

*МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ*
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Курганский государственный университет»

Кафедра «Цифровая энергетика»

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Методические указания
к выполнению лабораторной работы
по дисциплине «Тепломассообмен»

Курган 2026

Кафедра: «Цифровая энергетика».

Дисциплины: «Тепломассообмен», «Техническая термодинамика и теплопередача», «Теплофизика».

Составил: канд. техн. наук, доцент В. А. Савельев

Печатается в соответствии с планом издания, утверждённым методическим советом университета 17.12.2025 г.

Утверждены на заседании кафедры 06.02.2026 г.

Лабораторная работа

Определение теплопроводности твердых тел

Цель работы: изучение явления теплопроводности и методики определения ее параметров в стационарном режиме для твердых тел, измерение коэффициента теплопроводности заданного образца и определение его температурной зависимости.

Общие сведения

Теплообмен – самопроизвольный необратимый процесс переноса теплоты в пространстве с неоднородным полем температуры. Под процессом распространения теплоты понимается обмен внутренней энергией между отдельными элементами, областями рассматриваемой среды.

Теплообмен – сложное явление, которое условно разделяют на ряд простых, принципиально отличных друг от друга процессов: **теплопроводность (кондукция); конвекция (перемешивание); тепловое излучение (радиация).**

Перенос теплоты при непосредственном контакте более нагретых элементов тела (или среды) с менее нагретыми, осуществляемый посредством хаотического движения и взаимодействия микрочастиц (молекул, атомов, электронов, ионов), называется **теплопроводностью**.

За счет взаимодействия друг с другом быстродвижущиеся микрочастицы отдают свою энергию более медленным, перенося теплоту из зоны с более высокой в зону с низкой температурой. Явление теплопроводности наблюдается во всех телах: жидких, твердых и газообразных.

Конвекция – процесс переноса теплоты, происходящий за счет перемещения больших масс (макромасс) вещества в пространстве, поэтому наблюдается только в жидких и газообразных телах. Объемы жидкости или газа, перемещаясь из области с большей температурой в область с меньшей температурой, переносят с собой теплоту.

Тепловое излучение представляет собой процесс распространения внутренней энергии излучающего тела путем электромагнитных волн. Процесс превращения внутренней энергии вещества в энергию излучения, переноса излучения и его поглощения веществом называется теплообменом излучением.

В данной лабораторной работе объектом изучения является **теплопроводность**, механизм которой заключается в обмене энергией между микрочастицами в сплошной среде. В металлах перенос теплоты

осуществляется путем движения (диффузии) свободных электронов (электронная теплопроводность). В диэлектриках теплопроводность осуществляется путем непосредственной передачи теплового движения за счет упругих колебаний кристаллической решетки (фононная теплопроводность). В газах и жидкостях перенос теплоты теплопроводностью происходит вследствие обмена энергией при соударении молекул, имеющих различную скорость теплового движения.

В любом из этих случаев необходимым условием для возникновения теплопроводности является наличие отличной от нуля разности температур между телами или различными точками сплошной среды.

Исследование теплопроводности сводится к изучению изменения температуры тела. Распределение температуры в теле называется температурным полем. Различают стационарное и нестационарное температурные поля. Когда температура изменяется с течением времени и от одной точки к другой, тогда наблюдается неустановившийся тепловой режим с **нестационарным** температурным полем. Если тепловой режим является установившимся, то температура в каждой точке поля с течением времени остается неизменной, и такое температурное поле называется **стационарным**.

Явление теплопроводности в стационарном режиме описывается законом Фурье, который устанавливает, что количество теплоты dQ_τ (Дж) проходящее через элемент изотермической поверхности dF (м) за промежуток времени dt (с), пропорционально температурному градиенту $\partial t / \partial x$:

$$dQ = -\lambda \partial t / \partial x d F d \tau. \quad (1)$$

Знак «минус» показывает, что вектора теплового потока и градиента температуры направлены в противоположные стороны. Вектор градиента температуры направлен в сторону увеличения температуры, а перенос теплоты происходит в направлении ее уменьшения.

Опытным путем установлено, что коэффициент пропорциональности в уравнении (1) есть физический параметр вещества. Он характеризует способность вещества проводить теплоту и называется коэффициентом теплопроводности λ , Вт/м·К. В общем случае коэффициент теплопроводности зависит от температуры, давления и рода вещества.

Введем понятия теплового потока ($\Phi = Q/\tau$) Вт, (τ - время с) и плотности теплового потока $q = Q/\tau F$ (Вт/м²) F – площадь сечения теплового потока (м²). Ограничимся одномерным случаем, когда температура изменяется вдоль только одной координаты, например x .

Интенсивность переноса тепла в твердом теле (плотность теплового

потока q ,) определяется, согласно закону Фурье, температурным градиентом ($grad\ t = \frac{dt}{dx}$) и коэффициентом теплопроводности λ (2)

$$q = -\lambda \frac{dt}{dx}, \text{ Вт/м}^2. \quad (2)$$

Значения коэффициента теплопроводности веществ находятся в пределах от тысячных долей до нескольких сотен Вт/(м·К). Это значение определяется составом вещества, его агрегатным состоянием, степенью однородности.

Коэффициент теплопроводности λ численно равен количеству тепловой энергии, проходящей через единицу площади изотермической поверхности в единицу времени при температурном градиенте, равном единице. Он является физическим параметром вещества, характеризующим его способность проводить теплоту. Знание его величины необходимо при тепловых расчетах различных механических устройств, нагревательных и плавильных печей, энергетических устройств и т. д. Для разных материалов он имеет различные значения и зависит от структуры вещества, температуры его, плотности, влажности и т. д.

Лучшими проводниками теплоты являются металлы, у которых λ изменяется от 3 до 418 Вт/м·К. Коэффициент теплопроводности чистых материалов, за исключением алюминия, с возрастанием температуры убывает. Наиболее высоким коэффициентом теплопроводности обладает чистое серебро ($\lambda = 418 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$).

Коэффициенты теплопроводности теплоизоляционных материалов, имеющих пористую структуру, при повышении температуры возрастают по линейному закону и изменяются в пределах от 0,02 до 3,0 Вт/м·К. К теплоизоляционным относятся материалы с $\lambda < 0,25 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$.

Коэффициенты теплопроводности большинства капельных жидкостей с повышением температуры убывают и лежат в пределах от 0,08 до 1,5 Вт/м·К.

Коэффициенты теплопроводности газов при повышении температуры возрастают и изменяются от 0,05 до 0,6 Вт/м·К.

В большинстве случаев коэффициент теплопроводности для различных материалов определяется опытным путем. Одним из способов его определения является метод бесконечной тонкой пластины (или просто метод пластины). Его сущность заключается в том, что образец выполняется в виде пластины, толщина которой много меньше образующих ее сторон (или диаметра в случае диска). К одной из поверхностей образца от нагревателя подводится некоторое количество теплоты, а с противоположной стороны тепло отводится к холодильнику. Нагреватель и холодильник должны быть отрегулированы так,

чтобы обе поверхности образца находились при неизменяющихся во времени температурах. Это обеспечивает стационарность процессу теплопередачи. Значительные линейные размеры образца обеспечивают однородность температурного поля на плоских основаниях образца в областях и пренебрежения тепловыми потерями через боковую поверхность образца.

Поскольку пластина является тонкой, то вдали от ее краев температурный градиент между поверхностями может рассматриваться как линейная функция (рисунок 1).

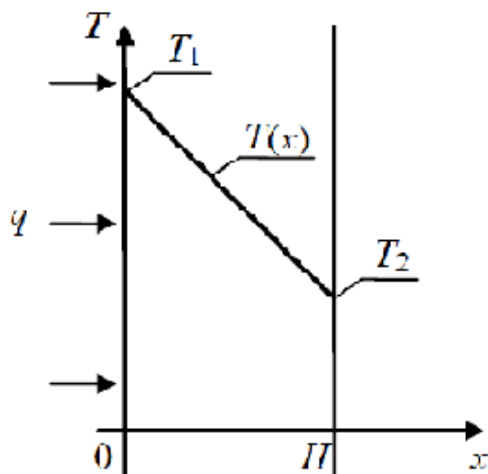


Рисунок 1 – Изменение температуры по толщине образца

$$\lambda = -\frac{q}{dt/dx} \cdot \frac{Bm \cdot}{m \cdot K} \quad (3)$$

Тогда

$$\frac{\partial t}{\partial x} = \frac{t_1 - t_2}{H},$$

где t_1, t_2 – температуры на плоских основаниях образца в градусах Цельсия, H – толщина пластины (м).

Уравнение (3) содержит два параметра, поддающиеся непосредственному измерению различными способами: q и $\partial t/\partial x$. где t_1, t_2 – температуры на плоских основаниях образца в градусах Цельсия, H – толщина пластины (м).

Это позволяет определить значение λ для конкретных образцов и веществ:

$$\lambda = \frac{q \cdot H}{t_1 - t_2} \quad (4)$$

Уравнение (4) показывает, что определение коэффициента

теплопроводности может быть результатом косвенных измерений, если прямыми измерениями получены значения температур на плоских основаниях образца, его толщины и плотности теплового потока через образец в направлении, указанном на рисунке 1.

Порядок выполнения работы

Эксперимент проводится на лабораторном стенде НТЦ-22.05.1 (рисунок 2) с использованием модуля НТЦ-22.05.1 /1, изображенного на рисунке 3.

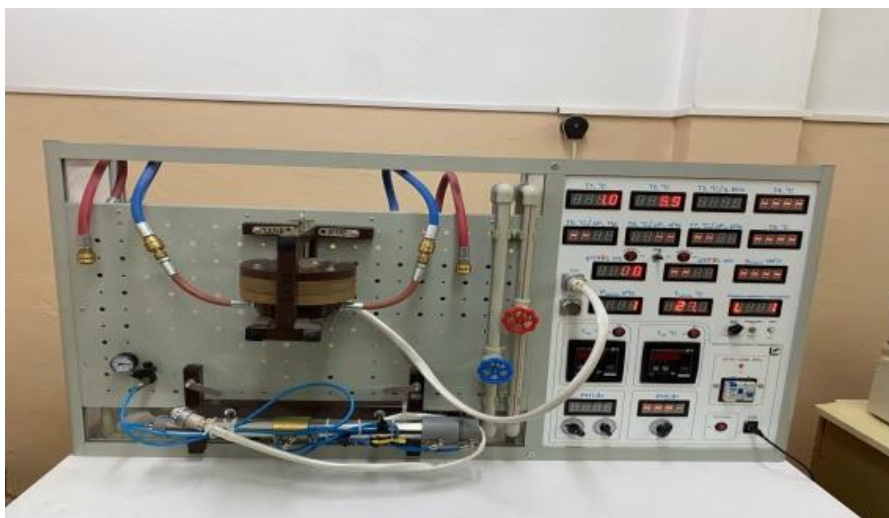


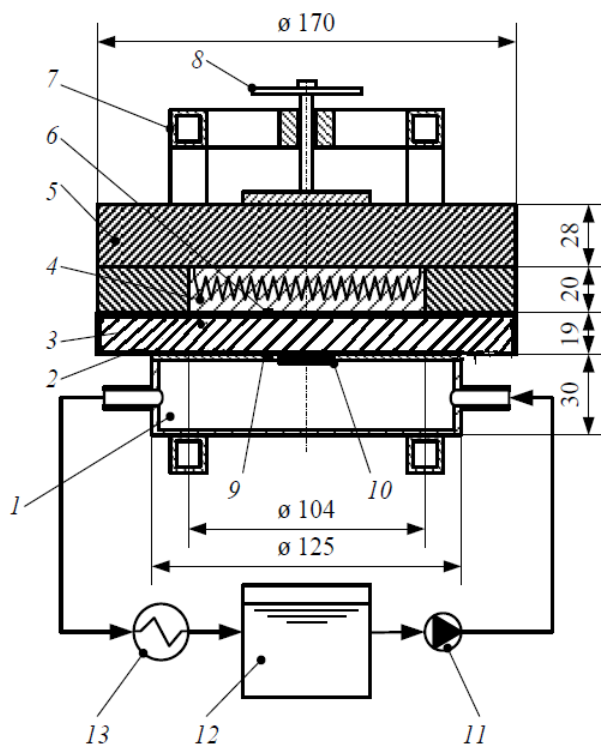
Рисунок 2 – Лабораторный стенд НТЦ-22.05.1 с модулем НТЦ-22.05.1 /1

Для проведения лабораторной работы на стенде (рисунок 2) установить модуль НТЦ-22.05.1 /1 «Исследование теплопроводности материалов методом пластины» (рисунок 3) на перфорированную панель и закрепить поворотом крепежных рукояток во встречном направлении на четверть оборота. Далее необходимо подключить кабель модуля к верхнему разъему X10 индикаторной панели стенда, подключить шланги охлаждения к шлангам стенда синего цвета как показано на рисунке 2.



Рисунок 3 – Модуль НТЦ-22.05.1/1 для определения коэффициента теплопроводности методом пластины

Модуль состоит из нагревателя, который обеспечивает передачу теплоты испытуемому образцу, испытуемый образец при нагреве передает показания датчикам, установленным на стенде. Стенд через разъем «usb» соединяют с компьютером, на мониторе которого отображается изменение температуры в режиме реального времени. Мощность нагрева устанавливается регулированием режима нагрева. Для стабильного получения теплового потока предусмотрено охлаждение. Схема модуля представлена на рисунке 4.



1 – водяной охладитель; 2 – исследуемый материал; 3 – испытуемый образец; 4 – электронагреватель; 5 – текстолитовый диск; 6, 9 – датчики температуры; 7 – опорная рама; 8 – барашек; 10 – датчик плотности теплового потока; 11 – насос; 12 – бак холодной воды; 13 – воздушный охладитель контура холодной воды

Рисунок 4 – Схема модуля для определения коэффициента теплопроводности методом пластины

Модуль содержит массивный текстолитовый диск 5, выполняющий роль теплоизолятора, в котором имеется цилиндрическая глухая полость. В ней размещен электронагреватель 4, залитый металлом с высокой теплопроводностью, что обеспечивает создание равномерного температурного поля. Между нагревателем и водяным холодильником устанавливается изучаемый образец в форме диска. Тепловой поток, прошедший через диск, отводится водой холодного контура. Вся система находится на опорной раме 7,

позволяющей разъединять нагреватель и холодильник вращением барашка 8, а также зажимать опытный образец между ними, чтобы свести к минимуму контактное тепловое сопротивление. Регулирование теплового потока электронагревателя происходит ступенчато. Для измерения температуры поверхности t_1 и t_2 опытного текстолитового диска использованы датчики 6 и 9, которые установлены на наружной поверхности нагревателя и холодильника, а плотность теплового потока q фиксируется показывающим прибором по сигналу датчика теплового потока 10, установленного в середине наружной поверхности холодильника.

Датчик теплового потока представляет собой гальваническую термобатарею из нескольких сот последовательно соединенных термопар, сложенных бифилярно в спираль и залитую эпоксидным компаундом с различными добавками. Тепловой поток, проходящий через датчик, создает в нем градиент температур и соответствующий термоэлектрический сигнал. Величина плотности теплового потока пропорциональна этому сигналу, что позволяет проградуировать прибор, измеряющий термоЭДС, и вывести значение теплового потока на лицевую панель стенда.

Порядок проведения эксперимента

1 Установить Модуль НТЦ-22.05.1/1 «Исследование теплопроводности материалов методом пластины» (рисунок 2) на перфорированную панель и закрепить поворотом крепежных рукояток во встречном направлении на четверть оборота. Подключить кабель модуля к разъему X10 на панели стенда.

2 Установить исследуемый образец (круг из текстолита) внутрь установки и с помощью винтового механизма слегка зажать его между нагревателем и датчиком теплового потока. **ВНИМАНИЕ! Не прилагать усилий при сжатии, чтобы не повредить датчик плотности теплового потока.**

3 Убедиться в том, что переключатели установлены в положения: SA1 – «выкл», SA2 (Насос –1) – «выкл», SA3 – «нижнее», SA4 (Насос – 2) – «выкл», SA5 – «выкл», SA6 – «выкл», SA14 – min, SA15 – min, SA16 – min.

4 Включить автоматические выключатели QF1 и QF2 на панели стенда. Установить профиль индикации «L 1». Для этого необходимо нажать и удерживать в нажатом состоянии «Задатчик» SA10. Через несколько секунд на индикаторе появится мигающая надпись «L1». Вращением тумблера задатчика по часовой стрелке увеличивают номер профиля индикации. Нажатием на тумблер задатчика вводится профиль индикации. Для данной работы он «L1». На стенде загораются параметры, используемые в данной работе.

Конфигурация отображаемых на индикаторах параметров изображена на рисунке 5.

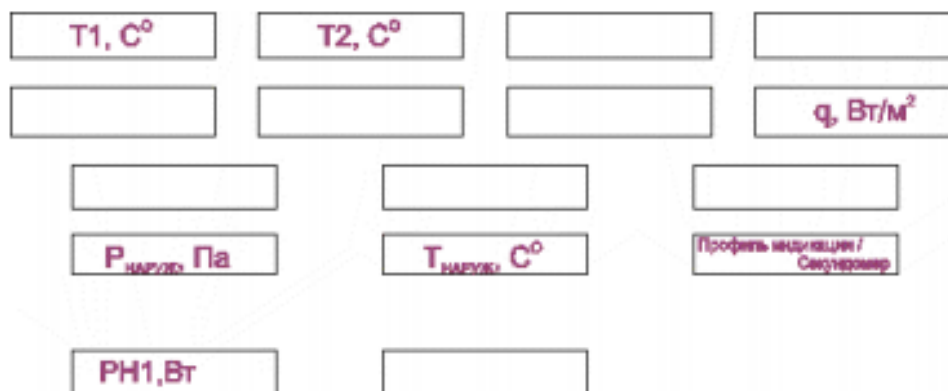


Рисунок 5 – Конфигурация отображаемых на индикаторах параметров

5 Максимально открыть вентиль синего цвета на трубопроводе. Включить клавишный выключатель SA2 (Насос – 1). Это приведет в работу циркуляционный насос охлаждающей воды. Установить вентилем расход воды $g_1=0,015-0,020$ л/с. (допускается проводить исследования без дополнительного охлаждения).

6 Включить компьютер. Подключиться через порт «usb» к стенду. На рабочем столе найти папку «теплопроводность» и открыть её. На дисплее появится методичка проведения данной работы. На компьютере запустить программу управления стендом PDind. Выбрать лабораторную работу «Определение теплопроводности твёрдых тел». На экране отобразятся графики измеряемых параметров в реальном времени.

7 Перед началом работы тумблер регулятора напряжения PН1 должен быть выключен, а регулятор PН2 установлен на отметку «min». Переключателями SA14 (PН1) и SA15 (PН2) плавно установить требуемую мощность электронагревателя (по указанию преподавателя). Регулятор SA15 (PН2) обеспечивает более плавную настройку мощности.

8 Дождаться наступления стационарного режима теплопередачи, когда значения температур и плотности теплового потока можно считать установившимися (изменения среднего значения температуры за 2 минуты не превышает $0,1$ °C). Зафиксировать показания приборов в таблице 1.

9 Сформировать отчет по работе и занести показания измерений в таблицу. Повторить измерения на других значениях мощности электронагревателя (по рекомендации преподавателя) и также занести в таблицу 1.

Порядок расчета

Расчет среднего значения температуры пластины t_{cp} вычислим по формуле

$$\bar{t} = \frac{\bar{t}_1 + \bar{t}_2}{2}, ^\circ\text{C}. \quad (5)$$

Расчет коэффициента теплопроводности λ —по формуле

$$\lambda = \frac{q \cdot H}{t_1 - t_2}. \quad (6)$$

Таблица 1 – Данные прямых измерений и результатов расчета

Параметры	H_{cp}	t_1	t_2	q	t_{cp}	λ
Единица измерения	м	$^\circ\text{C}$	$^\circ\text{C}$	Вт/м ²	$^\circ\text{C}$	Вт/м·град
1	0,02					
2						
3						

По полученным данным построить график зависимости $\lambda = f(\bar{t})$ по трем точкам, соответствующим трем режимам работы нагревателя.

Опыты показывают, что для многих материалов с достаточной для инженерных расчетов точностью эта зависимость может быть принята линейной вида $y = a + bx$. (пример такого графика приведен на рисунке 6).

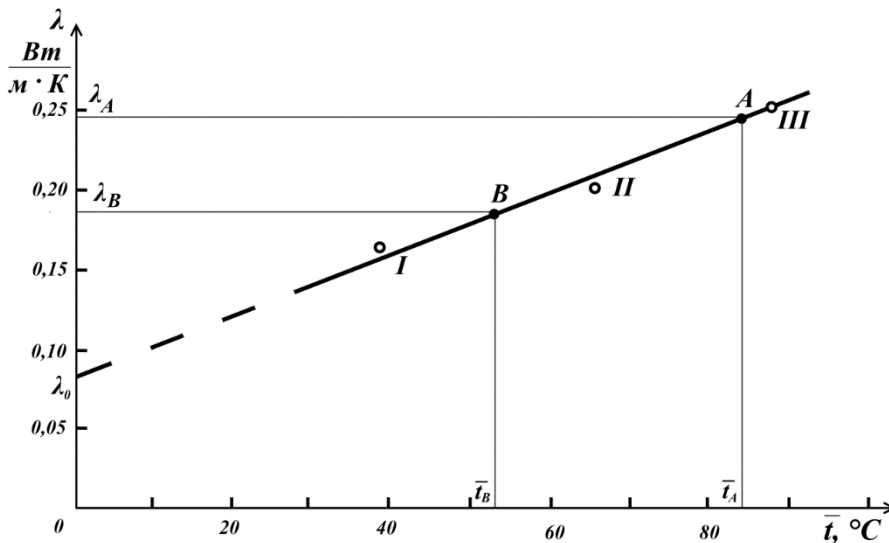


Рисунок 6 – График построения зависимости $\lambda = f(\bar{t})$

Поэтому на графике $\lambda = f(\bar{t})$ по экспериментальным точкам проводят прямую линию и определяют аналитическую зависимость λ от средней температуры \bar{t} :

$$\lambda = \lambda_0 + b \cdot \bar{t}, \quad (7)$$

где λ_0 – значение коэффициента теплопроводности при температуре 0 °С, Вт/м · К; b – коэффициент, определяемый по зависимости (7) Вт/м · К².

Определение значения b , характеризующего наклон прямой графика $\lambda = f(\bar{t})$, производится по координатам двух произвольных точек A и B , взятых на прямой линии (см. рисунок 7).

$$b = \frac{\lambda_A - \lambda_B}{\bar{t}_A - \bar{t}_B}. \quad (8)$$

Полученные значения λ_0 и b подставляют в уравнение (7) и записывают аналитическое выражение зависимости $\lambda = f(\bar{t})$ в окончательном виде.

Для проверки правильности расчетов следует для любого значения \bar{t} сравнить два значения коэффициента теплопроводности, рассчитанные по полученному выражению $\lambda = f(\bar{t})$ и определенные по графику.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет по лабораторной работе должен включать:

- 1) цель работы;
- 2) принципиальную схему установки с кратким ее описанием;
- 3) таблицу записи показаний приборов;
- 4) обработку результатов опытов по трем режимам;
- 5) график зависимости $\lambda = f(\bar{t})$;
- 6) определение коэффициентов зависимости $\lambda = \lambda_0 + b \cdot \bar{t}$;
- 7) аналитическое выражение $\lambda = f(\bar{t})$;
- 8) проверку правильности расчетов (определение ошибки);
- 9) выводы по работе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 1 Дайте определение понятий: теплообмен, теплопроводность, конвекция, тепловое излучение, стационарное/нестационарное температурное поле.
- 2 Чем отличается теплопроводность от других процессов теплопередачи?
- 3 Сформулируйте закон Фурье, объясните знак «минус» в математическом описании закона.
- 4 Какую размерность имеет коэффициент теплопроводности?
- 5 Дайте определение понятия теплового потока.
- 6 Дайте понятие термина плотности теплового потока.
- 7 Какие физические величины необходимо измерить при выполнении лабораторной работы?
- 8 Какие условия обеспечивают стационарность теплопроводности?
- 9 Какие вещества имеют большую теплопроводность?
- 10 Приведите функциональную схему лабораторной установки.

Библиографический список

- 1 Луканин В. Н. Теплотехника / В. Н. Луканин, М. Г. Шатров, Г. М. Камфер [и др.]. – Москва : Высшая школа, 2004.
- 2 Быстрицкий Г. Ф. Основы энергетики : учебник / Г. Ф. Быстрицкий. – Москва : ИНФРА – М, 2005.
- 3 Техническая термодинамика / под ред. В. И. Крутова. – Москва : Высшая школа, 1981.
- 4 Нащокин В. В. Техническая термодинамика и теплопередача / В. В. Нащокин. – Москва : Высшая школа, 1980.

Савельев Виктор Андреевич

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ТВЁРДЫХ ТЕЛ

Методические указания
к выполнению лабораторной работы
по дисциплине «Тепломассообмен»

Редактор В. А. Лисина

Подписано в печать 28.04.2026 Формат 60x84 1/16

Бумага 80 г/м³

Печать цифровая

Усл. печ. л. 1,0

Уч.-изд. л. 1,0

Заказ 22

Тираж 25

Библиотечно-издательский центр КГУ.

640020, г. Курган, ул. Советская, 63/4.

Курганский государственный университет.