) в режим измерения сопротивления (положение 2 на рис. 1) осуществляется механическим переключателем.

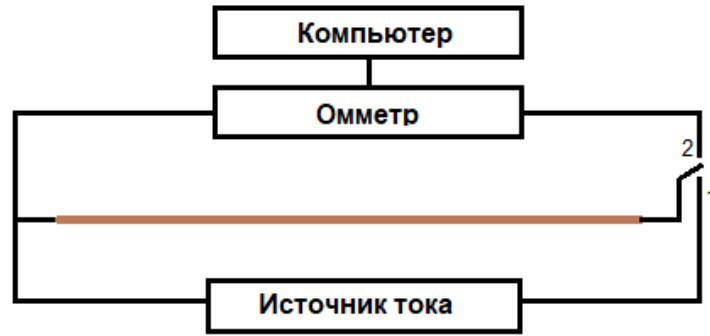


Рис. 1: Экспериментальная установка по измерению коэффициента теплообмена

Температура проволоки  $T$  зависит от её сопротивления по формуле

$$\Delta T = \frac{\Delta R}{\alpha R}, \quad (7)$$

где  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления. По изменению сопротивления проволоки можно определить зависимость температуры от времени при конвективном охлаждении образца (формула (4)). Зная временной коэффициент затухания в экспоненциальном законе изменения температуры, можно определить коэффициент теплообмена  $h$  в случае однородной цилиндрической проволоки:

$$h = \frac{Ck}{S} = \frac{c\rho\pi r^2 lk}{2\pi r l} = \frac{c\rho dk}{4}, \quad (8)$$

где  $C$  – полная теплоёмкость проволоки,  $c$  – удельная теплоёмкость материала,  $\rho$  – плотность материала,  $r$  – радиус проволоки,  $d$  – диаметр проволоки. Для двухслойного образца

$$h = \frac{k}{S}(C_1 + C_2) = \frac{k}{8d_2}(c_1\rho_1 d_1^2 + c_2\rho_2(d_2^2 - d_1^2)), \quad (9)$$

где  $d_1$  – диаметр внутренней жилы,  $d_2$  – диаметр оболочки,  $c_1, c_2, \rho_1, \rho_2$  – удельные теплоёмкости и плотности соответствующих материалов.

## 5 Результаты измерений

### 5.1 Порядок выполнения измерений и обработки данных

В ходе работы проводились измерения кинетик охлаждения исследуемых образцов из равновесного состояния, которое достигалось путём нагрева образцов электрическим током. Для каждого образца было проведено 5 измерений зависимости сопротивления от времени. Из измеренных значений сопротивления с помощью формулы (7) были получены соответствующие значения температур, построены графики зависимости температуры от времени  $\ln(\Delta T(t))$  для каждого образца. Полученные данные были линейно аппроксимированы: согласно выражению (4),

$$\ln(T - T_{out}) = -kT + \ln(T_0 - T_{out}) \quad (10)$$

. Из параметров аппроксимации (угол наклона прямой при быстром охлаждении) были найдены постоянные времени для экспоненциального охлаждения  $k$ , по формулам (8)-(9) определены экспериментальные значения коэффициентов теплообмена  $h_{exp}$ . Для каждого исследуемого образца итоговое значение  $h_{exp}$  было получено усреднением по пяти определённым экспериментальным значениям.

### 5.2 Экспериментальные зависимости температуры от времени при конвективном охлаждении

Для каждого образца далее (рис. 2-8) приведены графики зависимости логарифма изменения температуры от времени. Для каждого набора данных проведена аппроксимация линейной функцией (согласно формуле (10)), полученные значения постоянных времени для экспоненциального охлаждения образцов, необходимых для расчётов коэффициента теплообмена, представлены в таблице 2 пункта 5.3.

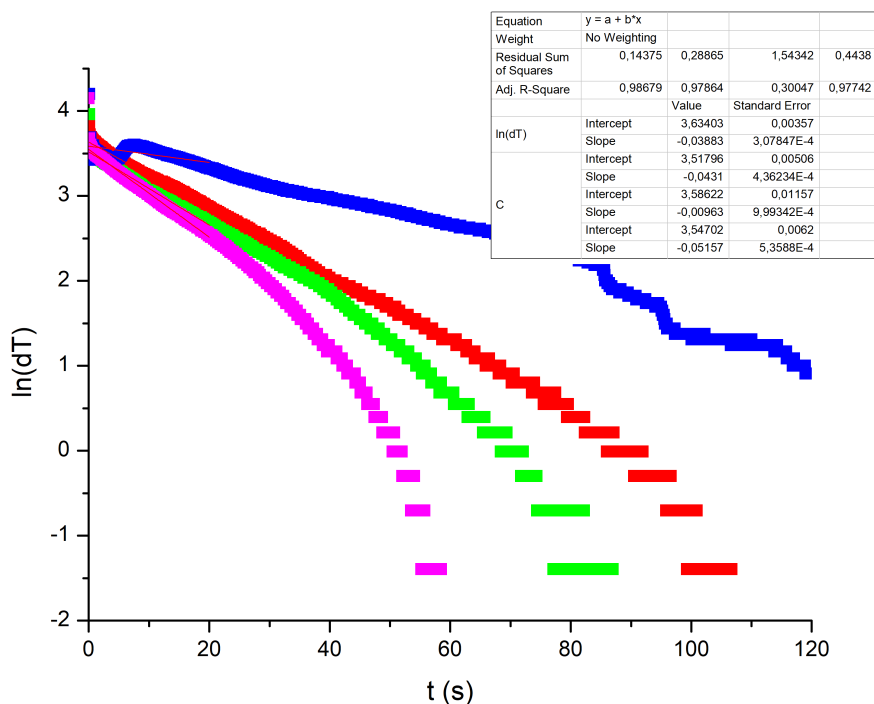


Рис. 2: Зависимость логарифма изменения температуры образца диаметром  $d_1 = 0.8$  мм с изоляцией диаметром  $d_{i1} = 1.95$  мм от времени

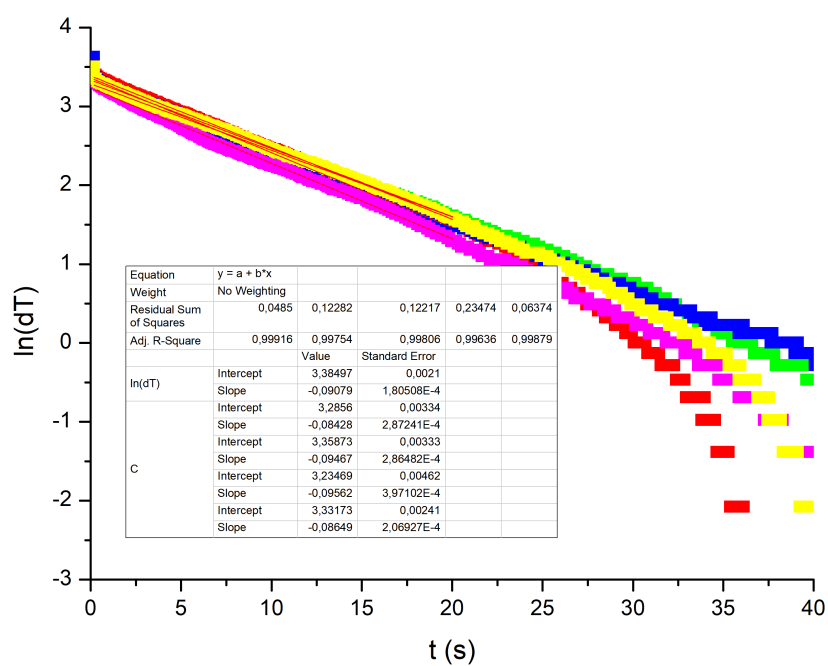


Рис. 3: Зависимость логарифма изменения температуры образца диаметром  $d_2 = 0.57$  мм с изоляцией диаметром  $d_{i2} = 0.95$  мм от времени

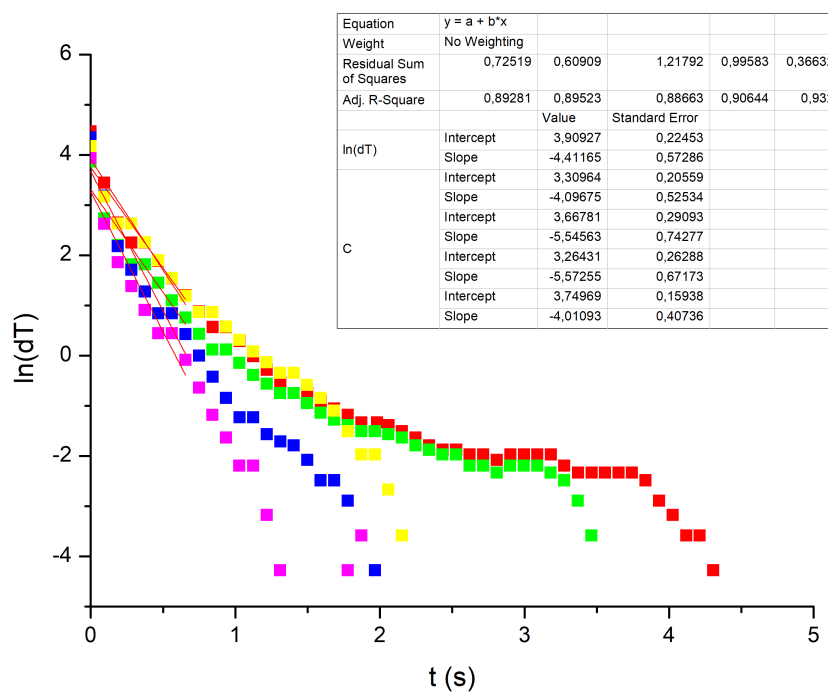


Рис. 4: Зависимость логарифма изменения температуры образца диаметром  $d_3 = 0.06$  мм от времени

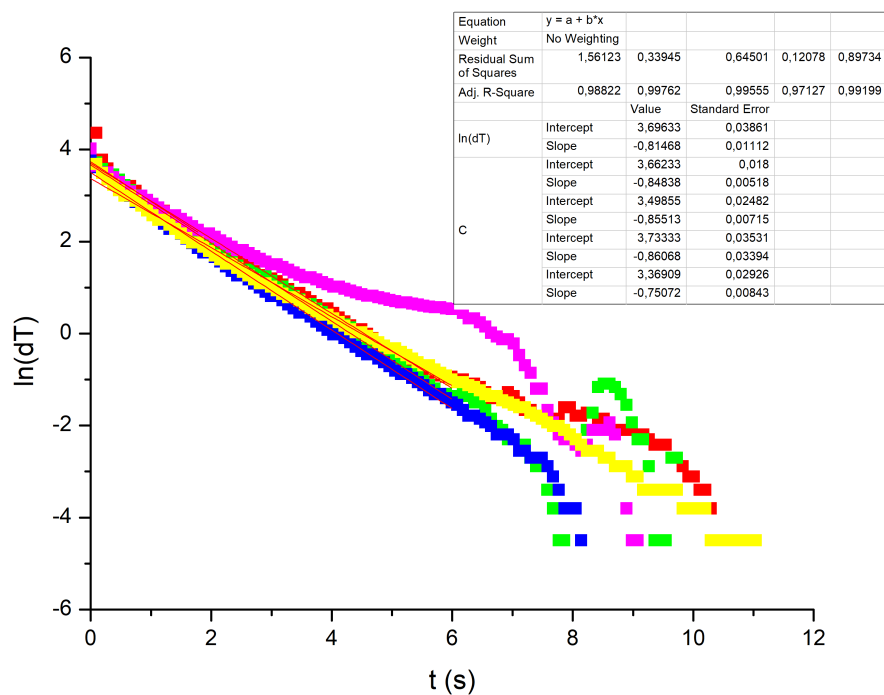


Рис. 5: Зависимость логарифма изменения температуры образца диаметром  $d_4 = 0.17$  мм от времени

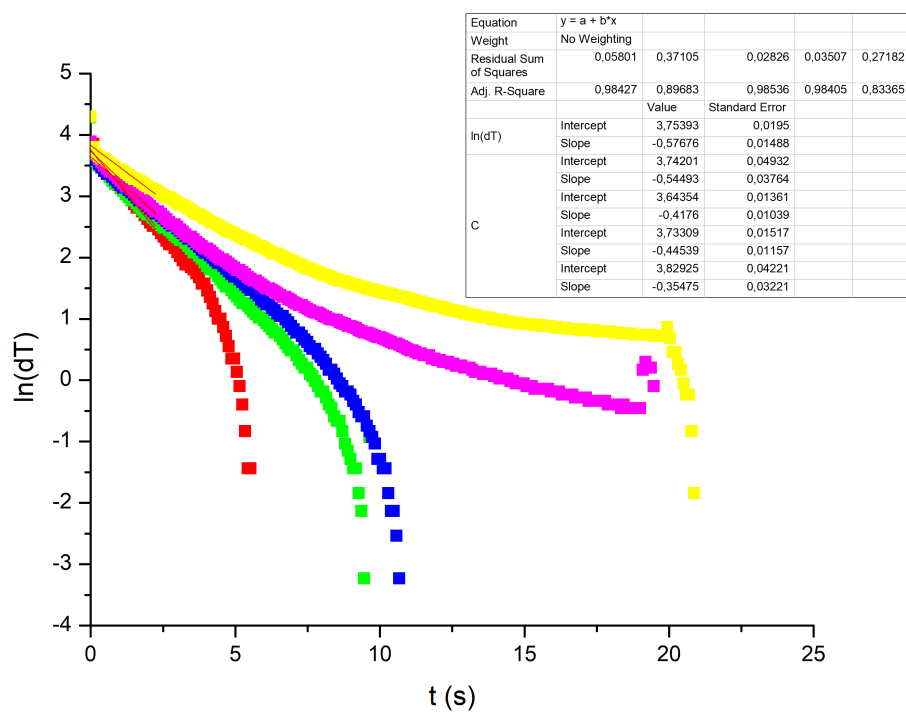


Рис. 6: Зависимость логарифма изменения температуры образца диаметром  $d_5 = 0.32$  мм от времени

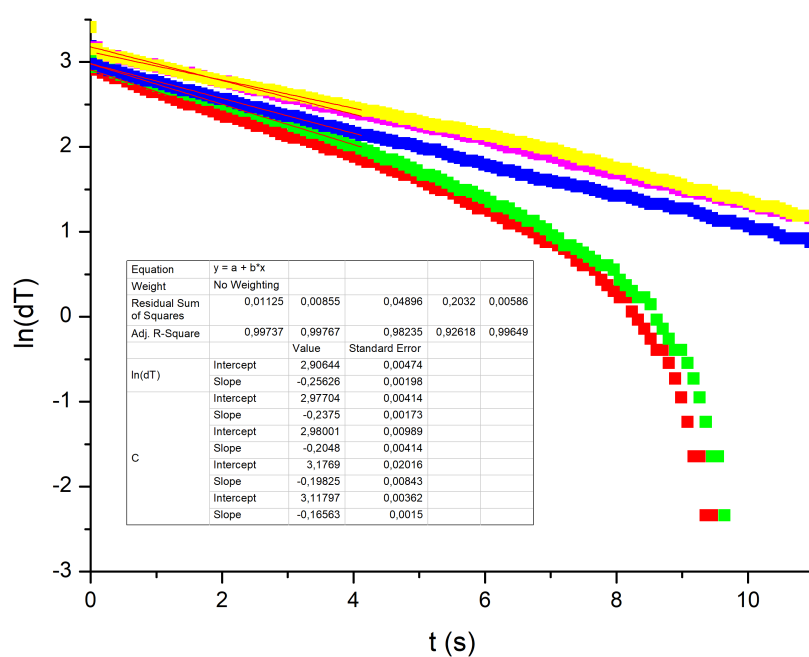


Рис. 7: Зависимость логарифма изменения температуры образца диаметром  $d_6 = 0.5$  мм от времени

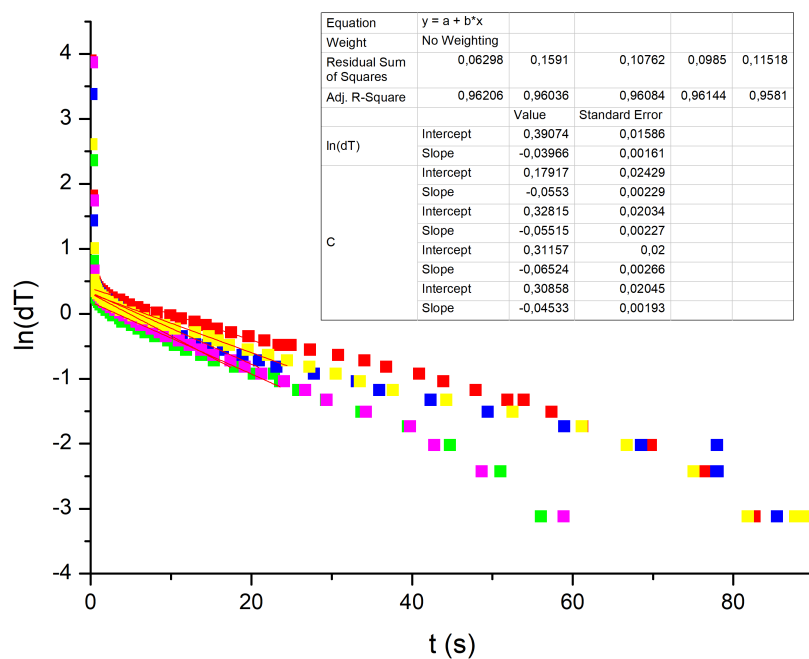


Рис. 8: Зависимость логарифма изменения температуры образца диаметром  $d_7 = 1.07$  мм от времени



### 5.3 Результаты обработки полученных данных

В таблице 2 для каждого исследуемого образца приведены результаты обработки экспериментальных зависимостей температуры от времени при конвективном охлаждении: постоянные времени для экспоненциального охлаждения образцов ( $k$ ), экспериментально полученные коэффициенты теплообмена  $h_{exp}$ , числа Био ( $Bi_{exp}$ ). Также приведены теоретические оценки коэффициента теплообмена  $h$  для каждого образца, вычисленные по формуле (6) ( $h_{th}$ ). В таблице 1 приведены используемые в расчётах параметры материалов, из которых изготовлены исследуемые образцы.

Таблица 1: Параметры материалов исследуемых образцов

Материал	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$c$ , Дж/(кг·К)	$\alpha$ , Ом/К	$\lambda$ , Вт/(м·К)
Медь	8920	385	0.0038	401
ПВХ	1340	880	—	0.19

Таблица 2: Экспериментальные и теоретические оценки параметров теплообмена образцов

№	$d$ , мм	$R$ , мОм	$k$ , с <sup>-1</sup>	$h_{exp}$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	$h_{th}$ , (Вт/м <sup>2</sup> ·К)	$Bi_{exp} \cdot 10^{-5}$
1	0.8 (изол. 1.95)	9.4	$0.036 \pm 0.018$	$24.7 \pm 13.6$	12	$5200 \pm 2900$
2	0.57 (изол. 0.95)	18.5	$0.902 \pm 0.005$	$44.0 \pm 3.3$	17	$6600 \pm 500$
3	0.06	1671	$4.73 \pm 0.77$	$244 \pm 39$	156	$1.8 \pm 0.3$
4	0.17	208	$0.826 \pm 0.047$	$121 \pm 6.9$	55.2	$2.6 \pm 0.2$
5	0.32	58.8	$0.468 \pm 0.093$	$129 \pm 26$	29.4	$5.1 \pm 1.0$
6	0.5	24.1	$0.214 \pm 0.036$	$91.9 \pm 15.5$	19	$5.7 \pm 0.9$
7	1.07	5.3	$0.052 \pm 0.010$	$47.8 \pm 9.19$	9	$6.4 \pm 1.2$

### 5.4 Зависимость коэффициента теплообмена $h$ от диаметра медной проволоки

Для пяти образцов без изоляции был исследован характер зависимости коэффициента теплообмена от диаметра проволоки. Анализ был проведён для экспериментальных значений  $h_{exp}$  и теоретических оценок  $h_{th}$ , график зависимости представлен на рис. 9. Видно, что при уменьшении диаметра резко возрастает коэффициент теплообмена (характер зависимости гиперболический).

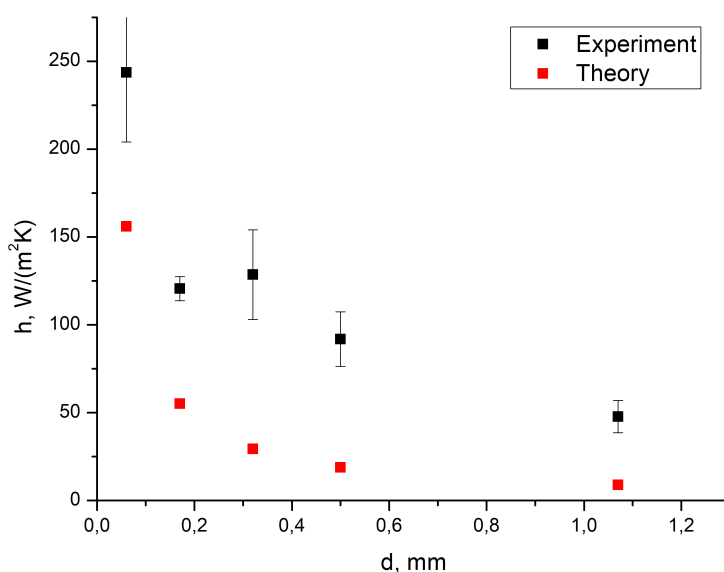


Рис. 9: Зависимость экспериментального и теоретического значений  $h$  от диаметра исследуемого образца

## 6 Вывод

В ходе работы был исследован экспериментальный метод измерения коэффициента конвективного теплообмена с воздухом для протяженных цилиндрических тел. Коэффициент теплообмена  $h$  был оценен для различных образцов (медные провода с изоляцией и без неё) теоретически, а также определён экспериментально по характеру кинетик остывания образцов. Результаты расчётов представлены в таблице 2.

Значения коэффициентов теплообмена, полученные экспериментально, оказались намного выше, чем оцененные теоретически. Этому могли способствовать следующие факторы:

- усиление конвективного теплоотвода потоками окружающего воздуха (открывание дверей, работа в помещении вентилятора)
- отвод тепла через латунные пластины, фиксировавшие образцы

Для проводов с изоляцией коэффициент конвективного теплообмена меньше, чем для проводов без изоляции сравнимых диаметров, то есть для проводов без изоляции охлаждение происходит быстрее. Это связано с сильным различием теплопроводностей меди и материала изоляции – ПВХ (теплопроводность последнего меньше на 3 порядка).

По экспериментальным данным в ходе работы были также определены числа Био для исследованных образцов. Полученные значения оказались малыми (порядка  $10^{-5}$ ) для проводов без изоляции, что позволяет считать их термически тонкими. Для проводов с изоляцией числа Био выше (порядка  $10^{-2}$ ); для этих образцов закон охлаждения, описываемый формулой (4), выполняется неточно.