

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное

учреждение высшего образования

Томский государственный университет систем управления и

радиоэлектроники

(ТУСУР)

А. В. Казаков

ИЗУЧЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ВОЗДУХА

Методические указания по выполнению лабораторной работы
для студентов всех специальностей

Томск
2023

УДК 536.23
ББК 22.3
К 14

Рецензент

Климов А.С., профессор кафедры физики ТУСУР,
доктор техн. наук

Одобрено на заседании каф. физики, протокол № 104 от 16.04.2023.

Казаков, Андрей Викторович

К 14 Изучение теплопроводности воздуха : метод. указания по выполнению лабораторной работы / А. В. Казаков, – Томск : Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2023. – 15 с.

Представлена краткая теория по разделу физики «Элементарная кинетическая теория газов», в частности рассмотрены теория процесса теплопроводности газов и величины, характеризующие данный процесс. Описаны экспериментальная установка для исследования процесса теплопроводности воздуха, а также методика проведения измерений и обработки результатов.

Для студентов ТУСУРа, обучающихся по всем направлениям подготовки и специальностям.

УДК 536.23
ББК 22.3

© Казаков А. В., 2023
© Томск. гос. ун-т систем упр.
и радиоэлектроники, 2023

Оглавление

| | |
|---------------------------------------------|----|
| ВВЕДЕНИЕ..... | 4 |
| 1 КРАТКАЯ ТЕОРИЯ | 4 |
| 2 ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ..... | 7 |
| 3 ЗАДАНИЕ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ | 9 |
| 4 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ | 14 |
| 5 СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ..... | 15 |

ВВЕДЕНИЕ

Целью настоящей работы является изучение явления теплопроводности воздуха, установление основных закономерностей этого явления и определение коэффициента теплопроводности.

1 КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Теплопроводность – способность материальных тел проводить тепловую энергию от более нагретых частей тела к менее нагретым частям тела путём хаотического движения частиц тела (атомов, молекул, электронов и т.п.). Передача тепловой энергии может происходить в любых телах с неоднородным распределением температур, но механизм переноса теплоты будет зависеть от агрегатного состояния вещества. В настоящей работе рассматривается теплопроводность газов.

Процесс теплопроводности можно понимать как движение (перенос) квазиматериальной субстанции – тепла. Величина, характеризующая процесс теплопроводности, то есть перемещение (движение) тепла, это вектор под названием плотность теплового потока \vec{j}_T . Причину теплопроводности, то есть неравномерность распределения температуры T в пространстве характеризует градиент температуры $\text{grad } T$ (∇T).

Причину теплопроводности ($\text{grad } T$) и результат (\vec{j}_T) связывает физический закон, который называется законом Фурье. Плотность теплового потока \vec{j}_T в любой точке пространства пропорциональна градиенту температуры $\text{grad } T$ в этой точке:

$$\vec{j}_T = -\chi \cdot \text{grad } T = -\chi \cdot \nabla T. \quad (1.1)$$

Размерность плотности потока тепла \vec{j}_T в СИ – Дж/(м²·с). Коэффициент пропорциональности χ называется **коэффициентом теплопроводности**, который определяется как сортом газа, так и условиями: давлением, температурой. В СИ единицей измерения коэффициента теплопроводности является Вт/(м·К). Самым существенным в законе Фурье является то, что плотность теплового потока направлена против градиента температуры, то есть в сторону наиболее быстрого убывания температуры.

Запишем закон Фурье в развернутом виде

$$\vec{j}_T = -\chi \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial x} \cdot \vec{e}_x + \frac{\partial T}{\partial y} \cdot \vec{e}_y + \frac{\partial T}{\partial z} \cdot \vec{e}_z \right), \quad (1.2)$$

где \vec{e}_x , \vec{e}_y и \vec{e}_z – орты координатных осей X , Y и Z соответственно.

Если тепловой поток одномерен и направлен только вдоль одной оси, например, X , то

$$j_T(x,t) = -\chi \cdot \frac{\partial T(x,t)}{\partial x}. \quad (1.3)$$

Выражение (1.3) представляет собой одномерную форму записи закона Фурье. Если поток теплоты не изменяется во времени, то можно записать

$$j_T = -\chi \cdot \frac{dT}{dx}. \quad (1.4)$$

Рассмотрим газ, заключенный между двумя поверхностями, имеющими температуры T_1 и T_2 . Если эти температуры поддерживаются постоянными, то через газ устанавливается стационарный поток теплоты. Для простоты, чтобы рассмотреть одномерную задачу, поместим газ между двумя параллельными плоскостями (рисунок 1.1) и ось X направим перпендикулярно к этим плоскостям. Тогда вдоль оси X будет градиент температуры dT/dx .

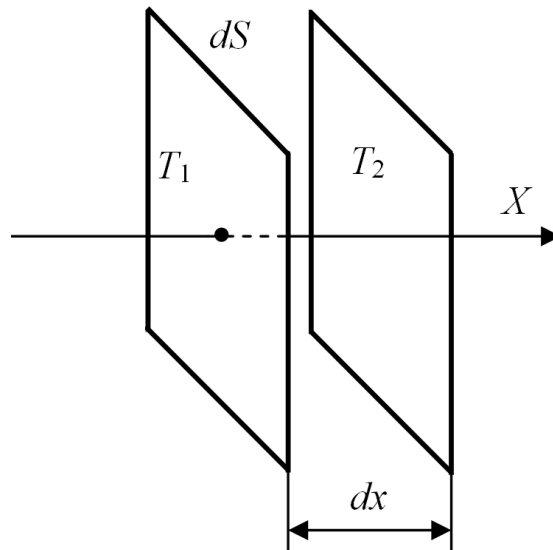


Рисунок 1.1. Схема рассмотрения явления теплопроводности

Вдоль осей Y и Z , расположенным параллельно к ограничивающим газ поверхностям, температура не меняется. Рассмотрим поток теплоты через площадку $dS = dy \cdot dz$, помещенную

перпендикулярно к оси X . Согласно закону Фурье, количество теплоты δQ , перенесенное через площадку dS за время dt , равно

$$\delta Q = -j_T \cdot dS \cdot dt = -\chi \cdot \frac{dT}{dx} \cdot dS \cdot dt. \quad (1.5)$$

Выражение для δQ слегка изменяется, если рассмотреть вместо плоской цилиндрическую конфигурацию. Пусть источником тепла служит цилиндр радиуса R_1 и высоты l много большей радиуса (рисунок 1.2). В этом случае поток тепла через цилиндрическую поверхность высотой l и радиуса r ($R_1 < r < R_2$) равен

$$\frac{\delta Q}{dt} = -\chi \cdot \frac{dT}{dr} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot l. \quad (1.6)$$

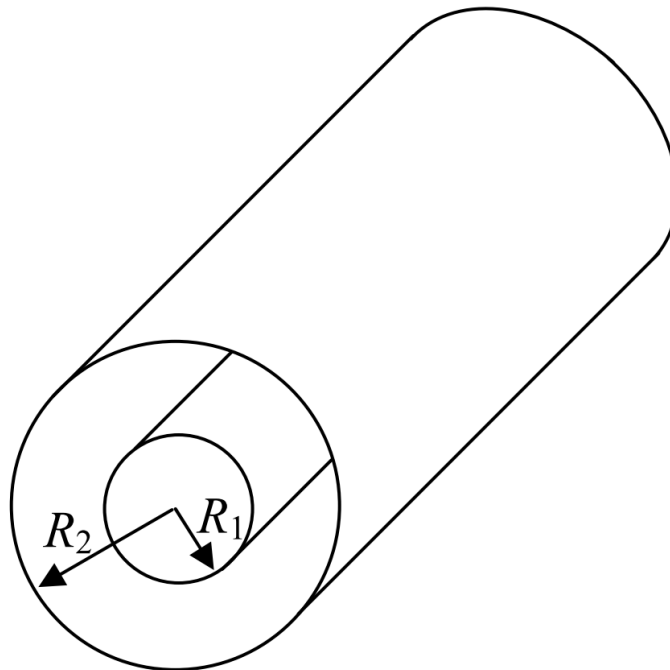


Рисунок 1.2 – Схема рассмотрения теплопроводности в цилиндрической конфигурации

Введя обозначение $P = \delta Q/dt$ (тепловая мощность), перепишем выражение (1.6)

$$P = -\chi \cdot \frac{dT}{dr} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot l. \quad (1.7)$$

Полагая теперь, что приемником тепла является цилиндрическая поверхность радиуса R_2 , а температуры внутреннего и внешнего цилиндров равны T_1 и T_2 соответственно, можно проинтегрировать (1.7) по r в пределах от R_1 до R_2 . В результате интегрирования

получим

$$\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right) = \chi \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot l}{P} \cdot (T_1 - T_2). \quad (1.8)$$

Отсюда может быть получено выражение:

$$T_1 - T_2 = \frac{1}{\chi} \cdot \frac{P}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right). \quad (1.9)$$

Выражение (1.9) следует рассматривать как рабочую формулу для выполнения настоящей лабораторной работы.

2 ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Установка для проведения экспериментов представляет собой настольный блок, внешний вид которого схематично представлен на рисунке 2.1.

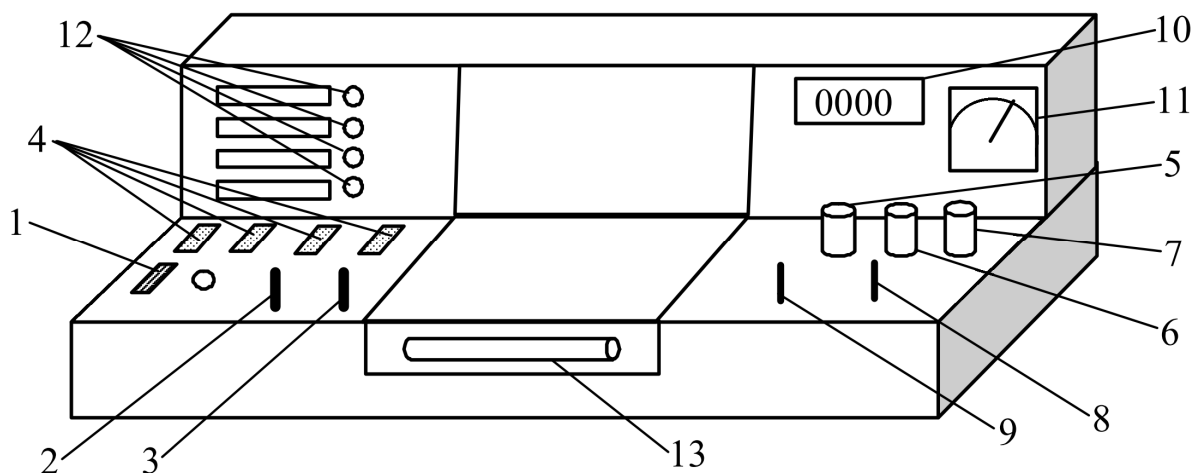


Рисунок 2.1 – Схема внешнего вида экспериментальной установки

На горизонтальной панели блока расположены органы управления, на вертикальной – контрольно-измерительные приборы. К органам управления относятся: выключатель 1 «Сеть»; ручки 2 «Давление» и 3 «Реверс» управления электроприводом (в данной работе не используются); кнопки 4 выбора лабораторной работы; ручки 5 «Накал лампы», 6 «Напряжение анода» и 7 «Нагрев нити»; переключатели 8 и 9 режимов работы измерительных приборов 10 и 11. Лампочки 12 служат для индикации выбранной лабораторной работы. В настоящей работе в качестве цилиндрического источника тепла используется металлическая нить,

натянута вдоль оси симметрии цилиндра 13, который является приемником тепла. Цилиндр 13 с нитью находится под оргстеклом в передней части установки.

Электрическая схема узла, предназначенного для проведения эксперимента, показана на рисунке 2.2.

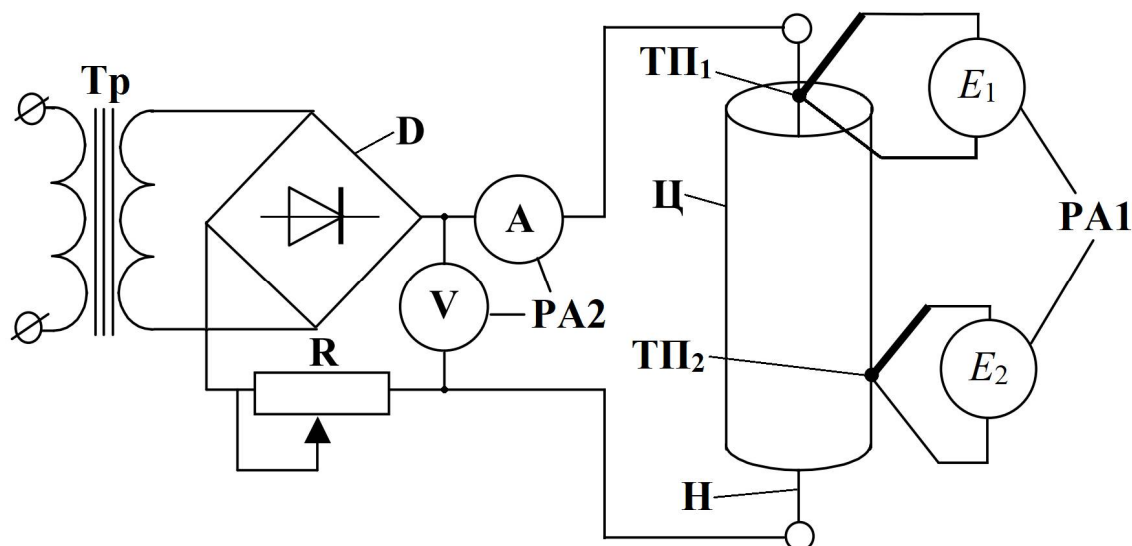


Рисунок 2.2 – Электрическая схема рабочего узла

Основные элементы схемы взаимодействуют следующим образом. Трансформатор **Тр** выдает напряжение порядка 1 В на диодный мост **Д**, с которого выпрямленное напряжение поступает на нить накала **Н**, расположенную на оси приемного цилиндра **Ц**. Ток накала и напряжение на нити измеряются амперметром **А** и вольтметром **В**, соответственно. Функции вольтметра и амперметра в установке выполняет один прибор 11 (**РА2**), который измеряет напряжение в положении 1 переключателя 8 и ток – в положении 2. Температуры нити и цилиндра измеряются термопарами **ТП** (медь – константан), подключенными к милливольтметрам **mV**, которые измеряют возникающие термо-ЭДС **E** на концах термопар. Функции милливольтметров выполняет цифровой прибор 10 (**РА1**), который подсоединяется к термопаре **ТП₁**, измеряющей температуру нити, в положении 2 переключателя 9 и к термопаре **ТП₂**, измеряющей температуру цилиндра, в положении 1 переключателя 9. Переменный резистор **Р**, управляемый рукояткой 7 «Нагрев нити», служит для регулировки тока нагрева нити. Геометрические параметры источника и приемника тепла: радиус нити $R_1 = 0,6$ мм, радиус цилиндра $R_2 = 9$ мм, высота цилиндра $l = 120$ мм.

3 ЗАДАНИЕ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

3.1 Задание:

Реализовать в эксперименте состояние баланса между теплом, выделяющимся в накаливаемой нити, и теплом, передающимся за счет теплопроводности воздуха от накаливаемой нити внешнему цилиндру. По результатам эксперимента убедиться в наличии линейной зависимости между выделяемой мощностью и разностью температур нити и цилиндра, рассчитать коэффициент теплопроводности воздуха.

3.2 Порядок выполнения работы:

3.2.1 Убедиться, что все органы управления находятся в исходном состоянии: выключатель 1 и кнопки 4 (рисунок 2.1) выключены.

3.2.2 Вставить штепсель в розетку и включить установку выключателем 1. При этом должна загореться сигнальная лампочка, расположенная рядом с выключателем.

3.2.3 С помощью одной из кнопок 4 включить работу «Теплопроводность воздуха». О включении свидетельствует одна из лампочек 12.

3.2.4 Вращая рукоятку «Нагрев нити» против часовой стрелки, установить минимальный ток через нить накала. Выждать 2 – 3 минуты и занести значения тока I , напряжения U с прибора 11 (рисунок 2.1) и показания термопар E_1 и E_2 с прибора 10 в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 – Результаты измерений

| № измер. | U , В | I , А | P , Вт | E_1 , мВ | E_2 , мВ | T_1 , °С | T_2 , °С | $T_1 - T_2$, °С | Примеч. |
|----------|---------|---------|----------|------------|------------|------------|------------|------------------|-------------------------------------|
| 1 | | | | | | | | | $\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right) =$ |
| 2 | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | |

E_1 – термо-ЭДС термопары **ТП₁** (нить);
 E_2 – термо-ЭДС термопары **ТП₂** (цилиндр);
 T_1 – температура нити;
 T_2 – температура цилиндра.

Примечание. Если эксперимент проводится на установке, сопряженной с компьютером, то значения тока I , напряжения U , ЭДС E_1 и E_2 считываются из соответствующих окон на экране монитора. При выполнении работы сопряженной с компьютером следовать инструкциям, приведенным в разделе 3.3.

3.2.5 Повторить пункт 3.2.4 для 7 – 8 значений тока нагрева нити, постепенно увеличивая его. Для более равномерного увеличения нагрева нити рекомендуется, определив интервал изменения напряжения (тока) накала нити, приблизительно оценить шаг, с которым необходимо увеличивать напряжение (ток) накала нити.

3.2.6 Пользуясь градуировочной кривой (рисунок 3.1), определите температуры нити T_1 и цилиндра T_2 по измеренным термо-ЭДС E_1 и E_2 , соответственно. Занести полученные значения T_1 и T_2 в таблицу 3.1. Вместо градуировочной кривой температуры можно вычислить, используя приближенную формулу

$$T = 20,7 + 47 \cdot E - 0,27 \cdot E^2, \quad (3.1)$$

где T в градусах Цельсия ($^{\circ}\text{C}$), E – соответствующая термо-ЭДС в мВ.

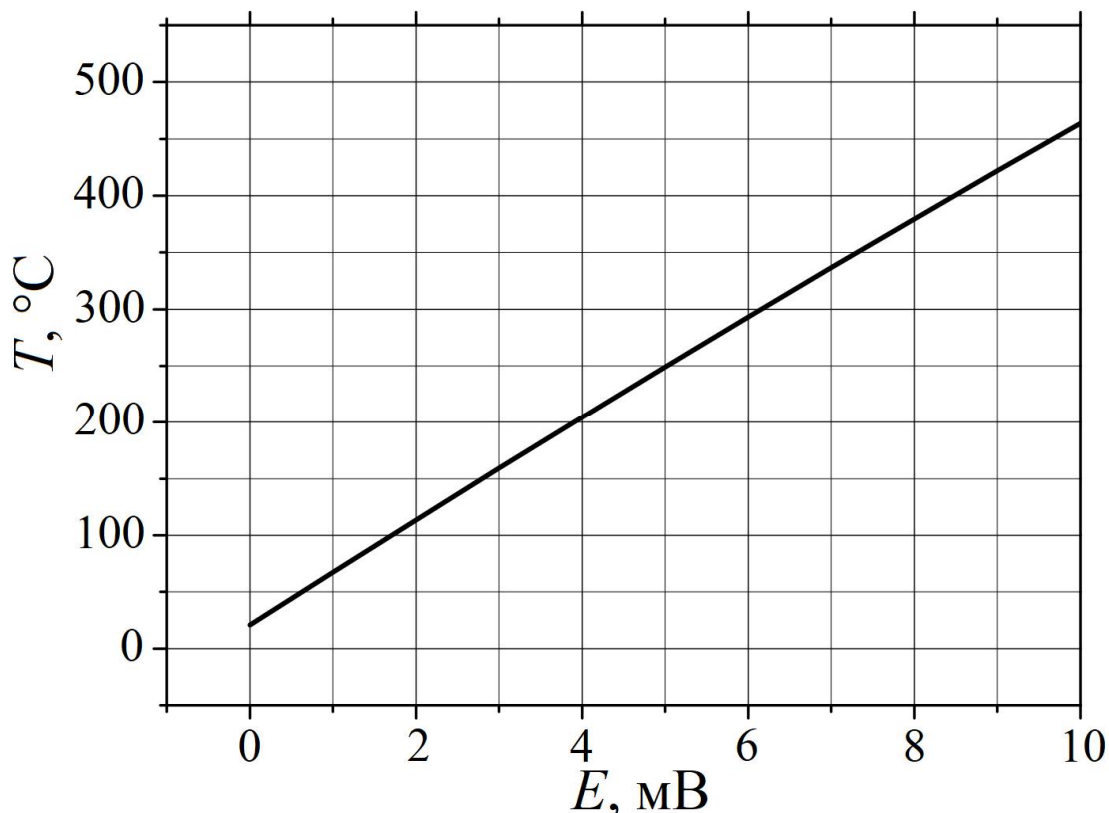


Рисунок 3.1 – Градуировочная кривая термопары медь – константан. Опорная температура 20°C

3.2.7 Рассчитать разность температур T_1 и T_2 ($T_1 - T_2$) и занести полученные значения в таблицу 3.1.

3.2.8 По измеренным значениям I , U рассчитать мощность P и занести значения в соответствующие ячейки таблицы 3.1.

3.2.9 Используя геометрические параметры $R_1 = 0,6$ мм и $R_2 = 9$ мм, рассчитать $\ln(R_2/R_1)$ и занести результат в таблицу 3.1.

3.2.10 Рассчитать погрешности разности температур ($T_1 - T_2$) и мощности P .

3.2.11 Построить график зависимости разности температур ($T_1 - T_2$) от мощности P . Нанести на график доверительные интервалы для ($T_1 - T_2$) и P .

3.2.12 Если точки зависимости разности температур ($T_1 - T_2$) от мощности P укладываются на прямую в пределах их погрешностей (доверительных интервалов), то полученная экспериментальная зависимость соответствует теоретической и описывается выражением (1.9). Если ($T_1 - T_2$) зависит от P не линейно, то лабораторная работа выполнена некорректно.

3.2.13 По наклону прямой зависимости ($T_1 - T_2$) от P вычислить угловой коэффициент. Используя полученное значение углового коэффициента, рассчитать коэффициент теплопроводности χ воздуха и его погрешность.

3.2.14 Сравнить полученное значение коэффициента теплопроводности χ с табличным ($\chi = 0,0257$ Вт/(м·град)). Сделать выводы по работе.

3.3 Порядок выполнения работы на установке, сопряженной с компьютером:

3.3.1 Запустить компьютер и дождаться загрузки Windows. Затем на «Рабочем столе» открыть папку «Лаборатория». Выбрать из списка лабораторную работу «Изучение теплопроводности воздуха». Во вновь открывшемся окне появится стенд (панель) данной работы, в окнах которого отображаются измеряемые величины, таблица и график (рисунок 3.2).

3.3.2 Включить питание лабораторной установки кнопкой 1 «Сеть» (рисунок 2.1). При этом загорится сигнальная лампочка, расположенная рядом с кнопкой 1. Одной из кнопок 4 включить работу «Теплопроводность воздуха», после чего загорится одна из сигнальных лампочек 12, и на экране компьютера в окнах стенда

« $U_p, В$ », « $I_p, А$ », « $P_p = U_p \cdot I_p, Вт$ », «ТЭДС нити, мВ» и «ТЭДС цил., мВ» появятся напряжение U , ток I , мощность P накала нити, термо-ЭДС E_1 (нить) и E_2 (цилиндр) соответственно.

3.3.3 Вращая рукоятку 7 «Нагрев нити» против часовой стрелки, установить минимальный ток через нить накала. Выждать 2 – 3 минуты, убедиться, что цифры в окнах « $U_p, В$ », « $I_p, А$ », « $P_p = U_p \cdot I_p, Вт$ », «ТЭДС нити, мВ» и «ТЭДС цил., мВ» не изменяются и зафиксировать показания, нажав мышью кнопку «Зафиксировать».

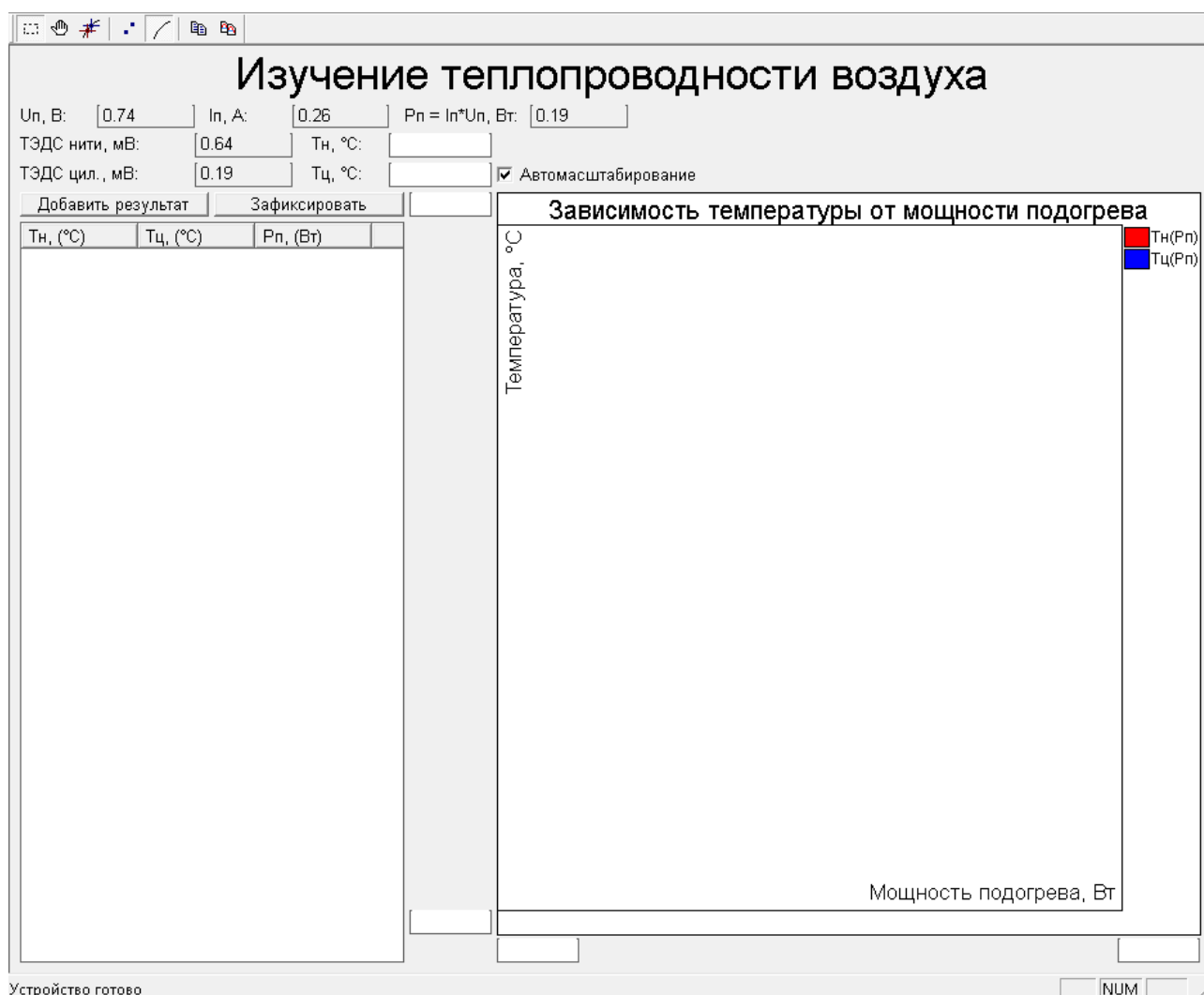


Рисунок 3.2 – Внешний вид окна стенда лабораторной работы

3.3.4 По полученным данным определить температуры нити T_1 и цилиндра T_2 , пользуясь градуировочным графиком (рисунок 3.1.) либо формулой (3.1). Использование формулы предпочтительнее, поскольку позволяет повысить точность вычислений. Найденное значение температуры нити T_1 следует занести в окно « $T_n, °С$ », а

значение температуры цилиндра T_2 - в окно «Тц, °С». После этого нажатием кнопки «Добавить результат» записать значения температур и мощности в таблицу на стенде.

3.3.5 Повторить пункты 3.3.3 и 3.3.4 для 7 – 8 значений тока нагрева нити, постепенно увеличивая его. Для более равномерного увеличения нагрева нити рекомендуется, определив интервал изменения напряжения (тока) накала нити, приблизительно оценить шаг, с которым необходимо увеличивать напряжение (ток) накала нити. Появляющиеся в правой части стенда графики («Зависимость температуры от мощности подогрева») позволяют оценить качество проведенных измерений. Экспериментальные точки должны укладываться на плавные кривые. Причем кривая зависимости температуры нити T_1 от мощности P (на стенде «Тн(Рп)») должна быть расположена выше кривой зависимости температуры цилиндра T_2 от P (на стенде «Тц(Рп)'). Наличие резко выпадающих точек означает промахи измерений. Эти точки следует удалить, выделив мышью соответствующую строку таблицы и нажав кнопку «Удалить результат».

3.3.6 Перенести результаты измерений в таблицу 3.1 в рабочей тетради и произвести обработку в соответствии с пунктами 3.2.7 – 3.2.14.

3.3.7 Для вычислений, построения прямых линий и расчета угловых коэффициентов методом наименьших квадратов, а также расчета погрешностей можете воспользоваться программами, ярлыки которых расположены на рабочем столе. Для этого можно копировать данные, нажав мышью кнопку «Копировать данные в буфер», расположенную в верхней левой части окна стенда.

3.3.8 По завершении работы следует установить минимальный ток накала лампы и выключить установку кнопками 4 и 1 (рисунок 2.1), последовательно. Затем выйти из среды «Лаборатория», закрыв ее мышью, и выключить компьютер.

4 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

4.1 Какова цель работы?

4.2 В чем состоит суть явления теплопроводности?

4.3 Физический смысл и размерность коэффициента теплопроводности.

4.4 Зависимость коэффициента теплопроводности от параметров газа.

4.5 Закон Фурье. Его физическое толкование.

4.6 Как экспериментально определяется коэффициент теплопроводности?

4.7 О чем свидетельствует линейность графика зависимости $(T_1 - T_2)$ от P и, наоборот, как может быть истолковано отклонение экспериментальных точек от прямой?

4.8 В чем преимущество использования линеаризованного графика для определения коэффициента теплопроводности?

4.9 В чем отличие теплопроводности как механизма передачи тепла от конвекции?

4.10 Какие условия должны быть соблюдены для обеспечения возможности использования приведенных в разделе 1 «Краткая теория» модельных представлений?

4.11 Какие погрешности могут возникнуть при отклонении экспериментальной ситуации от модели?

5 СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

5.1 Савельев И. В. Курс общей физики: в 3 т. [Электронный ресурс]: учеб. / И. В. Савельев. – СПб. : Лань, 2018. – Т. 1. Механика. Молекулярная физика. – 2018. – 436 с. – Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/98245> (дата обращения 10.04.2023)

5.2 Бурдовицин В. А. Молекулярная физика и термодинамика [Электронный ресурс]: учеб.-метод. пособие по аудиторным практическим занятиям и самостоятельной работе / В. А. Бурдовицин. – Томск : Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2018. – 85 с. – Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/7520> (дата обращения 10.04.2023)

5.3 Зенин А. А. Общие требования и правила оформления отчета о лабораторной работе по физике [Электронный ресурс]: метод. указания / А. А. Зенин. – Томск : Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2019. – 20 с. – Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/8957> (дата обращения 10.04.2023)

5.4 Мухачев В. А. Оценка погрешностей измерений [Электронный ресурс]: метод. указания к лабораторной работе / В. А. Мухачев, А. Л. Магазинников. – Томск : Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2012. – 24 с. – Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/1099> (дата обращения 10.04.2023)