

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ  
ТАДЖИКСКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА

На правах рукописи

УДК: 538.9

**СОДАТДИНОВ ШАХНАВОЗ САДРИДИНОВИЧ**

**ВЛИЯНИЯ РАЗМЕРА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ  
НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ, КИНЕТИКУ ОХЛАЖДЕНИЯ  
И КОЭФФИЦИЕНТ ТЕПЛООТДАЧИ**

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискания ученой степени кандидата физико-математических наук  
по специальности 1.3.8. – физика конденсированного состояния

**Научный руководитель:** Кандидат физико-математических наук,  
доцент Низомов З.

Душанбе-2026

<b>СОДЕРЖАНИЕ</b>	<b>Стр.</b>
<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>4</b>
<b>ГЛАВА I. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР. ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ ОБРАЗЦОВ НА ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ. ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ТЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.....</b>	<b>11</b>
1.1. Влияние размеров образцов на механические свойства металлов....	11
1.2. Влияния размера и формы образцов на кинетику охлаждения и теплоотдачу металлов .....	20
1.3. Выводы и постановка задач .....	26
<b>ГЛАВА II. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛООТДАЧИ МЕТАЛЛОВ .....</b>	<b>29</b>
2.1. Экспериментальная установка .....	29
2.2. Выбор и методика приготовления металлических образцов .....	32
<b>ГЛАВА III. ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРА- ТУРЫ В МЕТАЛЛАХ.....</b>	<b>35</b>
3.1. Тепловая изотропность бронзы формы параллелепипеда .....	35
3.2. Однородность температурного поля алюминия марки А5N сложной формы .....	46
3.3. Применимость теории подобия при исследовании теплоотдачи металлов методом охлаждения.....	49
3.4. Коэффициенты теплоотдачи алюминия сложной формы.....	55
<b>ГЛАВА IV. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗМЕРОВ НА ТЕП- ЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ.....</b>	<b>59</b>
4.1. Влияние высоты цилиндрических образцов меди марки МЗ на кинетику их охлаждения и процесс теплоотдачи .....	59
4.2. Влияние висоты цилиндрических образцов из латуни Л63 на кинетику их охлаждения и коэффициентов теплоотдачи .....	67

4.3. Кинетика охлаждения цилиндрической стали 45 разных диаметров и наблюдаемый в них фазовый переход .....	82
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	100
ЛИТЕРАТУРА.....	102
ПРИЛОЖЕНИЯ А .....	121
ПРИЛОЖЕНИЯ Б .....	127

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** Исследование теплофизических свойств металлических материалов является одной из важнейших задач физики конденсированного состояния и материаловедения. Понимание того, как размер и форма металлических образцов влияют на процесс их теплообмена с окружающей средой, играет ключевую роль в создании новых функциональных материалов с заданными свойствами и может служить основой для диагностики теплового поведения металлов в реальных технических конструкциях.

До настоящего времени математически точно выверенных теории, объясняющих зависимость теплофизических характеристик металлов от размеров образца, не существует, разве что широким признанием пользуется феноменологическая теория радиационно-конвективного теплообмена с окружающей средой, основанная на экспериментальных данных и реализуемая в таких важных областях производства, как теплоэнергетика, теплотехника и химическая технология. Несомненно одно, накопление экспериментальных данных по влиянию геометрических размеров металлических образцов на распределение температуры в них, кинетику их охлаждения и коэффициенты теплоотдачи является задачей актуальной.

На момент начала настоящей работы в литературе отсутствовали какие-либо сведения о систематических экспериментальных исследованиях по проверке однородности теплового поля в металлических образцах и влиянию длины образца на кинетику их охлаждения и коэффициенты теплоотдачи, что лишний раз подтверждает своевременность выбранной темы.

Методологической основой исследования послужили научные труды ведущих зарубежных ученых в области физики конденсированного состояния, теплофизики и материаловедения, основные положения теории регулярного режима. Концептуально метод охлаждения базируется на законах сохранения

энергии и внешней теплопроводности Ньютона-Рихмана. В работе были использованы следующие методологические подходы: анализ, синтез, эксперимент, сравнение и обобщение. Для обработки экспериментального материала применялись методы статистической обработки данных.

**Степень изученности проблемы.** Фундаментальный вклад в исследование теплообмена при свободной тепловой конвекции был внесен А.В. Лыковым, Г.М. Кондратьевым, Л. Лоренцем, В. Бекманом, В.С. Жуковским, М.А. Михеевым, Е. Шмидтом, Г.Н. Дульневым, С.С. Кутателадзе, О.Г. Мартыненко и др. Исследование научной литературы демонстрирует, что, несмотря на значительные достижения в области моделирования теплообмена, вопрос о зависимости теплофизических свойств материалов от их размеров до сих пор остаётся практически неизученным.

В этой ситуации особое значение приобретает экспериментальное исследование кинетики охлаждения относительно пространственных осей металлических образцов.

Ранее в научно-исследовательской лаборатории физики конденсированного состояния имени профессора Б.Н. Нарзуллаева НИИ Таджикского национального университета проводились исследования кинетики охлаждения металлических образцов с регистрацией температуры только на оси цилиндра. Представляло особый интерес выяснить, имеет ли место радиальное распределение температуры образца, если да, то каким образом это может отразиться на процесс теплообмена в целом.

Работа выполнена в соответствии с планами госбюджетных Научно-исследовательских работ научно-исследовательской лаборатории физики конденсированного состояния имени профессора Б.Н. Нарзуллаева имени профессора Б.Н. Нарзуллаева НИИ Таджикского национального университета.

**Предметом** исследования являются образцы пластин и цилиндров из меди, бронзы, латуни 63, стали 45 и особо чистого алюминия марки А5N.

**Цель работы** заключалась в экспериментальном исследовании закономерностей распределения температурного поля, кинетики охлаждения и температурно-размерных зависимостей коэффициентов теплоотдачи металлов. Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

- разработка** экспериментальной установки с одновременной регистрацией временной зависимости температуры нагретых металлов в трех направлениях с компьютерной обработкой результатов;

- исследование** процесса охлаждения металлов разного размера в широком интервале температур относительно их осей;

- установление** закономерностей влияния размера металлов на кинетику их охлаждения;

- оценка** роли излучения, теплопроводности и конвекции в теплоотдаче металлов в окружающую среду;

- оценка** роли размерного эффекта на фазовый переход первого рода в образцах из стали 45.

**Научная новизна** исследования состоит в том, что впервые:

- проведено** систематическое экспериментальное исследование временной зависимости температуры нагретых металлов разных диаметров и длин в трех направлениях при естественном воздушном охлаждении;

- показано**, что в металлических образцах температура распределена равномерно по объему и зависит только от времени охлаждения;

- установлены** характерные времена радиационно-конвективного теплообмена металлов с окружающей средой, подтверждающие их рост в порядке от теплового излучения к теплопроводности и конвекции;

- доказано**, что в пределах погрешности эксперимента при вариации длины образцов имеют место линейные зависимости характерных времен теплообмена металлов от отношения объёма к площади их поверхности;

- показано**, что температурная зависимость коэффициента излучательной теплоотдачи определяется степенью черноты тела и с ростом температуры

растёт, в то время как коэффициент конвективной теплоотдачи зависит от физических свойств окружающего воздуха и с температурой уменьшается;

**-показано**, что коэффициенты теплоотдачи металлов слабо зависят от длины образцов и значительно уменьшаются при росте их диаметра;

**-обнаружен** фазовый переход первого рода в образцах из стали 45 разных размеров в широком интервале температур, что согласуется с данными по температурной зависимости теплоемкости.

**Теоретическая значимость** полученных результатов заключается в том, что зависимость теплофизических характеристик металлических образцов от размеров может стать основой для усовершенствования макроскопической теории теплоотдачи металлов. Температурные зависимости коэффициентов конвективной и излучательной теплоотдачи способны существенно дополнить справочные данные о теплофизических свойствах металлов и сплавов.

**Практическая значимость** исследования заключается в том, что результаты могут быть использованы для оптимизации конструкций и повышения эффективности теплообменных устройств. Правильный выбор формы и размеров компонентов может существенно повысить эффективность теплообмена и снизить энергозатраты. Установленные закономерности изменения скорости охлаждения и коэффициентов теплоотдачи в зависимости от размера образцов представляют интерес для специалистов в области энергетики, машиностроения и теплотехники.

Предложенная нами экспериментальная установка была использована для проверки однородности температурного поля в металлических материалах в НИИ и на физическом факультете ТНУ, а также при выполнении диссертационных работ на кафедре «Энергоэффективных и ресурсосберегающих технологий»(ЭиРГ) и при выполнении лабораторных работ по предметам «Физпрактикум» студентами первого курса филиала НИТУ «МИСиС» в г. Душанбе (акт см. в Приложении А). Отдельные результаты работы внедрены в

учебный процесс на кафедре энергоэффективных и ресурсосберегающих технологий Душанбинского филиала НИТУ «МИСиС» по дисциплинам «Теплофизика» и «Металлургическая теплотехника» (акт см. в Приложении Б).

**Выносимые на защиту положения:**

-равномерное распределение температуры по объёму металла и её экспоненциальная временная зависимость в процессе самопроизвольной теплоотдачи в окружающую среду;

-общий характер зависимостей  $\frac{\Delta T_i}{(\Delta T_i)_{\tau=0}} = f(\tau/\tau_i)$  и  $\ln \frac{\Delta T_i}{(\Delta T_i)_{\tau=0}} = f(\tau/\tau_i)$

для охлаждения излучением, теплопроводностью и конвекцией;

-температурные и размерные зависимости коэффициентов теплоотдачи металлов, согласно которых коэффициент излучательной теплоотдачи с ростом температуры возрастает, тогда как коэффициент конвективной теплоотдачи снижается; увеличение диаметра образца приводит к уменьшению коэффициентов теплоотдачи, причём эта зависимость слабо зависит от его длины.

-фазовый переход первого рода в стали 45 разного размеров, хорошо согласующийся с температурной зависимостью теплоемкости металла.

**Достоверность** результатов подтверждается использованием современного научного оборудования, большим статистическим набором хорошо воспроизводимых экспериментальных данных, неоднократной научной экспертизой при рецензировании опубликованных работ в ведущих научных журналах по данной тематике.

**Личный вклад** соискателя заключается в патентно-информационном поиске по теме диссертации, составлении обзора литературы, постановке задач исследования, непосредственном проведении экспериментов, анализе и подготовке результатов к публикации и самостоятельном написании диссертации.



**Публикации.** По итогам работы опубликовано всего 17 научных статей, из которых 3 - в изданиях из Перечня ВАК РФ, 1 - в изданиях из международной базы данных (Scopus) и 10 - в материалах международных и республиканских конференций. Получен один малый патент Республики Таджикистан.

**Апробация работы.** Основные результаты исследования доложены на: междунар. науч.-прак. конф. «Современное состояние взаимодействия науки с производством и инновационное развитие экономики» (Душанбе, 2022); VIII междунар. конф. «Современные проблемы физики» (Душанбе, 2022); междунар. конф. «Роль физики в развитии науки, просвещения и инноваций» (Душанбе, 2022); междунар. науч.-прак. конф. «Проблемы промышленной интеграции в Центральной Азии» (Душанбе, 2022); междунар. науч.-прак. конф. «Новые достижения в области естественных наук и информационных технологий» (Душанбе, 2023); междунар. науч. конф. «Современные проблемы физики конденсированного состояния» (Душанбе, 2023); междунар. науч.-прак. конф. «Проблемы и перспективы развития физических наук» (Худжанд, 2025).

**Структура и объем диссертации.** Диссертация изложена на 129 страницах компьютерного текста, включая 71 рисунок и 13 таблиц, состоит из введения, 4 глав, выводов и списка использованной литературы из 174 наименования.

**Ключевые слова:** металлы, температура, температурное поле, теплоотдача, конвекция, теплопроводность, излучение, форма, размер, фазовый переход.

**Во введении** обоснованы актуальность темы исследования и степень ее разработанности, сформулированы цели и задачи, показана научная новизна, теоретическая и практическая значимость, представлены основные положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов, вклад автора, структура и объем диссертации.

**В первой главе** представлен краткий обзор литературы, посвящённый влиянию формы и размеров образцов на их механические и теплофизические характеристики.

**Во второй главе** представлено подробное описание экспериментальной установки, предназначенной для изучения распределения поля температуры и кинетики охлаждения металлических материалов. Все образцы были изготовлены в НИЛФКС им. профессора Б.Н. Нарзуллоева НИИ ТНУ.

**Третья глава** посвящено проверке однородности температурного поля в металлических образцах разной формы и размера. Результаты представлены графически и в виде таблиц. Достоверность полученных результатов подтверждена их хорошим согласием с выводами теории подобия.

**Четвертая глава** посвящена исследованию влияния размера образцов на кинетику их охлаждения и коэффициенты теплоотдачи. В этой же главе приведены результаты исследования фазового перехода в образцах стали 45 разного размера. Представлены основные результаты исследований влияния размеров образцов на их тепловые свойства и обобщены основные, закономерности проявления размерного эффекта у меди и медно-цинковых сплавов и стали 45 в широком температурном интервале.

В конце диссертации дано общее заключение по работе.

# **ГЛАВА I. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР. ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ ОБРАЗЦОВ НА ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ. ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ТЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

## **1.1. Влияние размеров образцов на их механические свойства**

Согласно работе [1], размерный эффект механической прочности впервые описан в 1874 году В.Л. Кирпичевым в работе «О подобии при упругих явлениях» «... при испытаниях образцов на одноосное растяжение было замечено, что при изменении размеров и соблюдении условий механического подобия значения прочностных характеристик также изменялись, снижаясь с увеличением абсолютных размеров».

Начиная с 1920-х годов начали активно изучать размерный эффект. Важные работы в этой области выполнили Н.Н. Давиденков, А.Ф. Иоффе, Б.Б. Чечулин, Г. Шарпи, А.П. Александров, С.Н. Журков и Г.В. Ужик и др. Они исследовали влияние размера на механические характеристики материалов при растяжении и предложили первые объяснения этого явления [1].

Размерный эффект механической прочности проявляется в реальных изделиях и конструкциях, снижая их прочность при увеличении размеров. Это приводит к росту числа разрушений в нормальных условиях эксплуатации. Например, в 40-х годах XX века в США новые морские военные суда, увеличенные в 2-2,5 раза, массово разрушались из-за хрупкого разрушения корпуса, даже при отсутствии интенсивных нагрузок. Это привлекло внимание специалистов к изучению размерного эффекта [2].

В настоящее время используют термины «размерный эффект» и «масштабный эффект», которые характеризуют изменение свойств объекта при изменении его размеров. Термин «масштаб» означает увеличение или уменьшение размеров на чертеже, но не влияет на реальные свойства объекта. Поэтому более обоснованным является использования термина «размерный эффект»,

учитывающий реальные размеры и их влияние на физические свойства объекта.

Размерный фактор, как причина размерного эффекта, состоит в изменении размеров образцов или конструкций для механических испытаний, зоны пластической деформации, элементов структуры и субструктуры и др.

В работах [3-5] выявлены увеличение характеристик твердости при уменьшении размерных параметров на металлах и их сплавах.

В научных исследованиях [6-20] основное внимание уделялось на влияние размеров и форм образцов на механические характеристики металлов и сплавов.

Сборник научных трудов [6] объединяет оригинальные статьи и главы из монографий, опубликованных в разные годы профессором А. А. Пресняковым, основателем казахской школы материаловедения, а также работы его учеников. В этих публикациях представлены концепции локализации деформации и закономерностях ее развития, основанные на экспериментальных данных, полученных в результате исследований широкого спектра конструкционных цветных металлов и их сплавов.

Впервые в своей монографии “Локализация пластической деформации” (1981) А. А. Пресняков сформулировал концепцию локализации деформации как фундаментального явления, определяющего развитие процессов изменения формы в твердых телах. Этот вывод был сделан в результате всестороннего анализа всех известных к тому времени в научной литературе работ,

Авторы [9-13] исследовали механические свойства меди и латуней Л80 и Л63. Обнаружены две закономерности: « ... линейная связь между средним предельным напряжением и абсолютным рабочим объемом образцов, а также оптимальное значение объема, при котором предел прочности одинаков независимо от размеров. Подобный характер зависимости наблюдается для меди и латуни марки Л80 и Л63 во всех областях температуры. Для латуней характерен сильный размерных эффект...» [14-16].

В исследовании [10] отмечается, что размеры образцов меди влияют на их сопротивление деформации: с увеличением кратности образцы деформируются при меньших напряжениях.

Экспериментальные исследования [11] показали, что пластичность, предел прочности при растяжении на характер разрушения образцов из меди зависят от их геометрических размеров. Установлено, что для образцов диаметром 0,1 мм предел прочности при растяжении достигает приблизительно 255 МПа и остается практически неизменным с увеличением длины образца.

Согласно результатам, представленным в работе [13], для пластичных материалов влияние диаметра и длины образца на прочность и пластичность является сложным и не может быть описано с помощью единой универсальной зависимости. При небольших объемах образцов прочность приближается к предельному значению, в то время как влияние размера становится более заметным с повышением температуры.

В исследованиях [18-20] было показано, что параметры, характеризующие пластичность, проявляют более высокую чувствительность к изменениям размеров образца, чем свойства, связанные с прочностью. На основе анализа экспериментальных данных, представленных в [6-19], в [20] были сделаны следующие выводы:

- « ... а) В случае пластичных металлов, таких как медь и её сплавы с цинком, размерный фактор связан с локальной пластической деформацией, которая приводит к изменению механических свойств материала;
- б) С увеличением концентрации цинка в латунях растёт влияние размера образцов на предел прочности;
- с) Чем прочнее сплав, тем сильнее проявляется зависимость предела прочности от размера образца».

Следует отметить, что характеристики материала в изделии могут значительно отличаться от данных испытаний стандартных образцов. Эти различия

вызваны конструкцией, размерами и состоянием поверхностей. Размеры образцов влияют на её термостойкость больше, чем физико-химические свойства материала [17-21].

В работе [22] показано, что «... уменьшение диаметра образцов исследуемых жаропрочных титановых и никелевых сплавов с 5 до 3 мм не приводит к снижению прочностных характеристик при комнатной и повышенной температурах при испытаниях на растяжение. Значения предела прочности, относительного удлинения и относительного сужения образцов диаметрами 3 и 5 мм практически одинаковы. Испытания на длительную прочность показали значительное снижение времени до разрушения образцов исследуемых жаропрочных титановых и никелевых сплавов при уменьшении диаметра с 5 до 3 мм». Следует отметить, что эти результаты согласуются с данными работы [23, 24].

Систематические исследования, проведенные на меди и латунях Л80 и Л63 [25,26], выявили две особенности в размерной зависимости прочности этих материалов: « Первое, линейная связь между величинами предел прочности и рабочего объема проявляется только начиная с некоторого значения рабочего объема, величина которого зависит от кратности, а для образцов меньшего объема предела прочности - величина постоянная, соответствующая наиболее действительной характеристике прочности самого материала.

Второе, единой строгой зависимости предела прочности и начального объема не существует. Для образцов одного объема, но разных размеров, может быть получен набор значений предела прочности».

Аналогичная картина зависящего от размера зависимостей наблюдалась для меди не только при комнатной температуре (20°C), но и при высоких температурах (200, 600 и 850°C), а также для латуней L80 и L63. По сравнению с медью, латуни проявляют более выраженный размерный эффект [10]. В этих сплавах влияние длины образца сильнее, что приводит к большим различиям в показателях прочности для образцов одинакового объема.

Согласно экспериментальным данным для меди [11]: «... для образцов одной кратности может быть получен целый набор значений предела прочности с максимальной разницей от 225 до 170 МПа. Как увеличение, так и уменьшение кратности способствуют получению более стабильного значения предела прочности, которое ограничивается сверху величиной 255 МПа. В зависимости от длины образца это значение прочности достигается при разной кратности».

Во всех исследованиях, посвященных размерному фактору, толщина образца была определена как наиболее важный размерный параметр, поскольку она определяет концентрацию напряжений и размер области локализованного пластического течения.

Среди характеристик, связанных с деформацией, относительное удлинение особенно чувствительно к исходным размерам образца. В частности, относительное удлинение увеличивается с увеличением толщины образца [11].

Особое внимание процессам локализации на макромасштабном уровне было уделено в работах профессора Л.Б. Зуева и сотр. [27-29]. Установлено, что развитие пластической деформации от предела текучести и до разрушения обуславливается поведением очагов локализации пластической деформации на макроскопическом уровне. Обнаружена связь между поведением неоднородной макродеформации и стадийностью деформационных кривых нагружения материала.

В работе [30] экспериментально исследована эволюция характеристик разномасштабных деформационных процессов, формирующихся непосредственно в процессе квазистатического нагружения образцов поликристаллического алюминия.

В работе [31] проведён детальный анализ результатов лабораторных испытаний медной проволоки на растяжение с целью выяснения влияния длины образца на динамическую прочность. С увеличением длины образца наблюдалось последовательное изменение как средней прочности, так и статистиче-

ского разброса значений прочности. Эффект размера становится особенно выраженным, когда материал исследуемого объекта структурно неоднороден [32].

Одна из самых ранних гипотез, объясняющих происхождение эффекта размера, была предложена А. П. Александровым и С. Н. Журковым в 1933 году. Экспериментальные исследования стеклянных волокон показали, что с увеличением диаметра волокна средняя удельная прочность 18 образцов снижается, сопровождаясь при этом уменьшением разброса данных [1].

В твердых материалах неизбежно присутствуют внутренние дефекты — вакансии, дислокации, трещины, включения и микрообъемы с различной прочностью — которые распределены случайным образом по всему объему материала. Чем больше объем тела, тем больше в нем дефектов и тем ниже его прочность. Гипотезы, объясняющие эффект размера, основанные на концепции “самого слабого звена”, называются статистическими теориями. Согласно статистической гипотезе, экспериментально измеренные значения прочности имеют определенный разброс, и в большинстве случаев образцы меньшего размера демонстрируют меньшую вариацию значений прочности. Однако результаты экспериментов, о которых сообщают разные авторы для различных материалов, испытанных на геометрически схожих образцах, далеко не однозначны.

В работах [6-16] выделены четыре группы материалов: «... с увеличением размеров образцов их относительная прочность снижается; с увеличением размеров образцов их относительная прочность возрастает (каменная соль); с увеличением размеров образцов до определенного предела их относительная прочность возрастает, а затем асимптотически снижается до некоторого постоянного значения; с изменением размеров образцов их относительная прочность остается постоянной».

Анализируя результаты своих и известных в литературе экспериментов, М.И. Койфман и М.М. Протоद्याконов [33-35] предложили различать размерные эффекты первого и второго рода: «... Размерный эффект первого рода, или



объемный, связан со структурной неоднородностью испытуемого материала, наличием случайно распределенных по объему дефектов. Его предложено называть главным. Размерный эффект второго рода, или поверхностный, обусловлен качеством обработки поверхности образцов и степенью разрушения (деструкции) приповерхностного слоя. Он существенно сказывается при испытаниях образцов малых размеров. С увеличением объема их прочность под действием объемного размерного эффекта уменьшается, а под действием поверхностного - возрастает. Поскольку при испытании образцов эти размерные эффекты проявляются одновременно, то в зависимости от того, какой из них будет преобладающим, такой вид и примет суммарная кривая изменения прочности материала при изменении размеров образца».

Анализ многочисленных публикаций, посвященных количественной оценке размерного эффекта [36, 37], свидетельствует о том, что на сегодняшний день не существует общепринятой интерпретации всех аспектов его проявления, основанной на всеобъемлющей физической модели. В частности, до сих пор не создана адекватная модель, которая одновременно учитывала бы основные ослабляющие микро- и макродефекты, а также особенности их нагружения.

В настоящее время установлено, что размерный эффект проявляется при всех видах механических испытаний материалов. Изменения размерных параметров, таких как линейные, плоские и объемные размеры образца, а также размеры конструктивных элементов и зон пластической деформации, как правило, приводят к заметным изменениям измеряемых механических свойств исследуемого материала. Подобные закономерности были подтверждены в ряде исследований, посвящённых размерному эффекту, где отмечалось повышение характеристик твердости при уменьшении размерных параметров для широкого круга материалов, включая металлы и их сплавы [10–14]. В частности, в монографии [13] представлен всесторонний анализ результатов, имеющих в научно-технической литературе, касающихся механических свойств алюминиевых сплавов.

В работе [38] исследованы механические свойства меди и латуней Л80, Л63 при холодной (20 °С) и горячей (600, 850 °С) деформациях. Установлено, что масштабный эффект зависит от соотношения длины к диаметру образцов и температуры деформации. С увеличением легированности медных сплавов размерная зависимость предела прочности усиливается, а относительного удлинения - ослабевает. С ростом температуры степень проявления размерного эффекта усиливается. Подтверждено, что нарушение подобия деформирования при пластическом течении образцов разных размеров приводит к различному распределению деформаций и сопротивления деформированию из-за неоднородной микролокализации и разной кинетики разупрочнения. Коэффициент деформационного упрочнения уменьшается с увеличением начального сечения образцов. Предел прочности зависит от размера образцов на разных стадиях пластического течения, что определяет потерю стабильности течения. Характеристики развития областей деформации зависят от размеров образцов. С увеличением поперечного сечения образца изменяется кинетика течения металла в шейке, где происходит локализация деформации и разупрочнение. У меди и медно-цинковых сплавов размерная зависимость предела прочности связана с развитием разупрочнения в локальных областях. Размерный эффект обусловлен неоднородным развитием пластической деформации.

Относительное удлинение наиболее чувствительно к размерному фактору. Величина сужения мало зависит от размеров медных и латунных образцов. Изменение диаметра увеличивает удлинение, а длины - снижает его. Размерный эффект усиливается с уменьшением кратности образцов, что связано с влиянием диаметра и длины на локальное течение.

Традиционно считалось, что физические свойства металлов определяются их химическим составом и кристаллической структурой. Однако многочисленные исследования последних десятилетий показали, что при уменьшении размеров образцов, особенно в наномасштабе, наблюдаются значительные отклонения от свойств массивных тел. Это связано с тем, что при уменьшении размера возрастает доля поверхности относительно объёма, изменяется

роль поверхностной энергии, а также усиливается влияние дефектов и границ зёрен.

Результаты недавних исследований влияния размеров [39-53] показывают, что зависимость свойств материала от размера, особенно для пластичных материалов, значительно сложнее, чем предполагалось ранее. На сегодняшний день более подробно изучена роль толщины, длины, соотношения сторон и объема образца в определении изменений механических свойств. Предыдущие исследования в основном были сосредоточены на изменении прочности в зависимости от диаметра (или толщины) образца, в то время как влияние длины в значительной степени игнорировалось. Однако за последние два десятилетия было продемонстрировано, что в определенных случаях длина образца может оказывать значительное влияние на механические свойства. Этот эффект особенно заметен в пластичных материалах, где энергетический фактор становится доминирующим. Тем не менее, в общем случае толщина образца остается наиболее важным параметром размеров.

За последнее десятилетие исследования также прояснили, почему разные авторы сообщают о различных значениях свойств для одних и тех же металлов и сплавов. Это расхождение возникает из-за того, что поведение, зависящее от размера, обычно описывается не одной кривой, а целым семейством кривых. Эти кривые отражают различную степень влияния продольных и поперечных размеров на характер и степень развития пластической деформации при внешнем нагружении.

## **1.2. Влияния размера и формы образцов на процессы теплоотдачи**

Ранее в НИЛФКС имени профессора Б.Н. Нарзуллоева НИИ Таджикского национального университета методом охлаждения были проведены исследования теплофизических свойств алюминия разной степени чистоты [54-

58] и сплавов алюминия, легированных редкоземельными и щелочноземельными металлами [59-61]. В этих исследованиях образцы имели форму цилиндра с постоянными диаметром  $d = 1,6$  см и высотой  $h = 3,0$  см.

В работах [62-78] приведены результаты исследования влияния размера цилиндрических и сферических образцов из алюминия разных марок на кинетику их охлаждения и коэффициенты теплоотдачи в широком интервале температуры. В этих работах установлено, что цилиндрические и сферические образцы, изготовленные из различных марок алюминия, охлаждаются во всех случаях за счет сочетания излучательного и конвективного теплоотдачи. Проведена оценка характерного времени охлаждения, и было установлено, что радиационное охлаждение происходит значительно быстрее, чем конвективное. Кроме того, зависимость характерного времени охлаждения от отношения объема к площади поверхности для образцов одинаковой длины является нелинейной. Используя экспериментальные данные о скорости охлаждения образцов и величины теплоемкости, рассчитанные в соответствии с правилом Неймана–Коппа, определены коэффициенты конвективной и излучательной теплоотдачи в зависимости от температуры и размера образца. Было обнаружено, что с увеличением диаметра как цилиндрических, так и сферических образцов коэффициенты теплоотдачи уменьшаются. Кроме того, сферические образцы охлаждаются быстрее, чем цилиндрические образцы той же массы.

Эти исследования также показали, что с повышением температуры коэффициент излучательной теплоотдачи увеличивается, тогда как коэффициент конвективной теплопередачи сначала повышается, затем достигает максимума и постепенно снижается. Показано, что экспериментально полученные значения коэффициентов конвективной теплоотдачи качественно совпадают с рассчитанными с использованием теории подобия для термически тонких тел.

Исследованию свободной конвекции от твердых тел посвящено большое количество теоретических и экспериментальных работ [79-98]. Основной целью анализа свободно-конвективного течения газа над твердой поверхностью

является определение коэффициента конвективной теплоотдачи. Этот коэффициент характеризует интенсивность теплообмена на поверхности и зависит от температуры, характерного геометрического размера, физических свойств газа и других влияющих факторов.

Теория конвективного теплообмена была подробно рассмотрена в работах [79-83]. Влияние теплофизических свойств газа на теплообмен вблизи твердой поверхности было проанализировано в работах [89-97]. В работе [95] было проведено численное исследование теплоотдачи в вертикально ориентированном канале с неравномерным нагревом с учетом температурной зависимости свойств воздуха. Анализ был основан на системе дифференциальных уравнений, выведенных из законов сохранения энергии, импульса и массы. В результате была получена зависимость между числом Нуссельта ( $Nu$ ) и определяющими параметрами, характеризующими соотношение конвективного и кондуктивного теплообмена:

$$Nu = \frac{\alpha \ell}{\lambda} = \frac{q_c}{q_\lambda},$$

где:  $\ell$  - определяющий размер;  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности тела;  $\alpha$  - коэффициент теплоотдачи;  $q_c$  - тепловой поток за счёт конвекции;  $q_\lambda$  - тепловой поток за счёт теплопроводности.

При естественном воздушном охлаждении материалов при повышенных температурах ключевым фактором является излучательная теплоотдача. Для определения коэффициента излучательной теплоотдачи применяется закон Стефана-Больцмана для серых тел [99-103].

При анализе свободно-конвективного теплообмена часто возникает необходимость определить режим течения воздуха, который характеризуется числом Рэлея. Число Рэлея ( $Ra$ ) - это безразмерный параметр, который определяет поведение газа или жидкости под воздействием температурного градиента и определяется как:  $Ra = Gr Pr$  - число Рэлея;  $Gr = g \beta \Delta T \ell^3 / \nu^2$  - число Грасгофа;  $Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{c_p \mu}{\lambda}$  - число Прандтля;  $g$  - ускорение свободного падения;  $\beta = \frac{1}{T}$  - коэффициент теплового расширения газа;  $\Delta T$  - перепад температуры;

$C_p$  – теплоемкость газа при постоянном давлении;  $\nu$  – кинематическая вязкость газа;  $\mu$  – динамическая вязкость газа;  $\alpha = \frac{\lambda}{C_p \rho}$  – температуропроводность;  $T$  – определяющая температура. Для оценки числа Рэлея теплофизические свойства газа должны быть взяты из справочных данных, соответствующих выбранной характеристической температуре.

Теплофизические свойства сухого воздуха при нормальном атмосферном давлении были тщательно изучены и определяются исключительно температурой. Соответствующие данные доступны в научной литературе [98, 104–107]. В результате число Рэлея включает в себя набор физических параметров, зависящих от температуры.

В справочниках приведены значения плотности, удельная теплоемкость, коэффициенты теплопроводности и динамической вязкости в широком интервале температур с шагом 10 или 100 °С. Температура воздуха в лаборатории меняется в небольшом интервале. Поэтому для расчета коэффициентов в промежуточных точках предположили, что между двумя значениями температуры плотность, теплоемкость и коэффициент вязкости воздуха меняются линейно. Данные, приведенные в табл. 1.1, рассчитаны по указанному принципу. В последних графах приведены рассчитанные нами значения коэффициента объемного расширения и величины  $\frac{Gr}{l^3 \Delta t}$ .

Таблица 1.1

Физические свойства сухого воздуха при  $P=10^5$  Па [106]

T, К	$\rho, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$C_p, \frac{\text{Дж}}{\text{кг К}}$	$\mu, 10^{-5}$ Па с	$\nu, 10^{-5}$ $\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$	$\lambda, 10^{-2}$ $\frac{\text{Вт}}{\text{м К}}$	$\alpha, 10^{-5}$ $\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$	Pr	$\beta, 10^{-3} \text{ К}^{-1}$	$\frac{Gr}{l^3 \Delta t}, 10^8$ $\text{м}^{-3} \text{ К}^{-1}$
280	1,261	1006	1,78	1,411	2,417	1,90	0,713	3,57	1,793
283	1,247	1006							
285	1,240	1006	1,79	1,443	2,452	1,96	0,711	3,51	1,686

290	1,218	1006	1,81	1,486	2,485	2,03	0,710	3,44	1,558
293	1,205	1006	1,82	1,510	2,593	2,14	0,709	3,41	1,495
295	1,197	1006	1,83	1,529	2,609	2,17	0,709	3,39	1,450
300	1,177	1006	1,85	1,568	2,650	2,22	0,708	3,33	1,354
303	1,165	1006	1,86	1,600	2,675	2,29	0,708	3,30	1,289
305	1,158	1006	1,87	1,615	2,691	2,31	0,707	3,28	1,257
310	1,139	1007	1,89	1,659	2,731	2,38	0,705	3,22	1,170
313	1,128	1007	1,91	1,696	2,756	2,43	0,705	3,19	1,109
315	1,121	1007	1,92	1,713	2,770	2,45	0,704	3,17	1,080
320	1,103	1007	1,94	1,759	2,805	2,52	0,703	3,12	1,008
323	1,093	1007	1,96	1,795	2,826	2,57	0,702	3,09	0,959

В настоящее время имеется множество аналитических и практических формул для вычисления коэффициента конвективного теплоотдачи [86-98].

В работе [86], предполагая, что воздух является идеальным газом, найдена зависимость числа Рэлея от определяющего размера и разности температуры материала и окружающей среды. В работе [90] число Рэлея представлено в виде [90]

$$Ra = g \frac{\Delta T}{T} \ell^3 \frac{c_p \rho^2}{\lambda \mu} . \quad (1.2)$$

Как видно из формулы (1.2), число Рэлея зависит от температурного фактора  $\frac{\Delta T}{T}$ , определяющего размера  $\ell$  и физических свойств воздуха.

С другой стороны, число Рэлея можно выразить, используя соотношения из молекулярно-кинетической теории и теории теплообмена [86]. В молекулярно-кинетической теории коэффициент теплопроводности и динамическая вязкость соответственно выражаются формулами [107, 108]

$$\lambda = f_e \mu C_p / \gamma \text{ и } \mu = 0,5 v_{ap} \Lambda p , \quad (1.3)$$

где  $f_e$  – коэффициент Эйкена;  $C_p$  – теплоемкость газа при постоянном давлении;  $v_{ap}$  – средняя арифметическая скорость движения и  $\Lambda$  – средняя длина свободного пробега молекул газа;  $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$  – показатель адиабаты.

Среднеарифметическая скорость и средняя длина свободного пробега молекул газа определяются следующими соотношениями [107]:

$$\vartheta_{ap} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}, \quad \Lambda = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi\sigma^2 P \left(1 + \frac{C_S}{T}\right)}, \quad (1.4)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана;  $m$ ,  $\sigma$  – масса и эффективный диаметр молекулы газа;  $C_S$  – постоянная Сазерленда;  $P$  – нормальное атмосферное давление.

В работе [86] для числа Рэлея получено выражение

$$Ra = \Omega_P \frac{\Delta T \left(1 + \frac{C_S}{T}\right)^2}{T^4} l^3. \quad (1.5)$$

Для молекул воздуха [86]

$$\Omega_P = 4,04 \cdot 10^{17} \frac{K^3}{m^3}$$

В четвёртой главе мы проведём сравнительный анализ экспериментально полученных и теоретически вычисленных значений коэффициента конвективного теплоотдачи для алюминиевых образцов высокой чистоты А5N. Для этого будем использовать формулы (1.2) и (1.5) для определения чисел Рэлея и Нуссельта.

Для теплоемкости, так же, как и для других физических свойств материалов, характерны размерные зависимости. В работах [109-113] приведены результаты исследований, направленных на изучение влияния нанокристаллической структуры на механические и теплофизические характеристики металлов.

Эксперименты дают значения теплоемкости наночастиц (нанокластеров), превышающие теплоемкость 2–5 раз выше, чем у обычных материалов. Согласно работе [114] теплоемкость кластеров крупнозернистой меди размером порядка 50 нм в интервале температур от 200 К до 450 К превышает теплоемкость обычной меди в 1,2-2,0 раза. Для наночастиц никеля диаметром 22



нм в интервале температур 300-800 К теплоемкость в два раза выше, чем теплоемкость объемного никеля. [115]. Исследование теплоемкости наноструктур состоящих из кластеров никеля диаметром 10 нм методом рассеяния быстрых нейтронов [116] также показали увеличение теплоемкости таких материалов в 1,5-2 раза.

Результаты измерения теплоемкости аморфного, нанокристаллического и поликристаллического селена в интервале температур 220-500 К [117] показали небольшое увеличение теплоемкости нанокристаллического селена по сравнению с объемной фазой.

В работе [109] теплоемкость металлических нанокластеров никеля и меди исследовали с использования компьютерного молекулярно-динамического эксперимента с использованием потенциала сильной связи. Для нанокластеров никеля диаметром 2 нм увеличение теплоемкости составляло 14 %, с ростом размера кластеров до 6 нм в диаметре уменьшался до 10%. Авторы пришли к выводу, что теплоемкость наноразмерных объектов действительно должно превышать теплоемкость соответствующей объемной фазы, но не в несколько раз. Таким образом, результаты экспериментальных работ [114-116], предсказывающие многократное увеличение теплоемкости нанокластеров и наноструктурированных материалов, являются, очевидно, ошибочными [118-122].

В работе [118] с использованием термодинамика поверхностей, а также на основе данных компьютерного эксперимента найдено, что при  $T=150$  К теплоемкость наночастицы палладия превышает теплоемкость объемного материала на 12-16%.

Проблема аномально высоких экспериментальных значений теплоемкости металлических нанокластеров проанализирована в работах [118-122]. На основе проведенного теоретического рассмотрения, результатов моделирования и анализа различных экспериментальных результатов сделан вывод о том, что рост теплоемкости в наноматериалах не связано с повышенной теплоемкостью отдельных кластеров.

В работах [118,119] изучалась теплоёмкость алюминиевых нанокластеров. Полученные данные были сопоставлены с экспериментальными результатами по теплоёмкости алюминия марки А5N, которые были получены в нашей лаборатории [56]. В ходе сравнения выяснилось, что при низких температурах наблюдается расхождение в 12%, и с повышением температуры оно уменьшается. Было обнаружено, что с увеличением размера нанокластеров разница между их теплоёмкостью и теплоёмкостью образцов макроразмеров уменьшается.

На основе анализа этих результатов можно сделать вывод, что теплоёмкость металлических материалов не зависит от их размеров и формы.

В последующих главах 3 и 4 при расчете коэффициентов теплоотдачи мы будем исходить из того, что теплоемкость металлического материала не зависит от его размера и формой, а зависит исключительно только от температуры.

### **Выводы и постановка задач**

Коэффициент теплопередачи зависит от множества факторов, среди которых форма и состояние поверхности образца имеют первостепенное значение и могут быть определены экспериментально. Достоверное знание этого коэффициента является необходимым условием для эффективного проектирования систем теплообмена на металлической основе. Состояния поверхности материала оказывают влияние как на излучательный, так и на конвективный теплообмен, что требует их обязательного учета при проведении точных термических расчетов.

Механические свойства, такие как прочность, твердость, пластичность и хрупкость, сильно зависят от диаметра и формы образца, в то время как длина образца оказывает сравнительно меньшее влияние.

В НИЛФКС имени профессора Б. Нарзуллоева для оценки коэффициентов теплоотдачи широко используют метод охлаждения тела. Этот метод включается в измерения скорости, с которой тело теряет тепло в окружающую

среду. Анализируя временные изменения температуры тела и принимая во внимание рассчитанную теплоемкость, можно оценить коэффициенты теплопередачи.

Теоретическое изучение процесса охлаждения металлических материалов представляет значительную сложность ввиду множества взаимосвязанных явлений, протекающих при охлаждении компонентов в реальных эксплуатационных условиях. Данный факт делает необходимым проведение экспериментальных исследований для более полного и детального понимания механизма охлаждения.

В качестве объектов изучения часто применяются простые геометрические формы — цилиндры, сферы и параллелепипеды, которые выступают базовыми элементами более сложных конструкций. В связи с этим анализ кинетики охлаждения и определение коэффициентов теплоотдачи для таких форм имеют одновременно научное и практическое значение.

Обзор существующих научных исследований показывает, что взаимосвязь между теплофизическими свойствами металлов и их геометрическими параметрами остается недостаточно изученной. Это подчеркивает актуальность систематического влияния формы и размеров металлических образцов влияют на равномерность температурного поля, скорость охлаждения и эффективность процессы теплообмена.

Результаты исследований механических свойств металлов и сплавов в [17-21] показывают, что использование результатов лабораторных исследований образцов малых размеров для диагностики крупногабаритных технических деталей и изделий абсолютно неприемлемо, поскольку в большинстве случаев не совпадают, а то и прямо противоположны.

В доступных базах научной литературы практически отсутствуют данные по влиянию размера образца на его тепловые характеристики. В настоящее время теории, объясняющей зависимость теплофизических свойств металлических материалов от размера образцов не разработано. Поэтому накопление экспериментальных данных по влиянию размера образцов на процесс

теплоотдачи в случае естественного воздушного охлаждения является актуальным и своевременным.

Исследование влияния размера и формы металлических образцов на их теплофизические свойства находится на переднем крае современных материаловедческих и нанотехнологических исследований. В будущем ожидается активное развитие как фундаментальных, так и прикладных направлений, что открывает возможности для создания новых материалов с уникальными технологическими характеристиками и широким спектром применения.

## **ГЛАВА II. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛООТДАЧИ МЕТАЛЛОВ**

### **2.1. Экспериментальная установка**

Во второй главе описывается принцип работы экспериментальной установки, предназначенного для изучения однородности температурного поля, кинетики охлаждения и процессов теплоотдачи металлических материалов, а также методика обработки полученных данных.

Для анализа временной зависимости температуры образца использован метод охлаждения. Этот метод базируется на уравнении теплового баланса и законе внешней теплопроводности Ньютона — Рихмана, который описывает внешний теплообмен.

Для изучения теплофизических характеристик твердых материалов чаще всего применяются методы нагревания. Исследования, проведенные в научно-исследовательской лаборатории «Физики конденсированного состояния» имени профессора Б. Нарзуллоева НИИ ТНУ, показали, что метод охлаждения является наиболее эффективным и простым. Этот метод включает измерение изменения температуры образца, предварительно нагретого до определенной температуры, поскольку он естественным образом охлаждается с течением времени.

Динамические методы измеряют теплофизические свойства при постепенном изменении температуры, позволяя определить, как эти свойства изменяются в зависимости от температуры [123-133]. Однако достижение плавного изменения температуры часто является сложной задачей из-за влияния внешних факторов.

Ранее нами был получен малый патент Республики Таджикистан на прибор для измерения теплоемкости твердых тел [134]. В процессе выполнения исследований по теплофизическим свойствам было выяснено, что коэффициенты теплоотдачи для различных металлов сильно отличаются друг от друга,

что обязательно нужно учитывать [54, 57–60, 135–137]. В работе [135] показано, что данный прибор можно использовать для исследования кинетики охлаждения и оценки коэффициентов теплоотдачи, если для теплоемкости можно использовать правила Неймана–Коппа. Недостатком данного прибора является измерение температуры от времени охлаждения только по одной оси. Поэтому для измерения временной зависимости температуры тела относительно трех осей нами разработана и собрана новая установка [138]. На данную установку тоже получен малый патент Республики Таджикистан за №1648 от 02.07.2025 г.

В работах [139, 140] приведено описание усовершенствованного прибора ИТС-400, с помощью которого можно одновременно измерять теплоемкость для четырёх образцов. В работе [140] вместо принципа работы прибора ИТС -400 приведено описание прибора из работы [134]. Авторы [134] в последующих своих работах [135], показали, что с помощью созданного ими прибора можно исследовать только кинетику охлаждения.

Измерения температуры образцов проводились одновременно в трех различных точках во время процесса охлаждения с использованием собранной нами экспериментальной установки, как показано на рисунке 2.1.

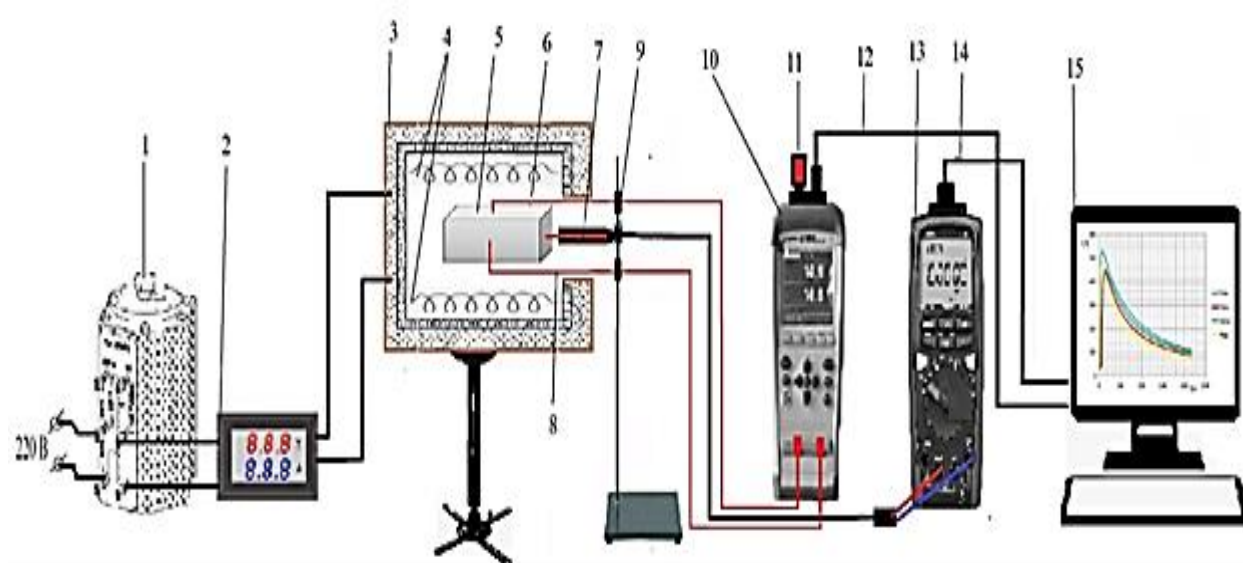


Рис. 2.1. Схема экспериментальной установки:

1 - ЛАТР типа РНО 250-2; 2- Digital multimeter DI 9208 L; 3- электропечь; 4- спирали; 5 - образец; 6, 7 и 8 - термопары; 9- держатель; 10- двухканальный портативный измеритель температуры АТ4202; 11-USB; 12 и 14 кабели соединения с компьютером; 13 - Digital Multimeter UT71B; 15- компьютер.

Образец 5 представляет собой тело с просверленным каналом на одном конце, в который вставлена термопара. Выводы термопары подключены к цифровому мультиметру UT71B (10), который имеет разрешение по температуре  $\pm 0,1$  °C. Мультиметр подключен к компьютеру (15), что позволяет напрямую записывать данные измерений в табличной форме.

Нагрев рабочей камеры печи регулируется регулируемым автотрансформатором (1) и контролируется с помощью цифрового мультиметра Digital multimeter DI 9208 L (2). Образец помещают в печь и нагревают до температуры, немного ниже температуры его плавления.

Температура внутри камеры нагрева контролируется с помощью цифрового термометра Digital Multimeter UT71B (13). После достижения заданной температуры образец быстро извлекается из печи в воздух.

С помощью термометра фиксируется значение температуры окружающей среды. В момент, когда температура образца достигает определенная температура (для всех образцов из этого материала оно постоянное), начинается автоматический отсчёт времени охлаждения и температуры образца до момента, когда она достигает 35–40 °C. Каждые 1 или 10 секунд компьютер автоматически фиксирует температуру образца. Итоговый результат отображается на компьютере (15) в виде таблицы зависимости  $T=f(t)$ . Относительная ошибка измерения температуры в интервале от 40 °C до 400 °C составляла  $\pm 1$  %, а в интервале от 400 °C до 1000 °C -  $\pm 2,5$  %.

Для измерения температуры одновременно в трех направлениях использовали Digital Multimeter UT71B и двухканальный портативный измеритель температуры АТ4202 (10), а также для каждого направления отдельно с помо-

щью Digital Multimeter UT71B. Температурный измеритель AT4202 использует высокопроизводительный микропроцессор ARM и может собирать двухканальные данные о температуре одновременно и быстро реагировать на них. AT4202 выполняет функцию передачи данных через USB (11). Стандартное компьютерное программное обеспечение может реализовать анализ данных с высокой, средней и низкой скоростью сканирования. Компенсация холодного спая. Программное обеспечение ATS42 для сбора данных. Погрешность 0,2 % +1°C. Диапазон измеряемой температуры от -200 до 1800 °C. Разрешение 0,1°C. Скорость 1 с/канал.

Из величины измеренной температуры образца вычитаем температуру окружающей среды  $\Delta T = T - T_0$ . Далее строим график зависимости  $\Delta T$  от времени  $\tau$ . Все вычисления проводились на компьютере с помощью программы Microsoft Office Excel. Обработка результатов измерений и аппроксимации экспериментальных данных проводилась на платформе пакетов математических программ Sigma Plot 10 и Origin Pro 17. Как правило, удавалось подобрать такую зависимость температуры образца от времени, что коэффициент регрессии не был ниже 0,9998.

Перед каждой серией измерений надежность экспериментальной установки проверялась путем записи стандартной кривой охлаждения образца меди.

## **2.2. Выбор и методика приготовления металлических образцов**

Для исследования из трех основных простых форм (пластина, цилиндр, шар) были выбраны цилиндрические (сталь 45, медь, латунь Л63), параллелепипедные (бронза) и сложная форма (алюминий марки А5N).

После снятия кинетики охлаждения исходных цилиндрических образцов из них на токарном станке модели Pinacho изготавливались образцы диаметром поменьше.



Все образцы были изготовлены в научно-исследовательской лаборатории “Физики конденсированного состояния имени профессора Б.Н. Нарзуллоева” НИИ ТНУ.

Массу образцов измеряли с помощью электронных весов марки GARIN «Точный Вес JS3» с наибольшим пределом взвешивания 0,2 кг и точностью взвешивания 0,01 г. Геометрические размеры измеряли с помощью микрометра и штангенциркуля. Результаты измерений приведены в табл. 2.1- 2.4.

Таблица 2.1

Геометрические размеры и массы цилиндрических образцов из стали 45

Масса m, г	Диаметр d, мм	Высота h, мм	V, $10^{-6} \text{ м}^3$	S, $10^{-3} \text{ м}^2$
670,41	37	95	102,03	13,2
510,31	30	95	67,1175	10,4
350,42	25	95	46,609	8,4
210	20	95	29,83	6,6
120,5	15	95	16,777	4,8

Таблица 2.2

Геометрические размеры и массы цилиндрических образцов из латуни марки Л63

Масса m, г	Длина h, мм	Диаметр d мм	V, $10^{-6} \text{ м}^3$	S, $\text{см}^2$
194,78	133	15	23,5	66,2
128,30	87	15	15,4	44,5
59,12	41	15	7,2	19,3
36,38	25	15	4,4	15,3
19,02	13	15	2,3	9,6

Таблица 2.3

Геометрические размеры и плотность образца формы  
параллелипипеда из бронзы

Масса m, г	Длина a, мм	Ширина b, мм	Высота c, мм	V, 10 <sup>-6</sup> м <sup>3</sup>	$\rho, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$
75,73	24	9,9	43	10,21	7400

Таблица 2.4

Геометрические размеры и плотность цилиндрического образца из меди

Масса m (г)	Диаметр d (мм)	Высота h (мм)	V, 10 <sup>-6</sup> м <sup>3</sup>	S, см <sup>2</sup>
61.79	10	90	7,065	29,83
35,39	10	53	4.160	18,21

## ГЛАВА III. ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В МЕТАЛЛАХ

### 3.1. Тепловая изотропность бронзы формы параллелепипеда

Однородность температурное поле в металлических материалах является основанием для применения закона сохранения энергии или дифференциального уравнения теплопроводности Фурье при изучении временной зависимости температуры образца в процессе его охлаждения. Целью данного параграфа является выяснение распределения температурного поля в образце из бронзы формы параллелепипеда и проверка числа Био.

Для исследования распределения температурного поля были выбраны образцы бронзы формы параллелепипеда шириной 2,4 см, длиной 4,2 см и толщиной 0,9 см. Измерение температуры производили относительно всех трёх осей образца в широком интервале температуры.

На рис. 3.1 в качестве примера приведена зависимость температуры образца из бронзы от времени охлаждения относительно оси  $z$  (по высоте).

Обработка представленного графика с помощью программы Sigma Plot показала, что лучше всего он описывается уравнением с 6 параметрами вида

$$\Delta T = ae^{-b\tau} + ce^{-d\tau} + ke^{-l\tau} \quad (3.1)$$

где  $a, b, c, d, k, l$  постоянные для данного образца,  $\tau$  – время охлаждения.

В табл. 3.1 приведены результаты обработки графика зависимости температуры бронзы от текущего времени охлаждения с помощью программы Sigma Plot 10 (коэффициент регрессии, параметры уравнение (3.1) и стандартная ошибка).

Таблица 3.1

Значения коэффициента регрессии, параметров уравнения (3.1)  
и стандартная ошибка по результатам Sigma Plot-обработки кинетики  
охлаждения бронзового параллелепипеда относительно оси  $z$

R	Rsqr	Adj Rsqr	Standard Error of Estimate
1,0000	1,0000	1,0000	0,6383

	Coefficient	Std. Error	<i>t</i>	<i>P</i>
<i>a</i>	345,3	3,3005	104,6256	< 0,0001
<i>b</i>	0,0218	0,0003	75,2099	< 0,0001
<i>c</i>	367,1	7,7710	47,2362	< 0,0001
<i>d</i>	0,0046	0,0001	39,4159	< 0,0001
<i>k</i>	256,2	10,3697	24,7083	< 0,0001
<i>l</i>	0,0016	4,0383 $10^{-5}$	39,0269	< 0,0001

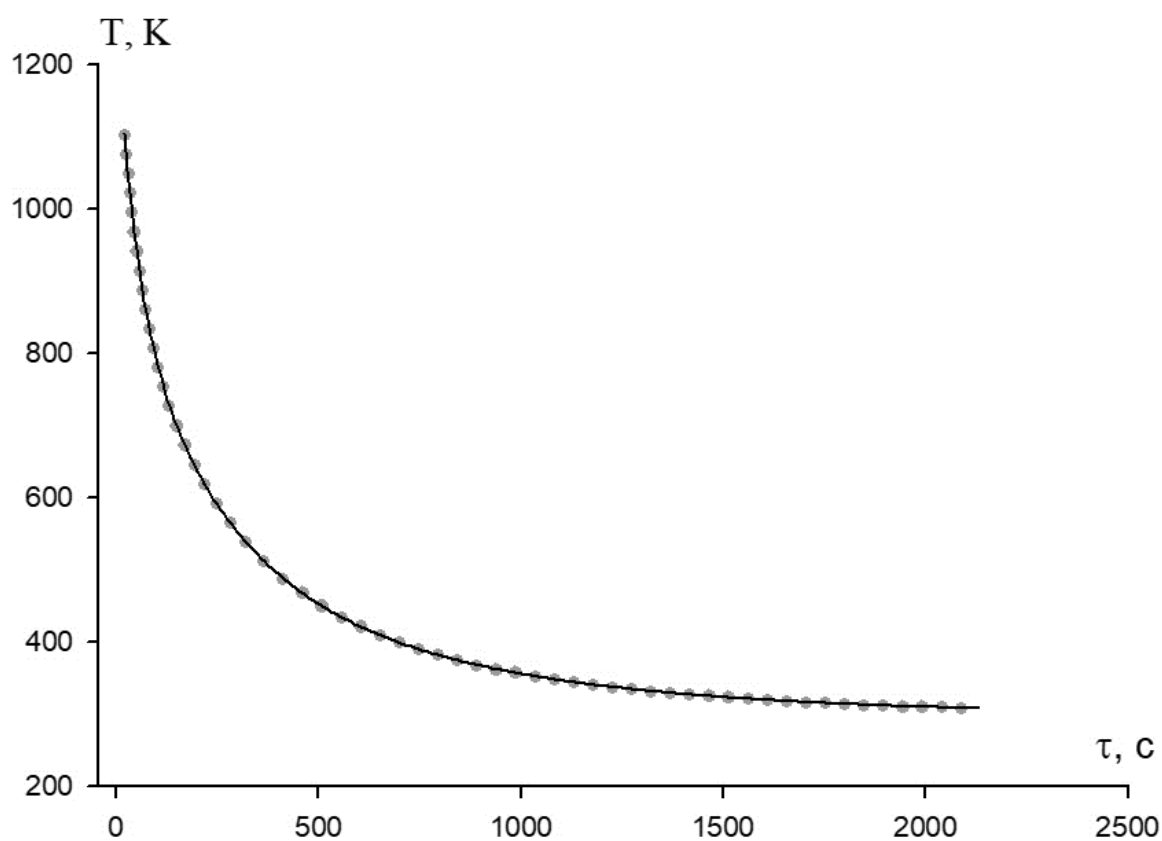


Рисунок 3.1. Изменение температуры образца при охлаждении относительно оси  $Z$ .

Формула (3.1) показывает, что количество теплоты, передаваемой от тела в окружающую среду, имеет три составляющих.

На рис. 3.2 приведены кривые охлаждения бронзы относительно оси  $z$  за счет излучательного, кондуктивного и конвективного теплоотдачи.

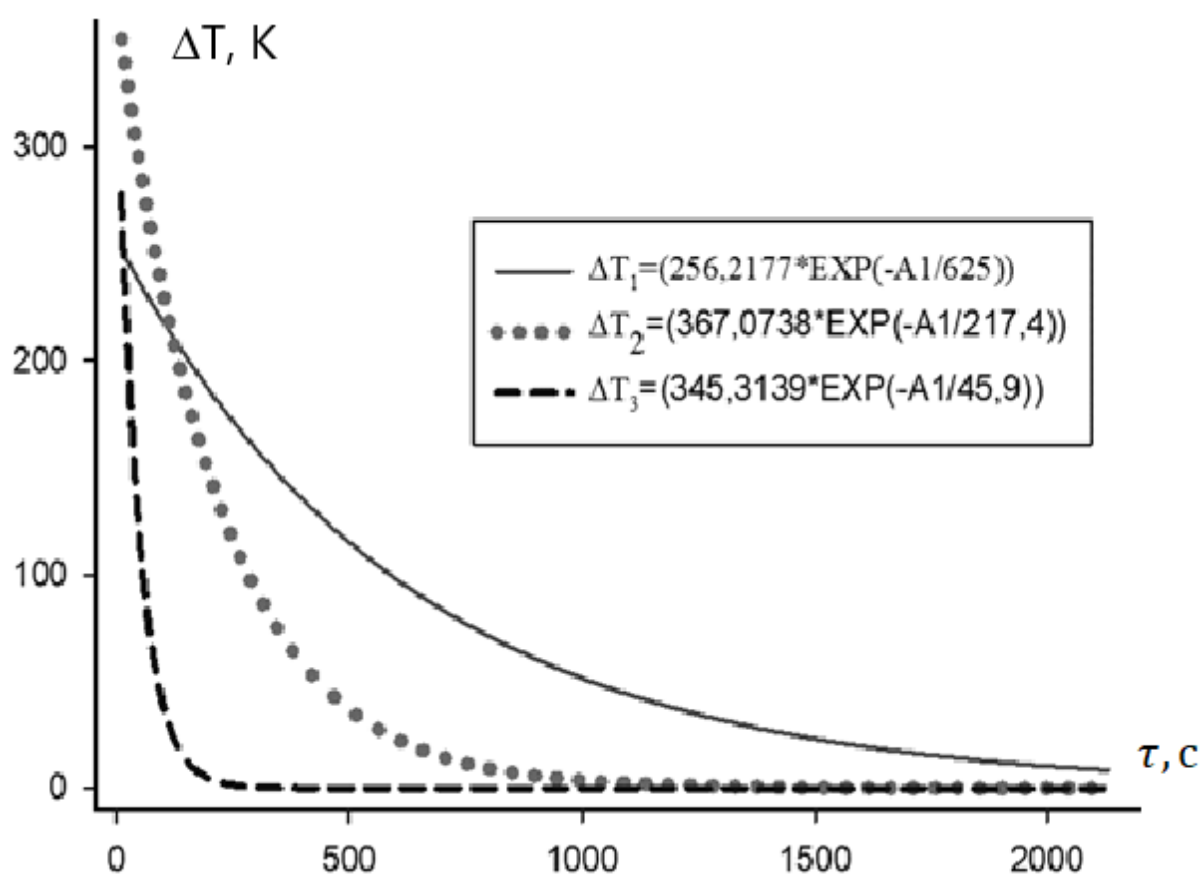


Рис. 3.2. Зависимость температуры бронзы от времени охлаждения относительно оси  $z$  за счет теплового излучения (----), теплопроводности (••••) и конвекции (——).

Дифференцируя уравнения (3.1), получим формулу для скорости охлаждения образца вида

$$\Delta T = -(a/b) e^{(-b\tau)} - (c/d) e^{(-d\tau)} - (k/l) e^{(-l\tau)}. \quad (3.2)$$

На рис. 3.3 приведены кривые зависимостей скоростей охлаждения бронзы относительно оси  $z$  за счет излучательной, кондуктивной и конвективной теплоотдачи.

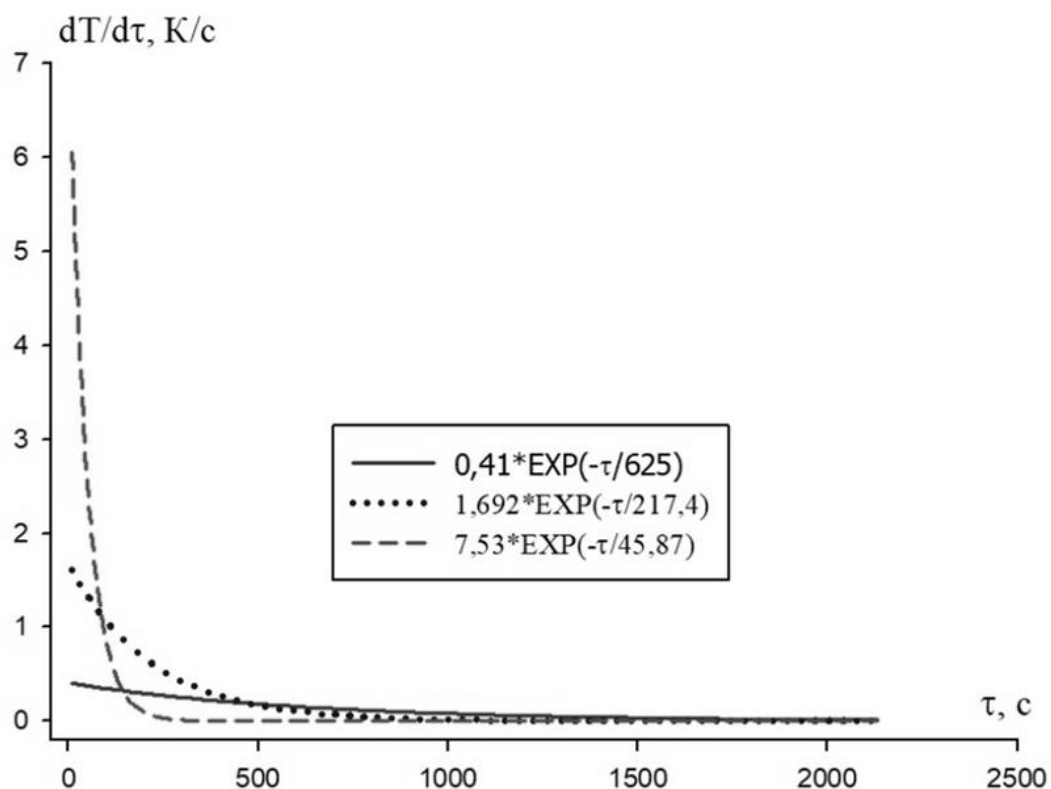


Рис. 3.3 Временные зависимости скоростей охлаждения бронзы относительно оси  $z$  за счет излучательного (---), кондуктивного (•••) и конвективного (—) теплоотдачи.

На рис. 3.4 приведена кинетика охлаждения бронзы по измерениям относительно оси  $x$  (по ширине), а в табл. 3.2 приведены значения параметров уравнения (3.1) для этого случая.

Таблица 3.2

Значения коэффициента регрессии, параметров уравнения (3.1) и стандартная ошибка по результатам Sigma Plot-обработки кинетики охлаждения бронзового параллелепипеда относительно оси  $x$

R	Rsqr	Adj Rsqr	Standard Error of Estimate
1,0000	1,0000	1,0000	0,7079

	Coefficient	Std. Error	$t$	$P$
$T_0$	297,62	0,8313	358,0215	< 0,0001
$a$	317,50	2,8839	110,0925	< 0,0001
$b$	0,0232	0,0003	67,1406	< 0,0001
$c$	355,20	14,9195	23,8076	< 0,0001
$d$	0,0041	0,0001	29,4097	< 0,0001
$k$	237,14	17,0710	13,8916	< 0,0001
$l$	0,0016	$6,7663 \cdot 10^{-5}$	23,0209	< 0,0001

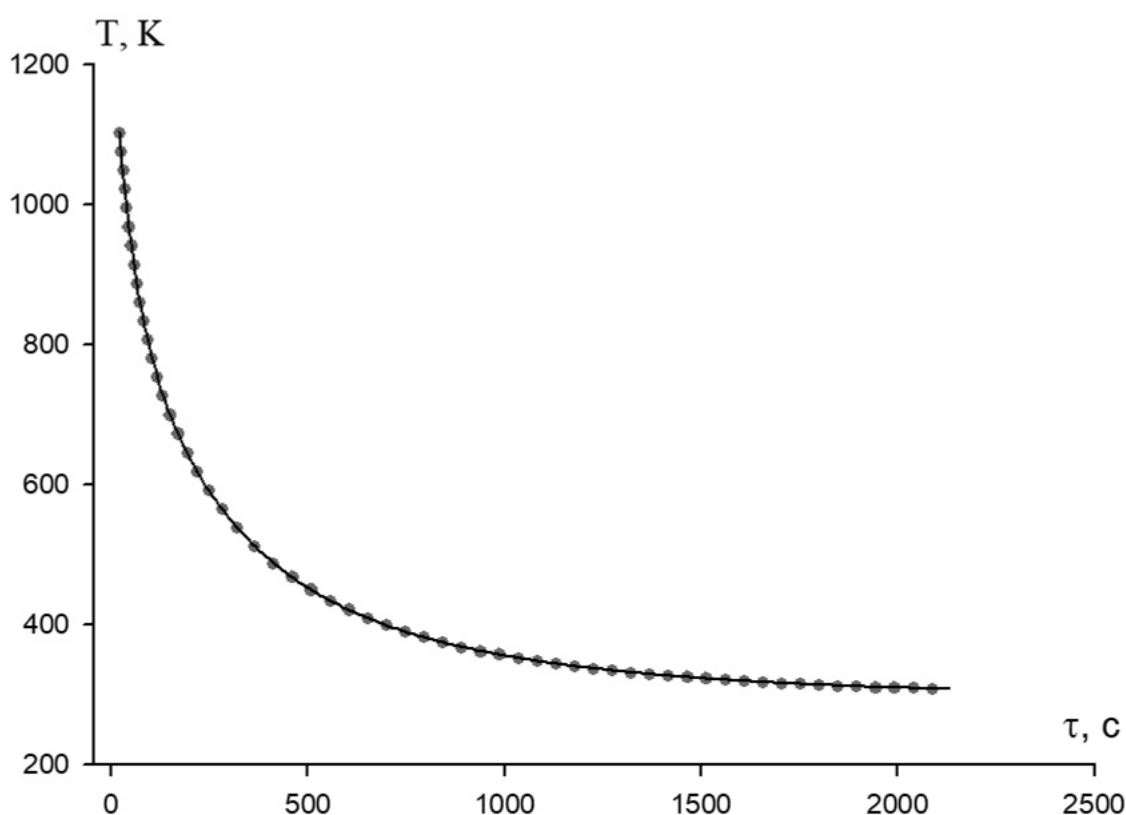


Рис. 3.4. Временная зависимость температуры бронзы относительно оси  $x$  (ширины).

На рис. 3.5 приведены кривые охлаждения бронзы за счет излучательного, кондуктивного и конвективного теплообмена относительно оси  $x$ , а на рис. 3.6 приведены построенные на их основе временные зависимости скоростей охлаждения образца.

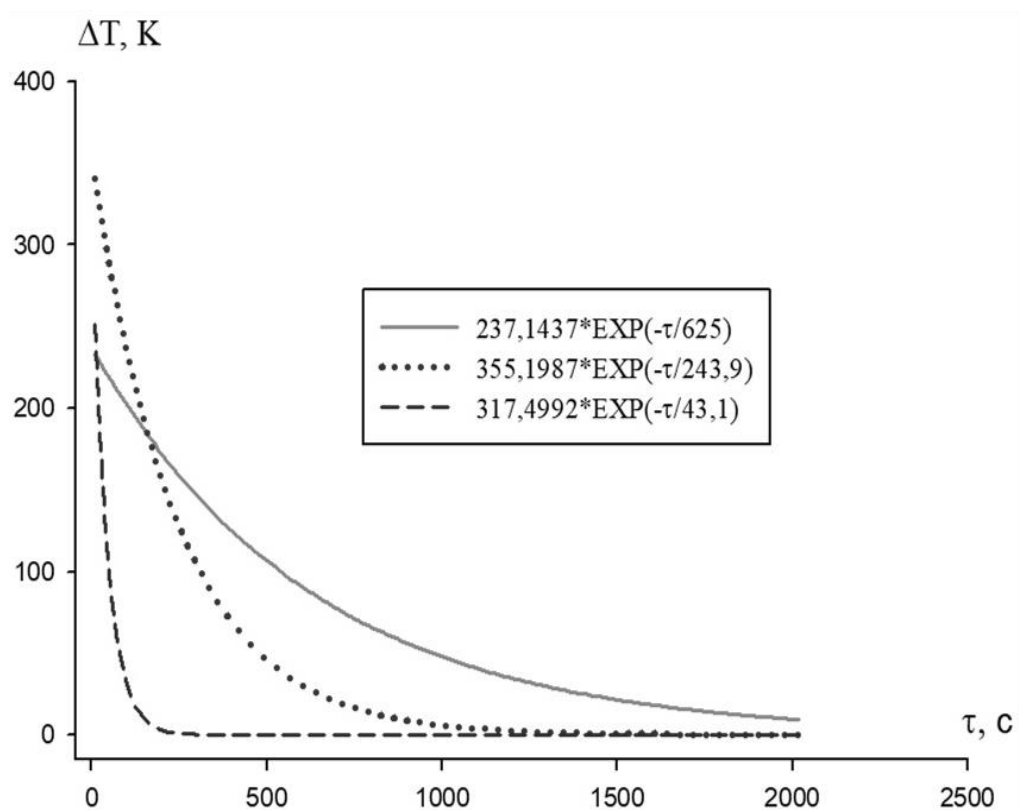


Рис. 3.5. Зависимость температуры бронзы от времени охлаждения

относительно оси  $x$  за счет излучательного (----),  
конвективного (••••) и конвективного (—) теплоотдачи.

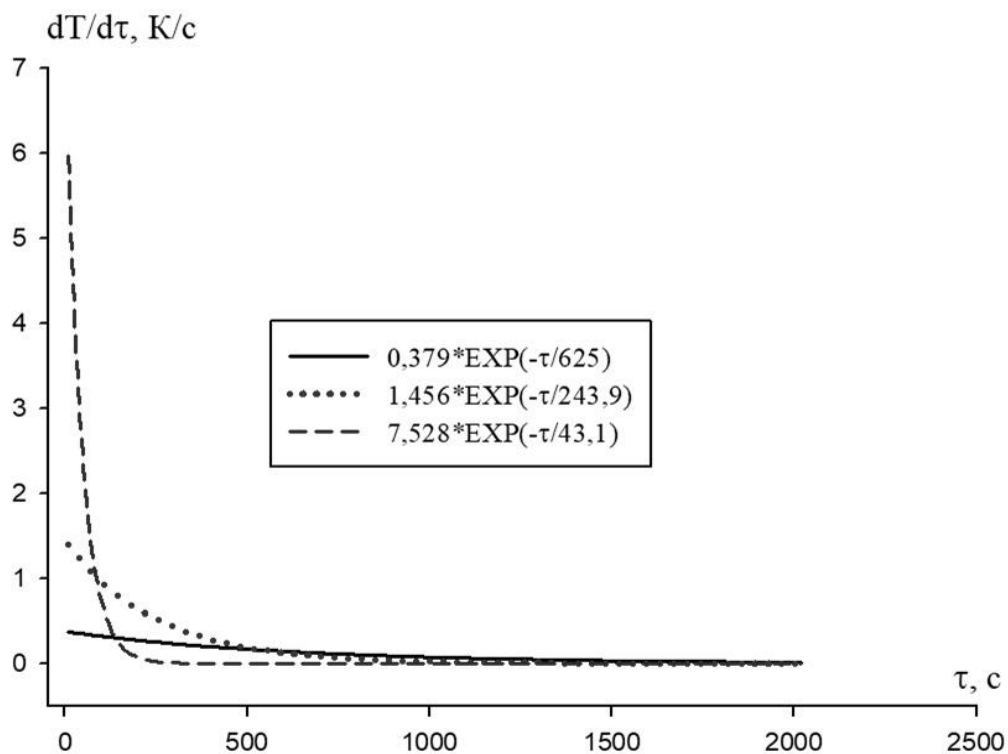


Рис. 3.6. Временная зависимость скорости охлаждения образца из бронзы

относительно оси  $x$  за счет излучательного (----),  
кондуктивного (••••) и конвективного (—) теплоотдачи.



Аналогичным образом на рис. 3.7-3.9 приведены общая и дифференциальные кривые охлаждения и временные зависимости скорости охлаждения бронзы, измеренные относительно оси  $y$ , а в табл. 3.3 приведены значения их постоянные Sigma Plot-обработки.

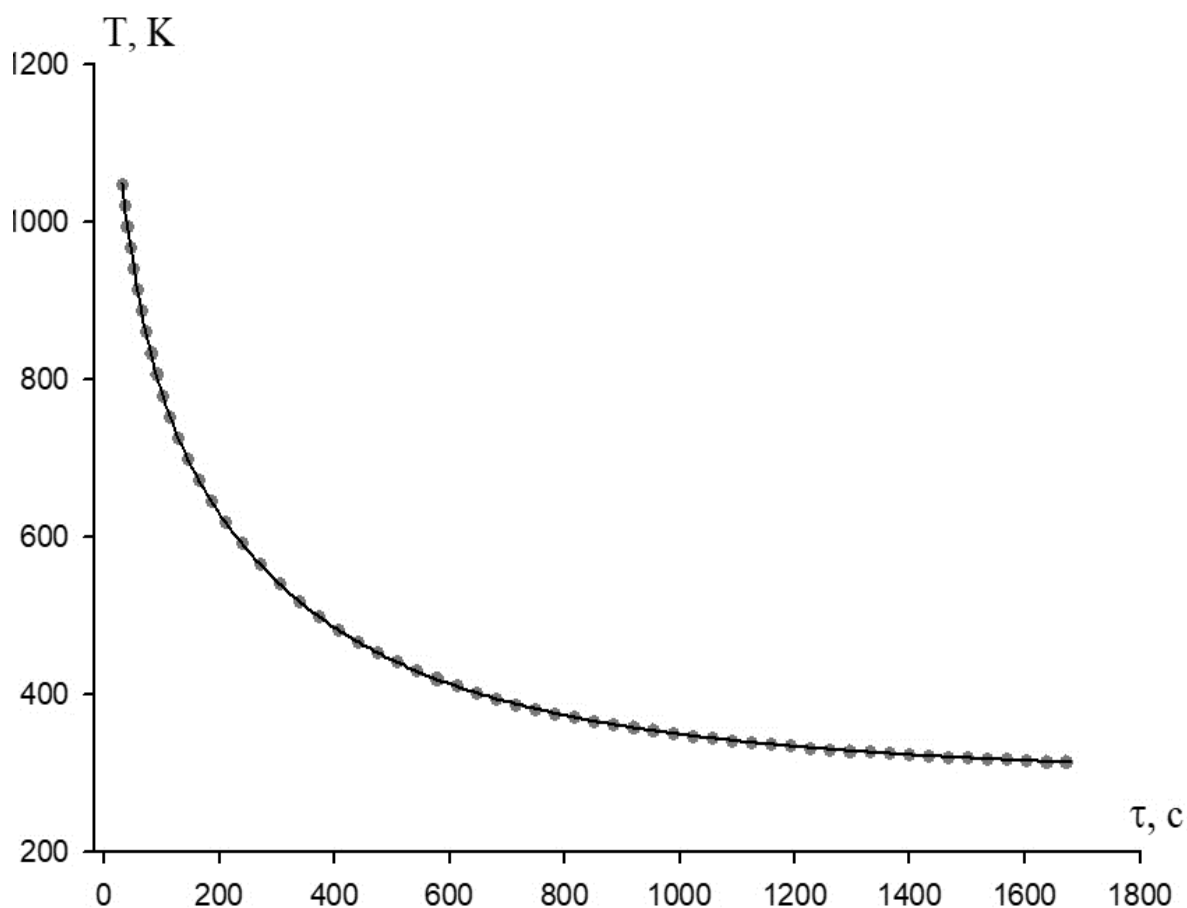


Рис. 3.7. Зависимость температуры образца бронзы от времени охлаждения относительно оси  $y$ .

Таблица 3.3

Значения коэффициента регрессии, параметров уравнения (3.1) и стандартная ошибка по результатам Sigma Plot-обработки кинетики охлаждения бронзового параллелепипеда относительно оси  $y$

R	Rsqr	Adj Rsqr	Standard Error of Estimate
1,0000	1,0000	1,0000	0,5474

	Coefficient	Std. Error	$t$	$P$
$T_0$	296,1	1,2816	231,0213	< 0,0001
$a$	374,8	3,2132	116,6338	< 0,0001
$b$	0,0225	0,0003	68,9676	< 0,0001
$c$	391,2	14,6787	26,6518	< 0,0001
$d$	0,0045	0,0002	29,8030	< 0,0001
$k$	231,3	17,1088	13,5184	< 0,0001
$l$	0,0016	$8,3383 \cdot 10^{-5}$	18,8765	< 0,0001

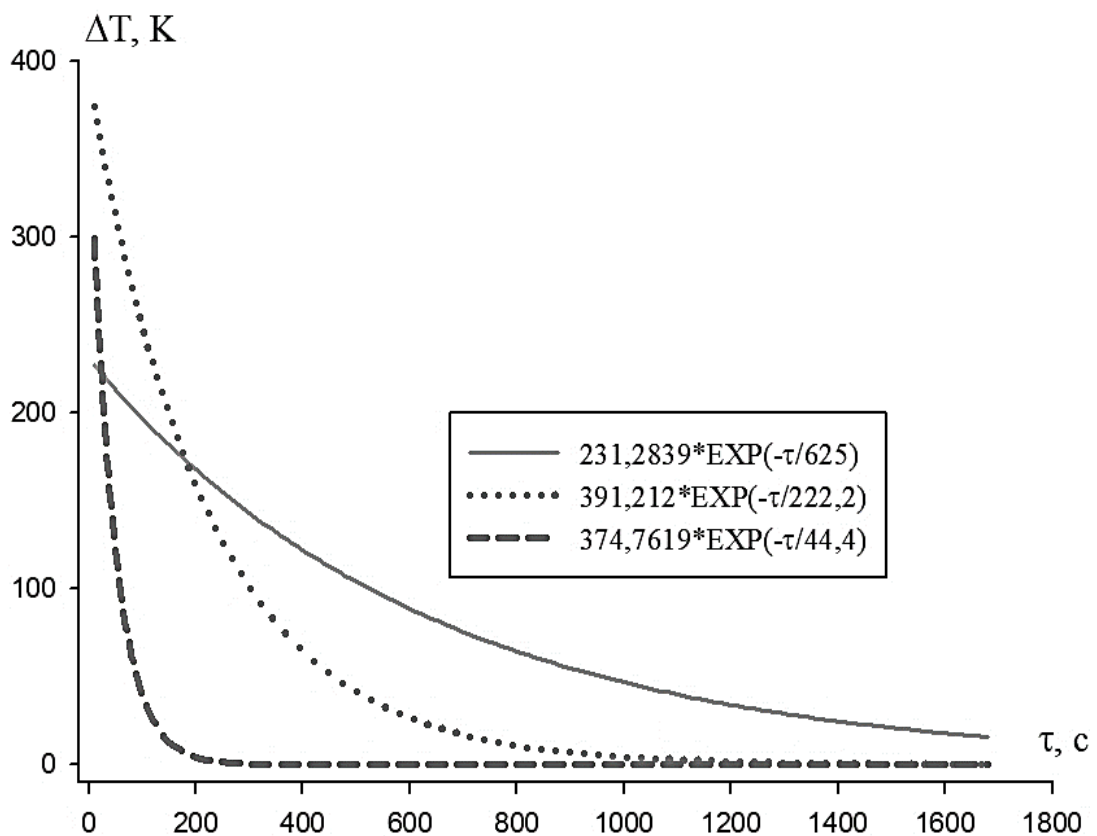


Рис. 3.8. Зависимость температуры бронзы от времени охлаждения относительно оси  $y$  за счет излучательного (----), кондуктивного (••••) и конвективного (—) теплоотдачи.

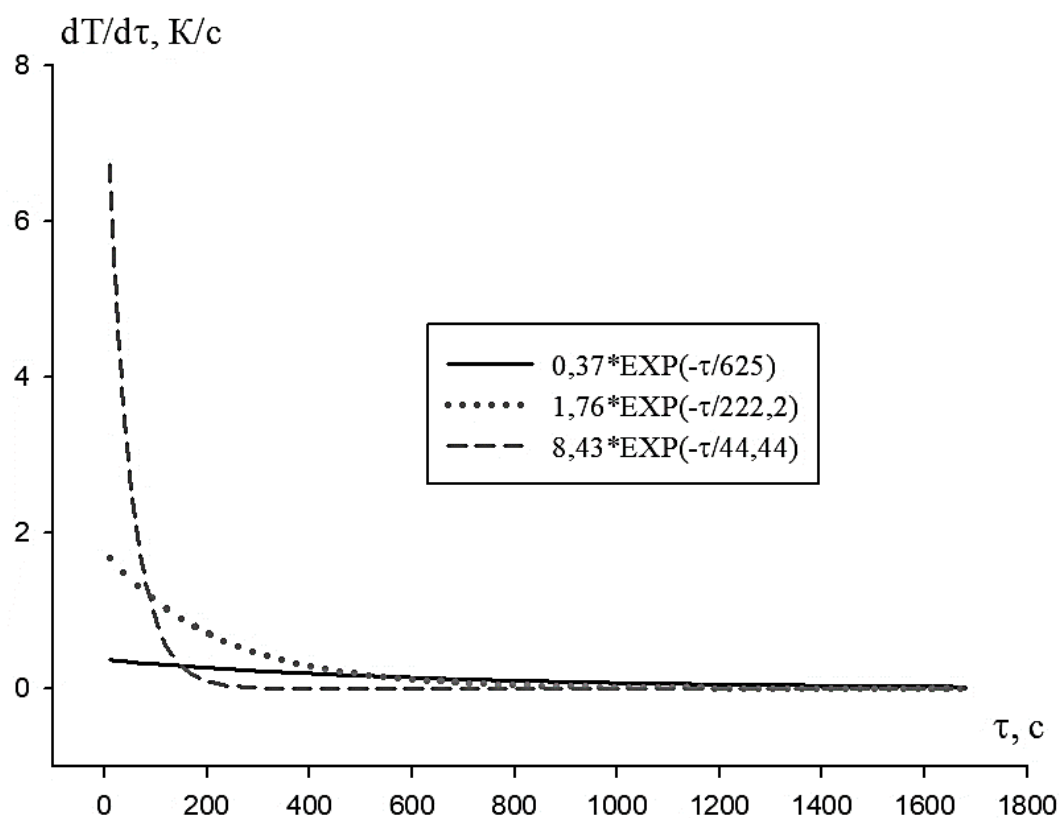


Рис. 3.9. Временная зависимость скорости охлаждения образца из бронзы относительно оси  $y$  за счет излучательного (----), кондуктивного (••••) и конвективного (—) теплоотдачи.

В табл. 3.4 приведены значения параметров уравнения (3.1) для всех трех осей образца бронзы.

Таблица 3.4

Значения параметров уравнения (3.1) и характерных времен охлаждения бронзы по осям  $x$ ,  $y$  и  $z$

Ось	$\Delta T_{\text{и}}, \text{K}$	$\tau_1, \text{c}$	$\Delta T_{\text{т}}, \text{K}$	$\tau_2, \text{c}$	$\Delta T_{\text{к}}, \text{K}$	$\tau_3, \text{c}$	$T_{\text{с}}, \text{K}$
$x$	317,5	42,0	355,2	232,5	237,1	625	297,6
$y$	374,8	44,4	391,2	222,2	231,3	625	296,1
$z$	345,3	42,9	367,1	208,3	256,2	625	290,0

Кроме этого, для проверки была измерена кинетика охлаждения одновременно по всем трем осям. На рис. 3.10 приведены результаты для кривых охлаждения относительно осей  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , полученных по показаниям трех термопар.

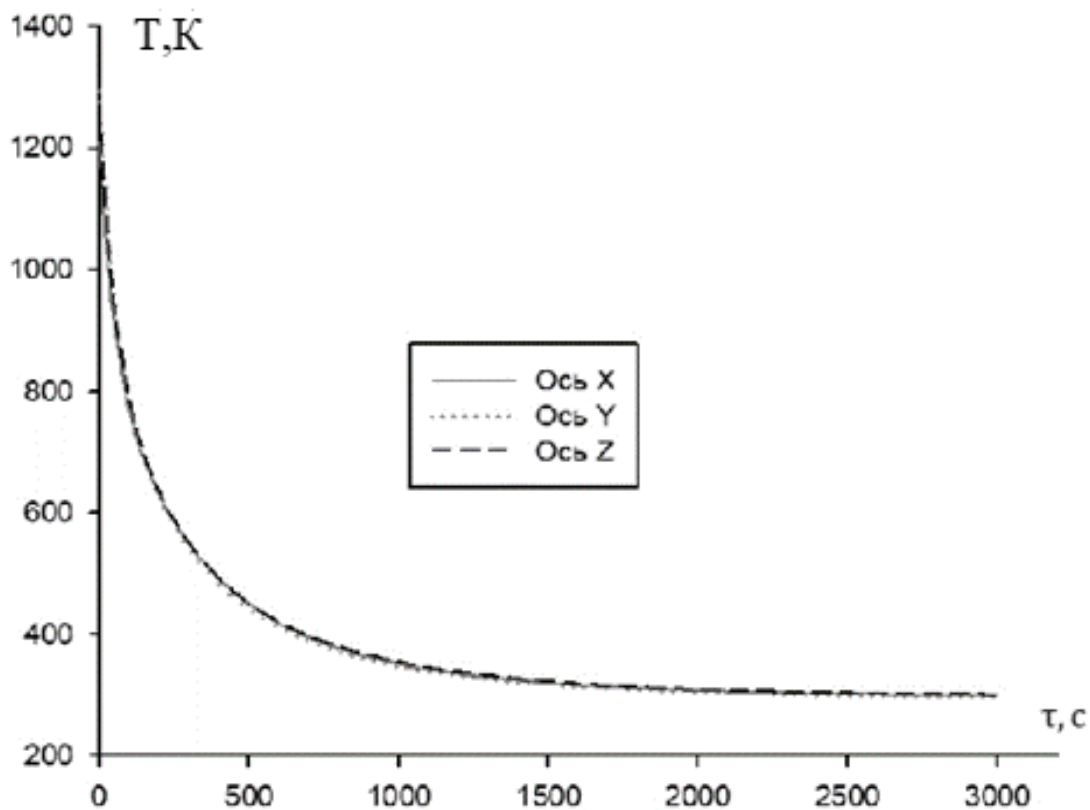


Рис. 3.10. Зависимости температур образца от времени охлаждения, полученные по показаниям трех термопар. относительно осей  $x$ ,  $y$  и  $z$ .

Обработка этих кривых показало хорошее совпадение с измерениями в отдельности для каждого направления.

Из рисунка 3.10 видно, что все зависимости лежат на одной кривой с очень высокой точностью. В пределах погрешности эксперимента значения постоянных уравнения (3.1) для всех осей полностью совпадают. Это означает, что значение температуры в образцах зависит только от времени и не зависит от координат, то есть образец является “термически тонким” и изотропным.

Критерии Био и Фурье являются критериями теплового подобия. Число Био представляет собой отношение скорости кондуктивного переноса тепла к скорости аккумуляции энергии в материале

$$Bi = \frac{\alpha V}{\lambda S}, \quad (3.3)$$

где  $\alpha$  - коэффициент теплоотдачи от поверхности тела к окружающей среде,  $\lambda$ -коэффициент теплопроводности материала тела. Число Био полезно для оценки, имеет ли тело однородную температуру или нет.

Для проверки полученных результатов нами было вычислено число Био. Так, для температуры 600 К общий коэффициент теплоотдачи бронзы составляет величину  $\alpha \approx 60 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$ , а его коэффициент теплопроводности при комнатной температуре составляет  $\lambda \approx 64 \frac{\text{Вт}}{\text{м К}}$ . С учётом отношения объема образца к площади поверхности  $V/S = 0,283 \text{ см}$  нами по формуле (3.2) вычислено число Био, которое оказалось равным  $Bi \approx 0,00265$ . Как видно, для выбранного нами образца, число Био существенно мало ( $Bi \ll 0,1$ ). Число Био меньше 0,1 означает, что вещество является «термически тонким», а температура может считаться постоянной во всем объеме материала [80,83,88-91].

Для алюминиевых образцов верхний предел температуры составлял 620 °С. В них наблюдается кондуктивно-конвективная (вместе) и лучистая теплоотдачи. Расширение области температурных исследований позволило нам впервые наблюдать по отдельности все составляющие теплоотдачи.

Таким образом, проведённые исследования кинетики охлаждения бронзы параллелепипедной формы показывают, что при естественном воздушном охлаждении основными механизмами теплоотдачи являются излучательный, кондуктивный и конвективный. Было установлено, что характерное время охлаждения растёт в следующем ряду механизмов теплоотдачи: излучательный < кондуктивный < конвективный. Результаты данного раздела диссертации нами опубликованы в работах [141-145].

### 3.2. Однородность температурного поля алюминия марки А5N сложной формы

Несмотря на значительный прогресс в моделировании теплообмена [80-91], влияние размера и геометрии образца на процессы теплоотдачи изучено недостаточно полно. В этой ситуации особое значение приобретает экспериментальное исследование кинетики охлаждения относительно пространственных осей металлов.

В продолжение этой тематики целью данного исследования является выяснение распределения температурного поля в образце из алюминия марки А5N неправильной (сложной) формы (рис. 3.11).



Рис. 3.11. Образец неправильной (сложной) формы.

Так, на рис. 3.12 приведены зависимости температуры алюминия А5N от времени охлаждения относительно всех трёх осей  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , снятых одновременно.

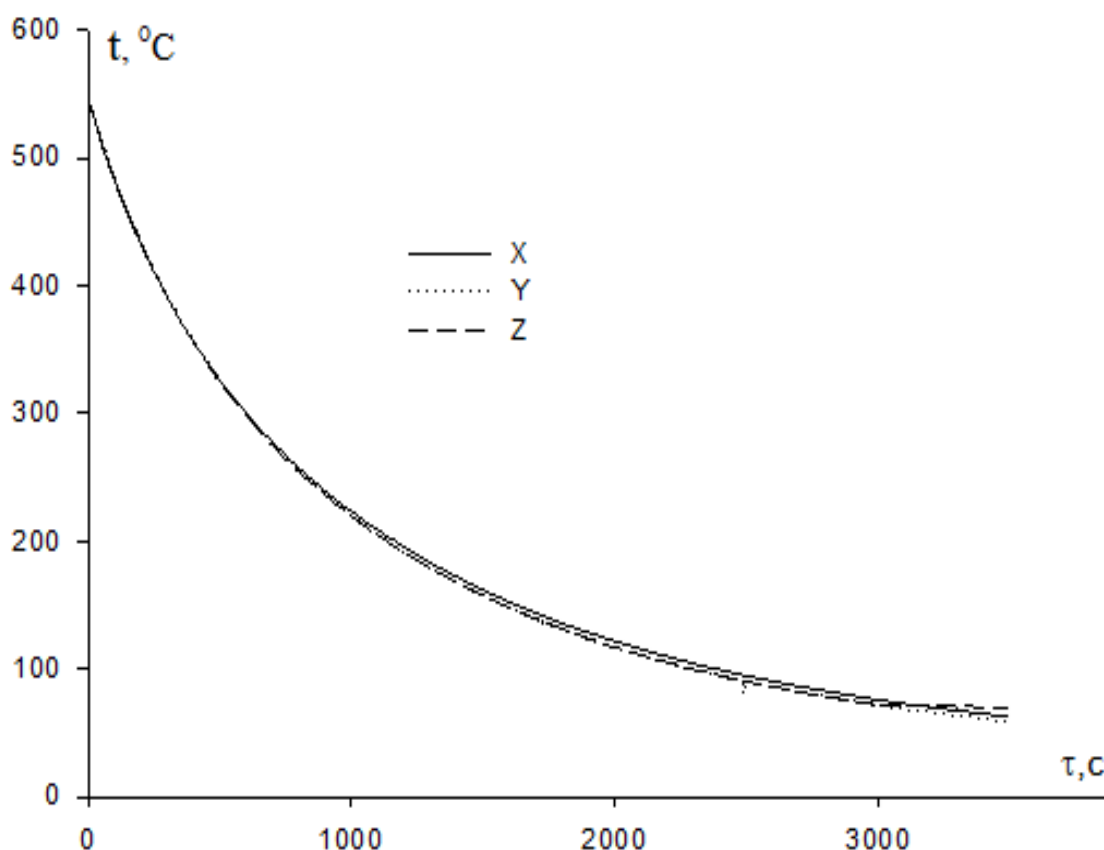


Рис. 3.12. Зависимость температуры образца относительно осей X, Y, Z от времени охлаждения

Как видно из рисунка, охлаждение образца не зависит от направления распространения тепла и все зависимости лежат на одной кривой.

Обработка данного графика с помощью программы Sigma Plot-10 показала, что кривые охлаждения хорошо описываются уравнением (3.1).

Для алюминия марки А5N формула (3.1) принимает вид

$$\Delta T = 81,61 e^{-\tau/263,16} + 362,67 e^{-\tau/1000} + 102,63 e^{-\tau/5000}. \quad (3.4)$$

Дифференцируя уравнение (3.4), получим формулу для расчёта скорости охлаждения вида

$$\frac{dT}{d\tau} = -0,31 e^{-\tau/263,16} - 0,36 e^{-\tau/1000} - 0,02 e^{-\tau/5000}. \quad (3.5)$$

На рис.3.13 приведены кривые охлаждения за счет излучательного, кондуктивного и конвективного теплоотдачи. На рис. 3.14 приведены зависимости скоростей охлаждения алюминия А5N от времени за счет излучательного, кондуктивного и конвективного теплоотдачи.

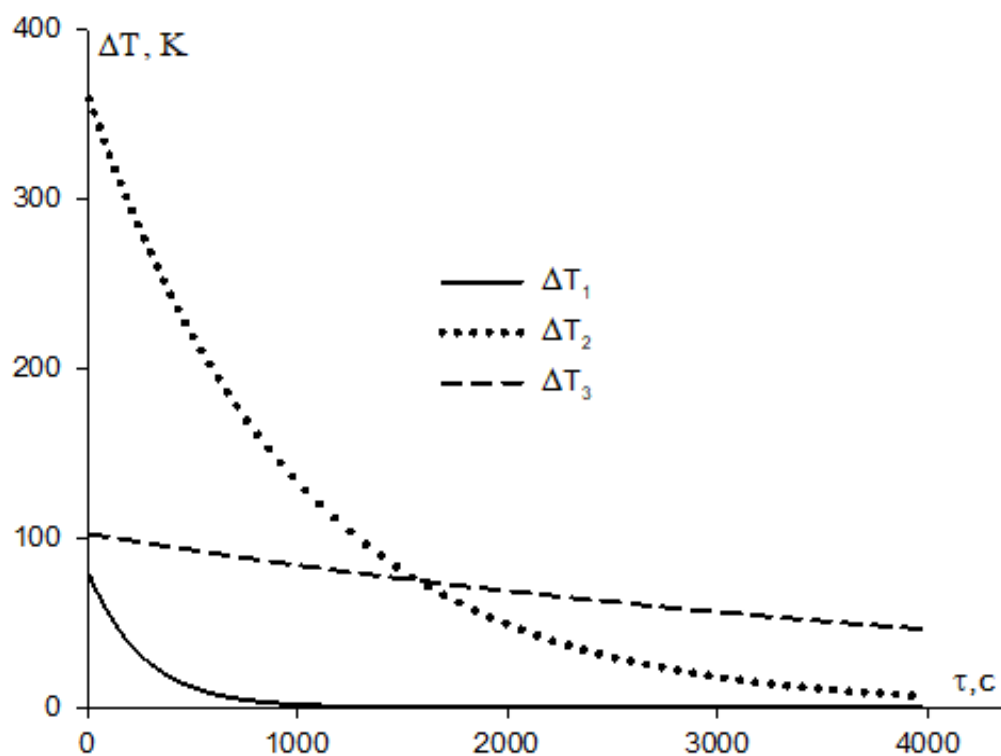


Рис. 3.13. Временная зависимость изменения температуры образца за счет излучательного ( $\Delta T_1$ ), кондуктивного ( $\Delta T_3$ ) и конвективного ( $\Delta T_2$ ) теплоотдачи.

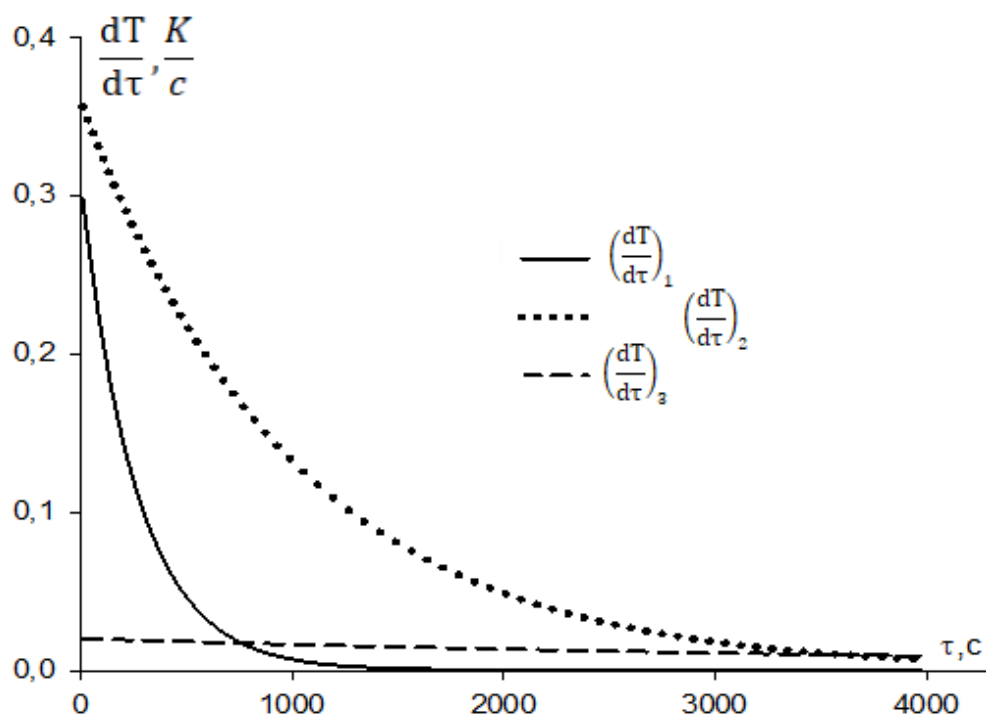


Рис. 3.14. Временные зависимости скоростей охлаждения алюминия А5N за счет излучательного, кондуктивного и конвективного теплоотдачи.



Как видно из приведенных рисунков, при высоких температурах образец охлаждается в основном за счет излучательного теплоотдачи, а при низких температурах - за счет конвективного.

Для проверки полученных результатов вычислим число Био для образца алюминия А5N с помощью формулы (3.2). Для температуры 600 К общий коэффициент теплоотдачи алюминия марки А5N  $\alpha \approx 14 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$  и его коэффициент теплопроводности при комнатной температуре  $\lambda \approx 200 \frac{\text{Вт}}{\text{м К}}$ , отношение объема образца к его площади поверхности  $V/S = 0,603 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ . Для числа Био получается значение  $Bi \approx 0,000422$ . Как уже выше отметили, при  $Bi \ll 0,1$  в каждый момент времени температура внутри такого тела успевает выровняться за счет интенсивного переноса тепла теплопроводностью.

Выяснено, что при естественном воздушном охлаждении основным механизмом теплоотдачи являются конвективно-излучательной. При этом сохраняется закономерность поведения характерного времени охлаждения (как и для параллелепипеда), т.е. растёт в ряду: излучательный <кондуктивный <конвективный. В пределах погрешности эксперимента значения характерных времен охлаждения для всех осей совпадают.

### **3.3. Применимость теории подобия при исследовании теплоотдачи металлов методом охлаждения**

Полученные в параграфах 3.1 и 3.2 экспериментальные результаты показывают, что кинетика охлаждения при естественном воздушном охлаждении металлических образцов во всех направлениях одинакова.

Критерии Био и Фурье являются критериями теплового подобия. Число Фурье ( $Fo$ ) характеризует взаимосвязь между скоростью изменения температурных условий в окружающей среде и скоростью, с которой изменяется температурное поле внутри образца. Оно зависит от определяющего размера образца и его коэффициента температуропроводности:

$$Fo = \frac{a \tau}{\ell^2},$$

где  $a$  - коэффициент температуропроводности,  $\tau$  – характерное время изменения внешних условий,  $\ell$  - определяющий размер тела.

Для выяснения степени однородности распределения температуры в образце было вычислено число Био. Результаты показывают, что для отобранных образцов,  $Bi \ll 0,1$ . В этом случае образец можно считать “термически тонким”, а распределение температуры внутри него можно считать равномерным. В любой момент времени температура внутри металлических материалов быстро выравнивается благодаря эффективной теплопередаче, обусловленной их высокой теплопроводностью. Таким образом, температура образца зависит только от времени, но не от координат. Поскольку градиент температуры внутри металлических материалов практически равен нулю, то вместо дифференциального уравнения теплопроводности Фурье можно использовать балансовое уравнение тепла.

В труде [146] профессор Кондратьев Г.М. впервые проанализировал процесс свободного охлаждения простых тел в воздушной среде, используя теорию подобия. Далее представлено его уравнение подобия для этой ситуации.

Уменьшение энергии, запасенной внутри твердого тела, должно быть равно тепловому потоку, отводимому с его поверхности конвекцией:

$$C\rho VdT = -\alpha S(T - T_c) d\tau, \quad (3.6)$$

где  $C, \rho, V, S, T$  – соответственно удельная теплоемкость, плотность, объем, площадь поверхности и температура образца,  $\alpha$  - коэффициент теплоотдачи,  $T_c$  – температура окружающей среды.

В этом случае изменение избыточной температуры тела описывается дифференциальным уравнением

$$C\rho V \frac{d(T-T_c)}{d\tau} = -\alpha S(T - T_c). \quad (3.7)$$

Отсюда

$$\frac{d(T-T_c)}{T-T_c} = -\frac{\alpha S}{C\rho V} d\tau. \quad (3.8)$$

Проинтегрировав уравнение (3.8), получаем

$$\int_{(T-T_0)_{\tau=0}}^{T-T_0} \frac{d(T-T_c)}{T-T_c} = - \int_0^{\tau} \frac{\alpha S}{C\rho V} d\tau.$$

Откуда получаем

$$\ln \frac{T-T_c}{(T-T_c)_{\tau=0}} = - \frac{\alpha S}{C\rho V} \tau, \quad (3.9)$$

$$T - T_c = (T - T_c)_{\tau=0} \exp\left(-\frac{\alpha S}{C\rho V} \tau\right). \quad (3.10)$$

Теперь, введём избыточную температуру  $T - T_c = \Delta T$  и уравнение подобия (3.10) принимает более простой вид

$$\Delta T = (\Delta T)_{\tau=0} e^{-\left(\frac{\alpha S}{C\rho V}\right)\tau}. \quad (3.11)$$

Кондратьев обозначил как регулярный режим охлаждения процесс, при котором температура уменьшается экспоненциально с течением времени. Для того чтобы упорядочить этот процесс, он создал график, на котором по оси абсцисс отложено время, а по оси ординат — логарифм изменения температуры. На этом графике получилась прямая линия. Те точки, которые не соответствовали этой прямой, были исключены из рассмотрения.

В выражении (3.11) величина

$$\frac{C\rho V}{\alpha S} = \tau_i \quad (3.12)$$

имеет размерность времени. При  $\tau = \tau_i$  разность температуры образца и окружающей среды уменьшается в 2,71 раза. Величина  $\tau_i$  зависит от материала образца и вида теплоотдачи, поэтому в процессах охлаждения его будем использовать как характерное время в процессе охлаждения.

В исследованиях проводимые в НИЛФКС НИИ ТНУ было показано, что кроме конвективной теплоотдачи нужно учитывать излучательную и кондуктивную теплоотдачу.

Образцы охлаждаются за счет теплопроводности воздуха, конвекции и излучения. Конвекция теплоты всегда происходит совместно с теплопроводностью. Совместную теплоотдачу теплопроводностью и конвекцией называют

конвективной, а одновременную теплоотдачу излучением, конвекцией и теплопроводностью называют радиационно-конвективным теплообменом.

Процессы излучательного и конвективного теплоотдачи независимы друг от друга. Излучение зависит от температуры и коэффициента излучения образца, в то время как конвекция и теплопроводность определяются физическими свойствами окружающей среды (воздуха).

Общее охлаждение образца равно сумме тепловых потерь, обусловленных конвекцией, теплопроводностью и излучением:

$$\Delta T = \Delta T_k + \Delta T_T + \Delta T_{\text{и}}. \quad (3.13)$$

Количества теплоты, уходящие за счет конвективного и кондуктивного теплоотдачи равны

$$Cm dT_k = -\alpha_k S (T - T_0) d\tau, \quad (3.14)$$

$$Cm dT_T = -\alpha_T S (T - T_0) d\tau, \quad (3.15)$$

а за счет теплового излучения

$$Cm dT_{\text{и}} = -\alpha_{\text{и}} S T d\tau. \quad (3.16)$$

Теперь введём обозначения  $\tau_k = \frac{\rho CV}{\alpha_k S}$ ,  $\tau_T = \frac{\rho CV}{\alpha_T S}$ ,  $\tau_{\text{и}} = \frac{\rho CV}{\alpha_{\text{и}} S}$ , после чего решения уравнений (3.14), (3.15) и (3.16) будут следующими:

$$\begin{aligned} \Delta T_k &= (\Delta T_k)_{\tau=0} \exp(-\tau/\tau_k), \quad \Delta T_T = (\Delta T_T)_{\tau=0} \exp(-\tau/\tau_T), \\ \Delta T_{\text{и}} &= (\Delta T_{\text{и}})_{\tau=0} e^{-\tau/\tau_{\text{и}}}, \end{aligned} \quad (3.17)$$

С учетом уравнений (3.13) и (3.17) уравнение подобия принимает вид:

$$\begin{aligned} \Delta T &= (\Delta T_{\text{и}})_{\tau=0} \exp(-\tau/\tau_{\text{и}}) + (\Delta T_T)_{\tau=0} \exp(-\tau/\tau_T) + \\ &+ (\Delta T_k)_{\tau=0} \exp(-\tau/\tau_k), \end{aligned} \quad (3.18)$$

где  $(\Delta T_T)_{\tau=0}$ ,  $(\Delta T_k)_{\tau=0}$  - разность температур нагретого тела и окружающей среды при  $\tau = 0$ ,  $(\Delta T_{\text{и}})_{\tau=0}$  - разность температур нагретого тела в момент начала измерений и температуры при котором излучения прекращается,  $\tau_{\text{и}}$ ,  $\tau_T$  и  $\tau_k$  - характерные времена охлаждения для процессов теплоотдачи лучеиспусканием, теплопроводностью и конвекцией.

Эксперименты показывают, что временная зависимость температуры металлов хорошо описывается уравнением

$$\Delta T(\tau) = ae^{-b\tau} + ce^{-d\tau} + ke^{-l\tau}, \quad (3.19)$$

где  $a, b, c, d, k, l$  – постоянные величины для данного образца.

Сравниваем уравнения (3.18) и (3.19)

$$\tau_{\text{и}} = \frac{1}{a}, \quad \tau_{\text{т}} = \frac{1}{d}, \quad \tau_{\text{к}} = \frac{1}{l}.$$

С помощью формулы (3.18) можно определить температуру образца в любой момент времени.

Значения характерного времени охлаждения определяется экспериментально. Введем отношения времени охлаждения к  $\tau_i$  как число

$$N = \frac{\tau}{\tau_i}. \quad (3.20)$$

На рис. 3.15 приведена зависимость  $\frac{\Delta T_i}{(\Delta T_i)_{\tau=0}}$  от  $N = \frac{\tau}{\tau_i}$  для излучательного, кондуктивного и конвективного теплоотдач образца алюминия марки А5N сложной формы

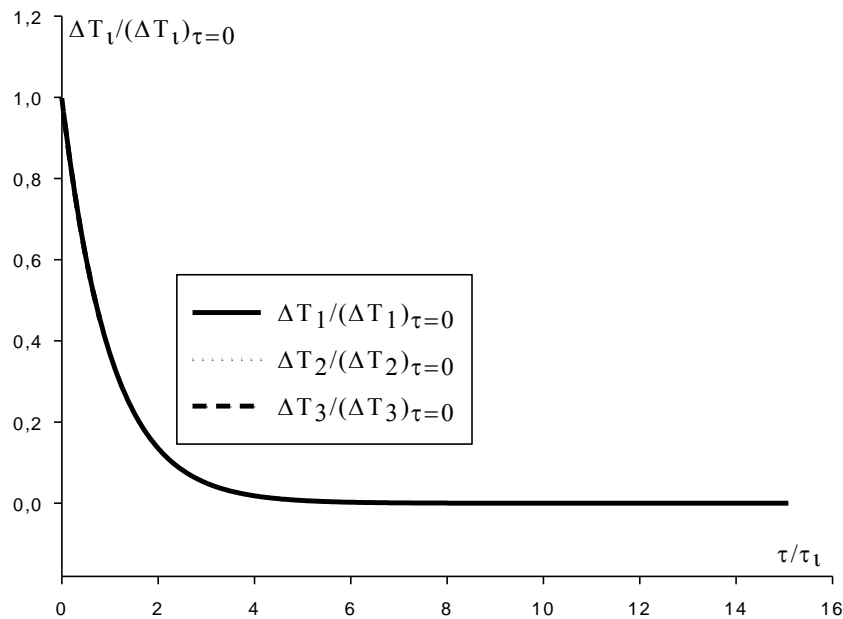


Рис. 3.15 Зависимость  $\frac{\Delta T_i}{(\Delta T_i)_{\tau=0}}$  от  $N = \frac{\tau}{\tau_i}$  для излучательного, кондуктивного

и конвективного теплоотдач алюминия марки А5N сложной формы.

Как показано на рис. 3.15, все данные по излучательному, кондуктивному и конвективному теплоотдаче образца лежат вдоль одной и той же кривой.

На рис. 3.16 приведена эта же зависимость в полулогарифмических координатах ( $\ln \frac{\Delta T_i}{(\Delta T_i)_{\tau=0}} = f(N)$ ).

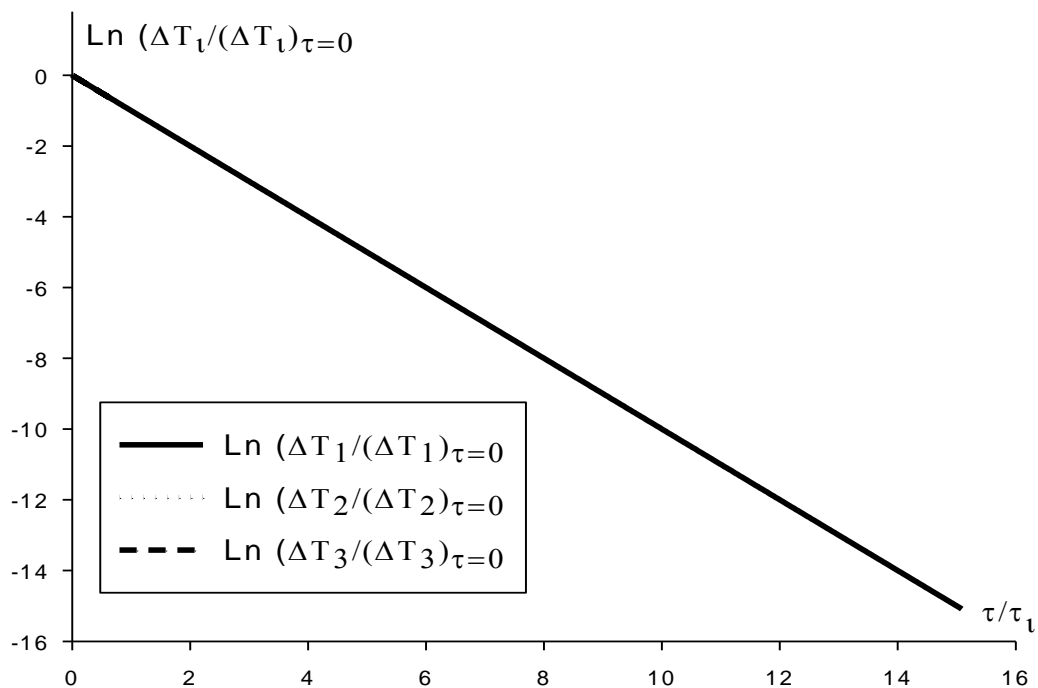


Рис. 3.16. Зависимость  $\ln \frac{\Delta T_i}{(\Delta T_i)_{\tau=0}}$  от  $N = \frac{\tau}{\tau_i}$  для излучательного, кондуктивного и конвективного теплоотдач алюминия А5N сложной формы.

Как видно из рисунка, экспериментальные данные по охлаждению излучением, теплопроводностью и конвекцией лежат на одной прямой.

Зависимости на рис. 3.15 и 3.16 являются универсальными. Если из эксперимента определены характерное время охлаждения и начальная температура тела, то можно определить его температуру в любой момент времени или время достижения данной температуры.

Таким образом, при малых значениях числа  $Bi$ , в случае свободного воздушного охлаждения уравнение подобия описывается выражением (3.18) и оно полностью описывает экспериментальные результаты по охлаждению термически тонких тел.

В задачах теплоотдачи характеристическая длина определяется как тепловая характеристическая длина, которая представляет собой отношение объема тела к площади его охлаждаемой поверхности [146]:

$$\frac{V}{S} = l.$$

Оценим значения  $l$  для цилиндра, шара и параллелепипеда.

Для цилиндра постоянная высота цилиндра  $h = \text{const}$

$$l = \frac{r}{2\left(1+\frac{r}{h}\right)} = \frac{d}{4\left(1+\frac{d}{2h}\right)}.$$

Характерный линейный размер отличается для тел различной формы. Поэтому исследование теплофизических свойств металлических тел разного размера и формы является актуальной задачей для физики конденсированного состояния и теплотехники.

### 3.4. Коэффициенты теплоотдачи алюминия сложной формы

Согласно [54,55], зависимость удельной теплоемкости алюминия марки А5N от температуры выражается формулой

$$C(T - 300) = 903,1 + 0,47 (T - 300) - 4 \cdot 10^{-4} (T - 300)^2 + 0,86 \cdot 10^{-6} (T - 300)^3.$$

Плотность алюминия марки А5N равна  $2698,2 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ . Для массы образца в 0,16 кг его объем равен  $59,43 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ , а площадь поверхности равна  $98,6 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ . Коэффициенты конвективной и кондуктивной теплоотдачи вычисляли из уравнений (3.14-3.16) по формулам

$$\alpha_k = \frac{Cm\left(-\frac{dT}{d\tau}\right)_k}{S(T-T_0)}, \quad \alpha_T = \frac{Cm\left(-\frac{dT}{d\tau}\right)_T}{S(T-T_0)}, \quad (3.21)$$

а коэффициент излучательной теплоотдачи по формуле

$$\alpha_{\text{и}} = \frac{Cm\left(-\frac{dT}{d\tau}\right)_{\text{и}}}{S T}, \quad (3.22)$$

где  $\left(\frac{dT}{d\tau}\right)_и$ ,  $\left(\frac{dT}{d\tau}\right)_т$  и  $\left(\frac{dT}{d\tau}\right)_к$  – соответствующие скорости охлаждения за счет излучения, теплопроводности и конвекции.

На рис. 3.17 приведены температурные зависимости коэффициентов излучательной  $\alpha_1$ , кондуктивной  $\alpha_2$  и конвективной  $\alpha_3$  теплоотдачи.

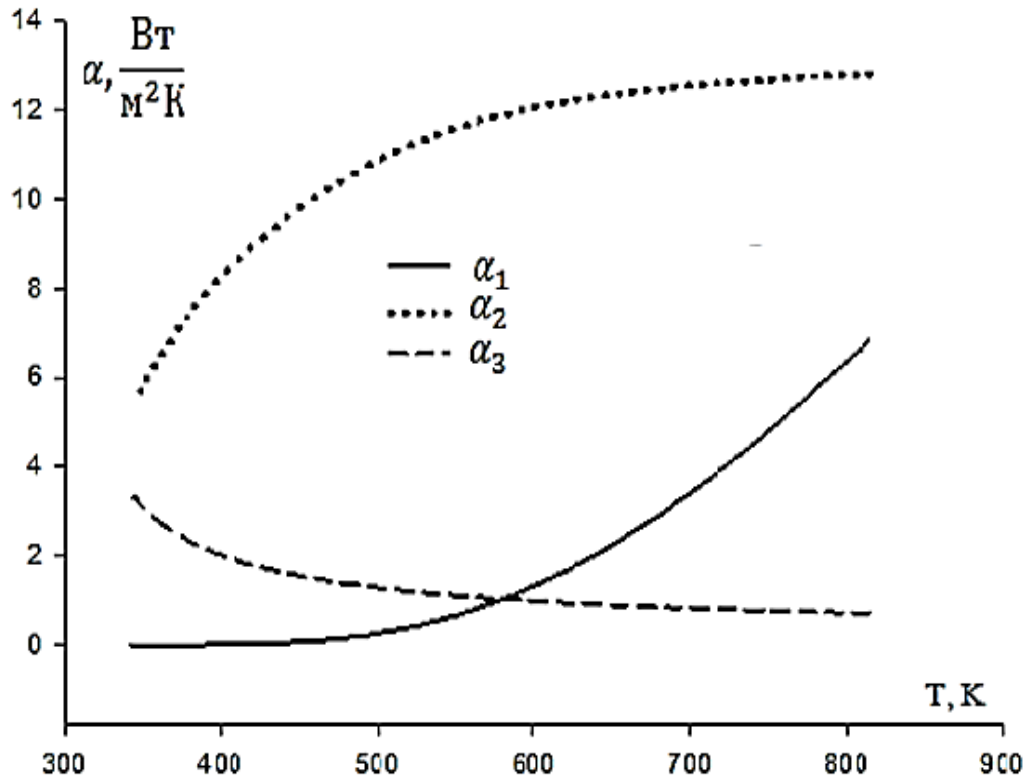


Рис. 3.17. Температурная зависимость коэффициентов излучательной  $\alpha_1$ , кондуктивной  $\alpha_2$  и конвективной  $\alpha_3$  теплоотдачи.

Как видно из рисунка, с повышением температуры коэффициенты излучательной и кондуктивной теплоотдачи увеличиваются, а коэффициент конвективной теплоотдачи уменьшается.

Доля излучательной  $\chi_и$ , конвективной  $\chi_к$  и кондуктивной  $\chi_т$  теплоотдачи в общей теплоотдаче вычисляли по формулам

$$\chi_и = \frac{\alpha_и}{\alpha_и + \alpha_к + \alpha_т}, \quad \chi_к = \frac{\alpha_к}{\alpha_и + \alpha_к + \alpha_т} \quad \text{и} \quad \chi_т = \frac{\alpha_т}{\alpha_и + \alpha_к + \alpha_т}.$$

На рис. 3.18 приведены температурные зависимости долей излучения, теплопроводности и конвекции в охлаждении образца.



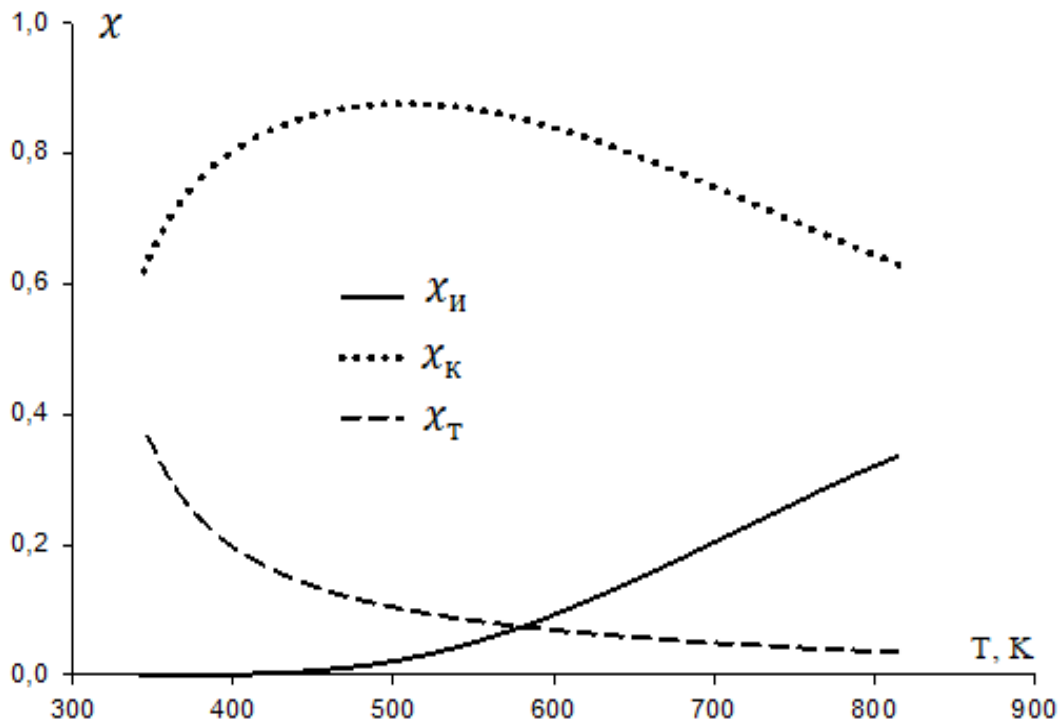


Рис. 3.18. Температурные зависимости долей излучения, теплопроводности и конвекции в общее охлаждение образца.

Как видно из графика, доля конвективной теплоотдачи в общей охлаждении в зависимости от температуры проходит через максимум. Вклад излучательной теплоотдачи с температурой растет и при высоких температурах становится определяющим. Вклад кондуктивной теплоотдачи с повышением температуры уменьшается.

Коэффициента излучательной теплоотдачи вычисляют с помощью следующей формулы

$$\alpha_{и} = \varepsilon 0,0567 \left( \frac{T}{100} \right)^3. \quad (3.23)$$

Из данных по температурным зависимостям коэффициента излучательной теплоотдачи с помощью формулы (3.23) нами оценена степень черноты образца  $\varepsilon$ . На рис. 3.19 приведена зависимость степени черноты образца от температуры. Как видно из рисунка, ниже температуры 370 К чернота образца практически нулевая, после чего наблюдается его рост.

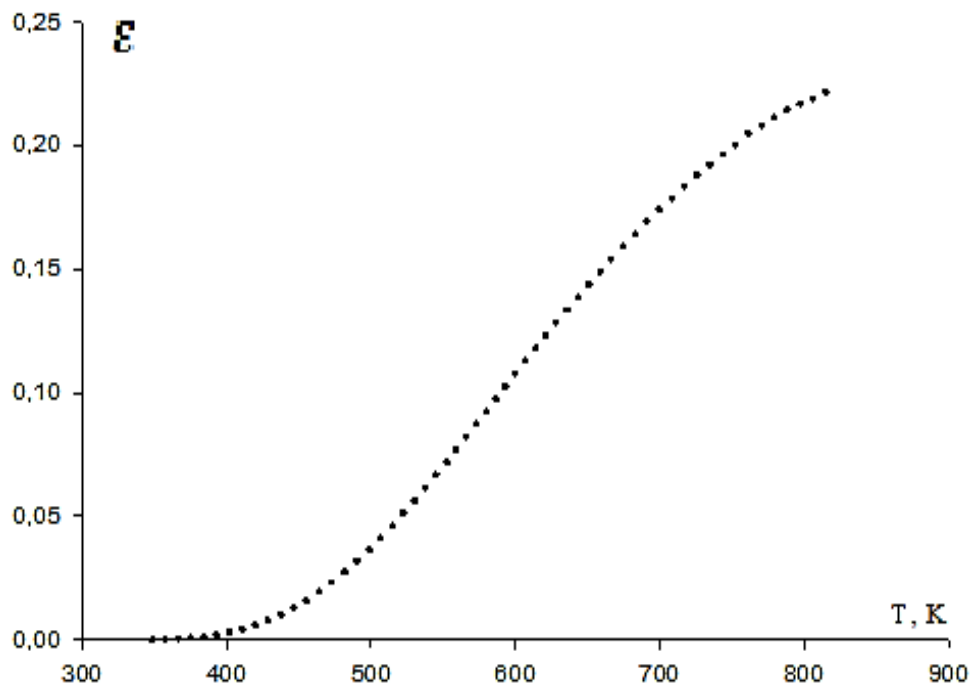


Рис. 3.19. Температурная зависимость степени черноты образца.

Полученные нами численные значения хорошо согласуются с литературными для сильно оксидированной поверхности алюминия [98-103]. В имеющихся в литературе данных степень черноты алюминия приводится только для определенной температуры.

Результаты, приведенные в параграфах 3.2 и 3.4 опубликованы в работе [147].

## **ГЛАВА IV. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗМЕРОВ НА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ**

### **4.1. Влияние высоты цилиндрических образцов меди марки МЗ на кинетику их охлаждения и процесс теплоотдачи**

В данной параграфе приведены результаты исследования влияния величины высоты цилиндрических образцов из меди марки МЗ диаметром 1.0 см на кинетику их охлаждения, а также процессы теплоотдачи.

Среди материалов, используемых промышленностью, медь и её сплавы занимают особое место благодаря удачному сочетанию высоких технологических и эксплуатационных характеристик [148-149].

В работах [63-68] приведены результаты исследования влияния величины диаметра цилиндрических образцов из алюминия разных марок на кинетику их охлаждения и коэффициенты теплоотдачи. Было показано, что с ростом диаметра образца характерные времена охлаждения, конвективного и лучистого теплообмена увеличиваются нелинейно, а соответствующие коэффициенты теплоотдачи уменьшаются. В этих работах влияние длины или высоты на теплофизические свойства металлических цилиндрических образцов не исследовалось.

Поскольку исследуемый материал и состояние поверхности образцов одинаковы, то полагаем, что коэффициент теплоотдачи остается постоянным. В этом случае рассматриваемая система является хорошей моделью для изучения влияния размера образцов на характерные времена охлаждения.

Объектами исследования являлись цилиндрические образцы из меди марки МЗ диаметром 1,0 см, высотами 5,3 см и 9,0 см с высверленными с одного конца каналами для термопары. Для проверки однородности теплового поля сначала вычислим число Био для нашего образца. Для температуры 600

К общий коэффициент теплоотдачи меди  $\alpha \approx 60 \text{ Вт/(м К)}$ , коэффициент теплопроводности  $\lambda \approx 400 \frac{\text{Вт}}{\text{м К}}$  и отношение объема образца к его площади поверхности  $V/S = 0,225 \text{ см}$ . Получаем  $Bi \approx 0,035$ . Для выбранных объектов исследования число Био мало ( $Bi \ll 0,1$ ). При этом условии образец является «термически тонким», а распределение температуры внутри тела принимается равномерным и можно использовать уравнения подобия (3.18).

Для цилиндра постоянного диаметра характерное время охлаждения будет иметь вид

$$\tau_i = \frac{c \rho}{\alpha_i} \frac{h}{2 \left(1 + \frac{2h}{d}\right)},$$

где  $h$  и  $d$  - соответственно его высота и диаметр.

Для алюминиевых образцов верхний предел температуры, как и прежде, составлял  $620^\circ\text{C}$ . В них наблюдается кондуктивно-конвективная и излучательная теплоотдачи. Расширение области температурных исследований позволило нам впервые наблюдать по отдельности все составляющие теплоотдачи.

Дифференцируя (3.18), получим формулу для вычисления скорости охлаждения вида

$$\frac{dT}{d\tau} = - \frac{(\Delta T_1)_{\tau=0}}{\tau_1} e^{-\tau/\tau_1} - \frac{(\Delta T_2)_{\tau=0}}{\tau_2} e^{-\tau/\tau_2} - \frac{(\Delta T_3)_{\tau=0}}{\tau_3} e^{-\tau/\tau_3}, \quad (4.1)$$

где  $(\Delta T_1)_{\tau=0}/\tau_1$ ,  $(\Delta T_2)_{\tau=0}/\tau_2$  и  $(\Delta T_3)_{\tau=0}/\tau_3$  - значения скорости охлаждения в момент начала измерений.

На рис. 4.1 и 4.2 приведены зависимости разности температур образца и окружающей среды  $\Delta T$ , охлаждения за счет излучательного  $\Delta T_1$ , кондуктивного  $\Delta T_2$  и конвективного  $\Delta T_3$  теплоотдачи для цилиндрических образцов из меди диаметром 1,0 см и высотами 5,3 см и 9,0 см. Как и следовало ожидать, из рис. 4.1 и 4.2 видно, что охлаждение за счет излучения протекает быстрее, чем по механизмам теплопроводности и конвекции. На рис. 4.3-4.4 приведены зависимости скоростей охлаждения от времени для этих же образцов.

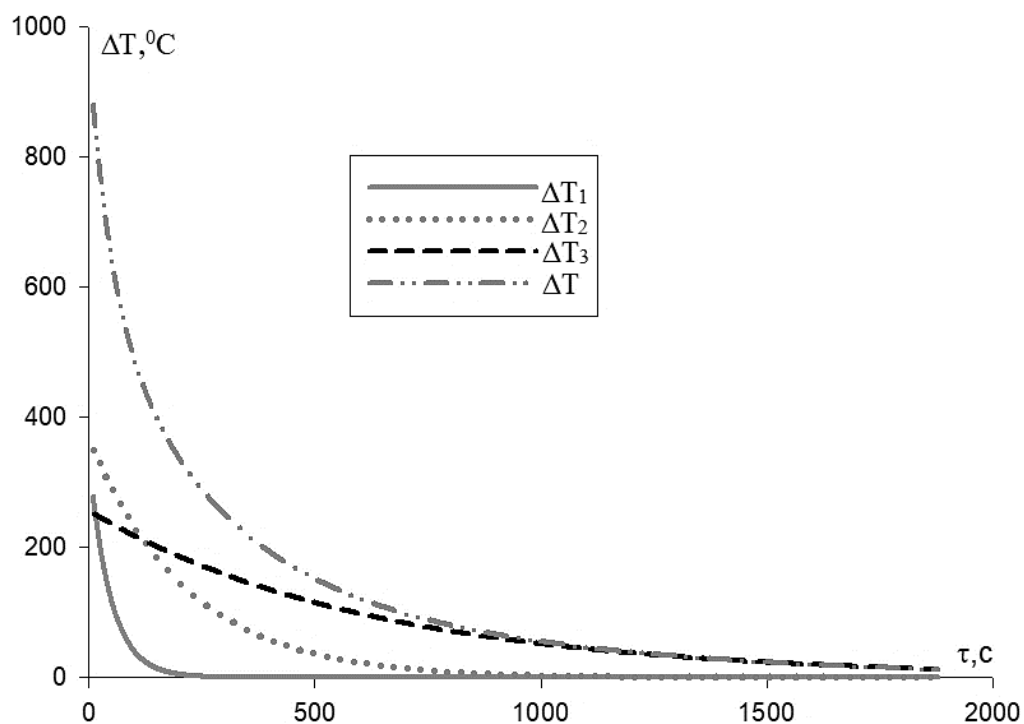


Рис. 4.1. Зависимости общего охлаждения ( $\Delta T$ ), охлаждения за счет излучательного ( $\Delta T_1$ ), кондуктивного ( $\Delta T_2$ ) и конвективного ( $\Delta T_3$ ) теплоотдачи от времени для цилиндрической меди высотой 9,0 см.

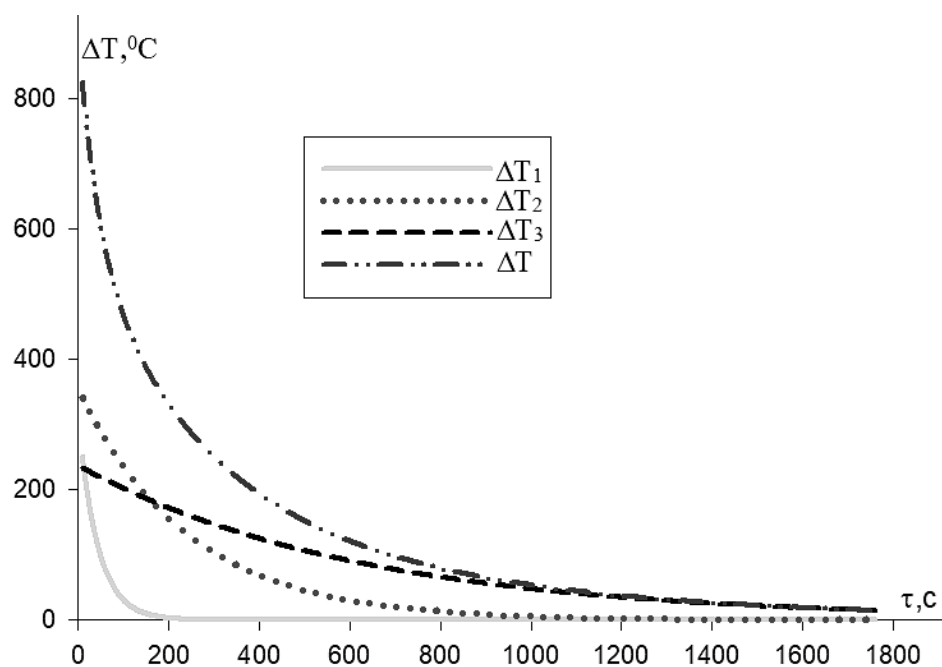


Рис. 4.2. Зависимости общего охлаждения ( $\Delta T$ ), охлаждения за счет излучательного ( $\Delta T_1$ ), кондуктивного ( $\Delta T_2$ ) и конвективного ( $\Delta T_3$ ) теплоотдачи от времени для цилиндрической меди высотой 5,3 см.

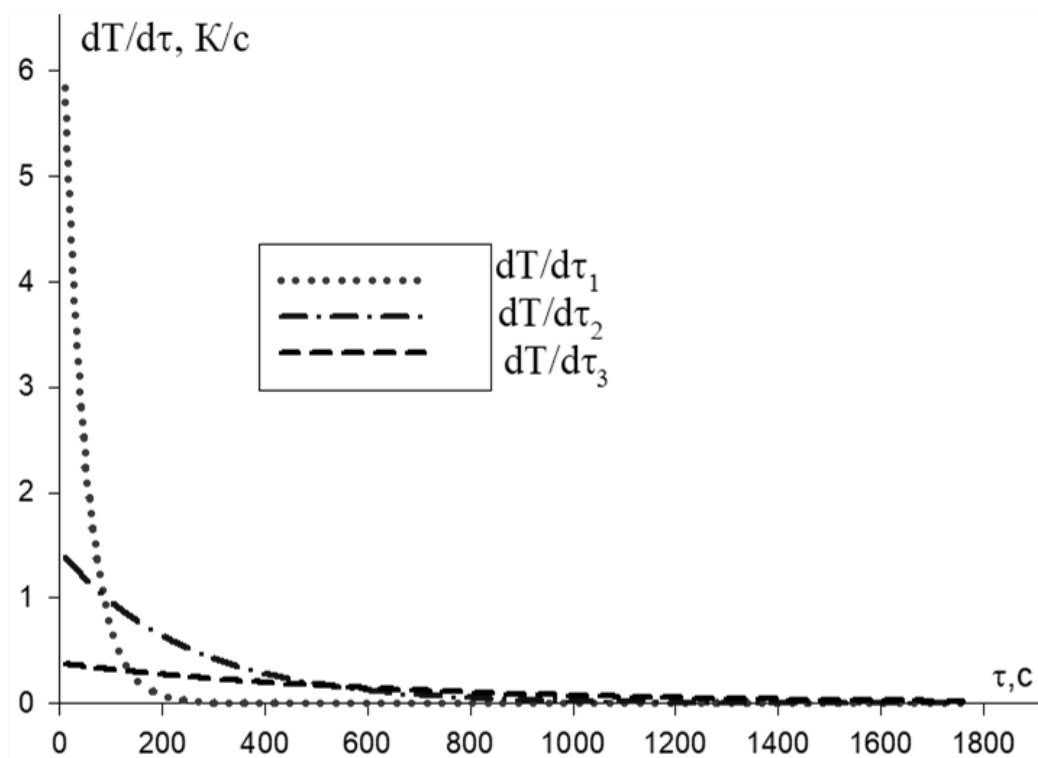


Рис. 4.3. Временные зависимости скоростей охлаждения цилиндрической меди высотой 5,3 см за счет излучательной ( $\cdots$ ), кондуктивной ( $-\cdots-$ ) и конвективной ( $----$ ) теплоотдачи.

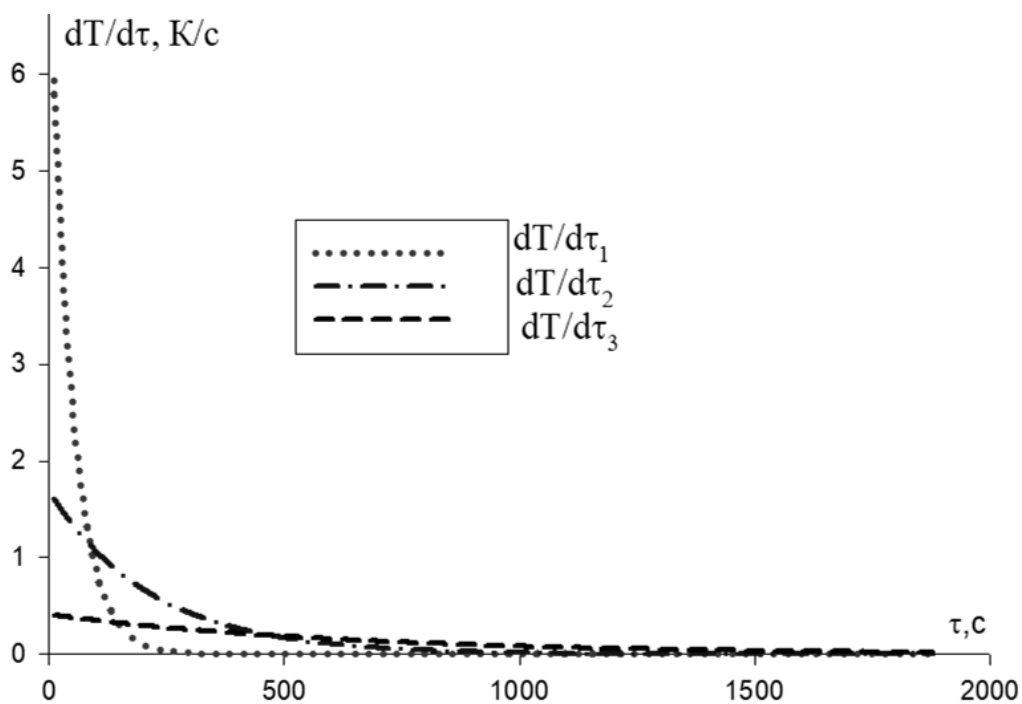


Рис. 4.4. Временные зависимости скоростей («ускорения») охлаждения цилиндрической меди высотой 9,0 см за счет излучательной ( $\cdots$ ), кондуктивной ( $-\cdots-$ ) и конвективной ( $----$ ) теплоотдачи.

В табл. 4.1 приведены значения постоянных уравнения (3.18) для образцов меди диаметром 1,0 см и высотами 5,3 см и 9,0 см.

Таблица 4.1

Постоянные уравнения (3.18) для образцов меди  
диаметром 1,0 см и высотами 5,3 см и 9,0 см.

$h, \text{ см}$	$(\Delta T_1)_{\tau=0}, \text{ K}$	$\tau_1, \text{ с}$	$(\Delta T_2)_{\tau=0}, \text{ K}$	$\tau_2, \text{ с}$	$(\Delta T_3)_{\tau=0}, \text{ K}$	$\tau_3, \text{ с}$	$V/S, \text{ см}$
5,3	317	28	355	189	237	367	0,21
9,0	345	30	367	202	256	394	0,225

Обработка кривых зависимостей характерных времён охлаждения от отношения объема цилиндра к его площади поверхности  $V/S$  для образцов из меди разной высоты с помощью программы Sigma Plot 10 показывает, что в пределах погрешности определения они выражаются уравнением

$$\tau_i = a \frac{V}{S}, \quad (4.2)$$

где  $a = 133 \text{ с/см}$  для  $\tau_1$ ,  $900 \text{ с/см}$  для  $\tau_2$  и  $1750 \text{ с/см}$  для  $\tau_3$ .

Согласно работам [54,55], зависимость удельной теплоемкости меди от температуры выражается формулой

$$C(T - 300) = 388,47 + 17,94 \cdot 10^{-2}x - 2 \cdot 10^{-4}x^2 + 0,22 \cdot 10^{-6}x^3, \quad (4.3)$$

где  $x = (T - 300)/100$ .

Используя вычисленные по формуле (4.3) значения температурной зависимости теплоемкости меди и экспериментально полученные нами зависимости скоростей охлаждения от времени, для каждого процесса нами вычислены соответствующие коэффициенты теплоотдачи по формуле

$$\alpha(T) = \frac{\rho r h C(T) \left(-\frac{dT}{d\tau}\right)}{2(r+h)(T-T_0)}, \quad (4.4)$$

где  $r$  и  $h$  – радиус и высота образца.

На рис. 4.5 и 4.6 приведены температурные зависимости коэффициентов излучательной  $\alpha_1$ , кондуктивной  $\alpha_2$  и конвективной  $\alpha_3$  теплоотдачи.

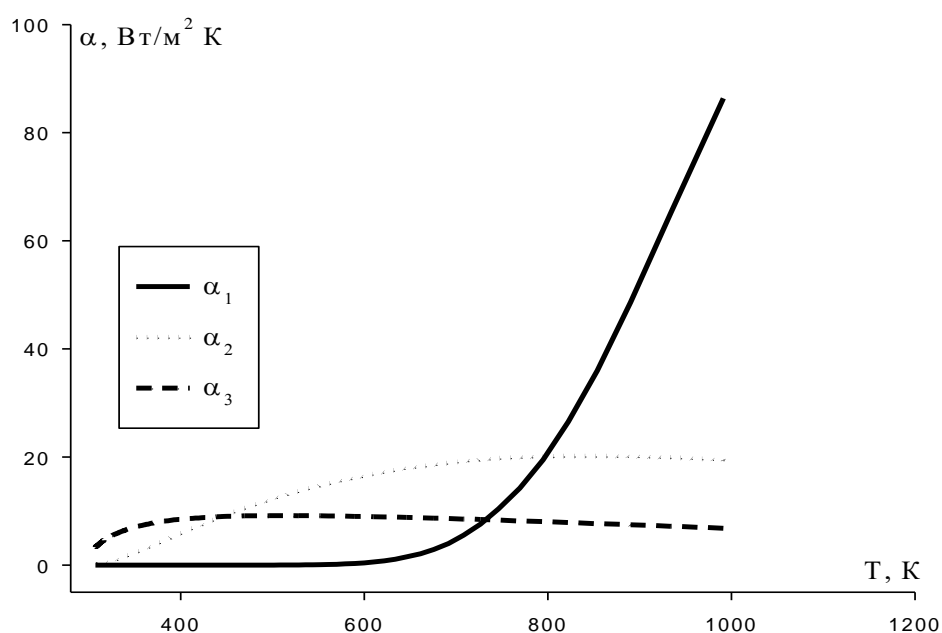


Рис. 4.5. Температурные зависимости коэффициентов излучательной  $\alpha_1$ , кондуктивной  $\alpha_2$  и конвективной  $\alpha_3$  теплоотдачи для цилиндрической меди МЗ диаметром 1,0 см и высотой 5,3 см.

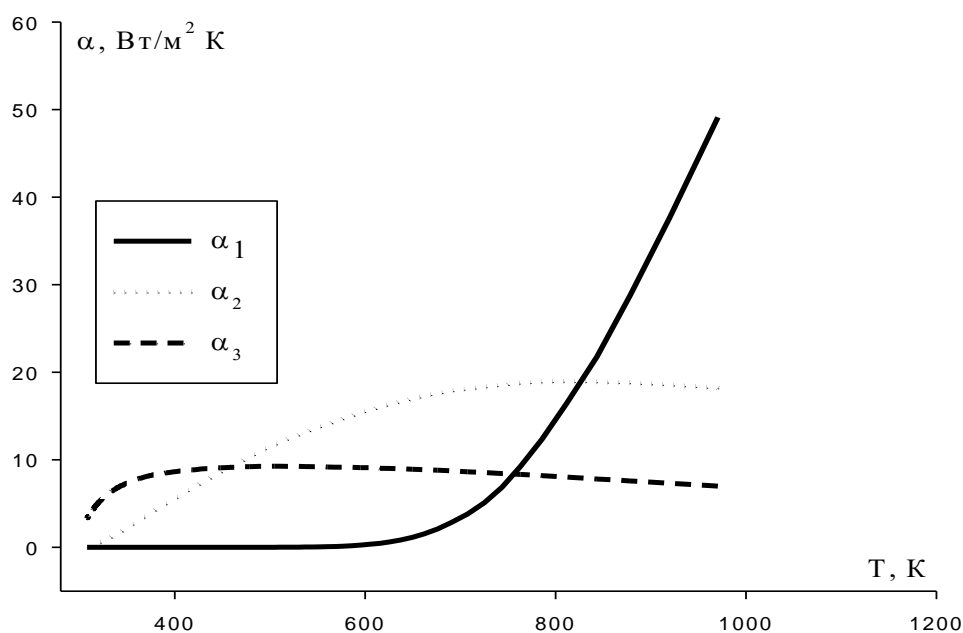


Рис. 4.6. Температурные зависимости коэффициентов излучательной  $\alpha_1$ , кондуктивной  $\alpha_2$  и конвективной  $\alpha_3$  теплоотдачи для меди МЗ высотой 9,0 см.



На рис. 4.7-4.10 приведены сравнение температурные зависимости коэффициентов общей, излучательной  $\alpha_1$ , кондуктивной  $\alpha_2$  и конвективной  $\alpha_3$  теплоотдачи для двух значений высоты медного цилиндра.

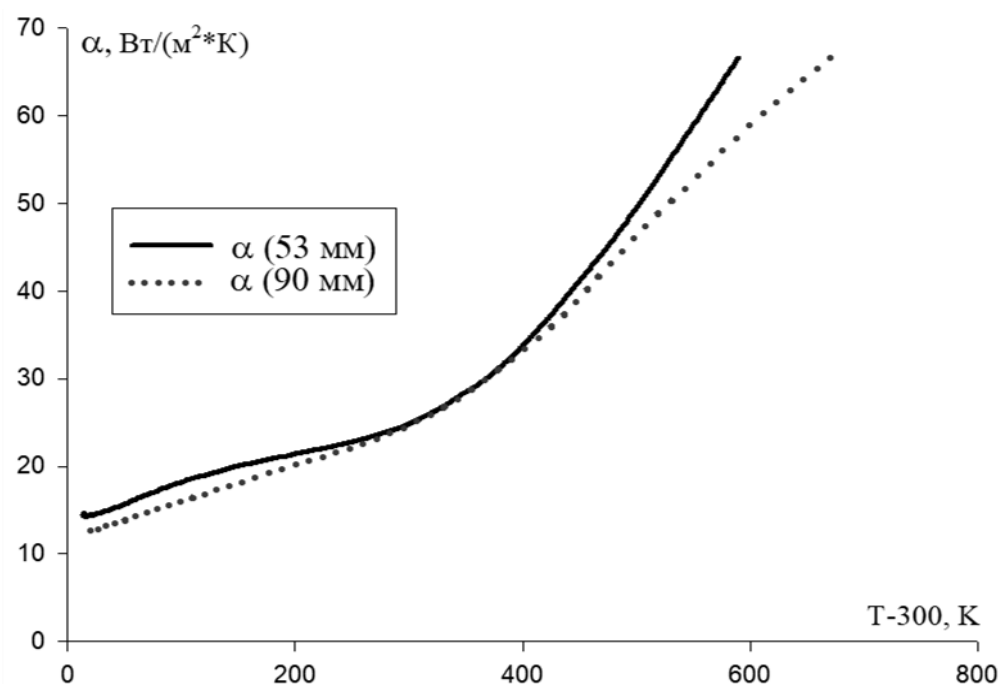


Рис. 4.7. Сравнение температурных зависимостей коэффициентов общей теплоотдачи для образцов из меди марки МЗ высотой 5,3 см и 9,0 см.

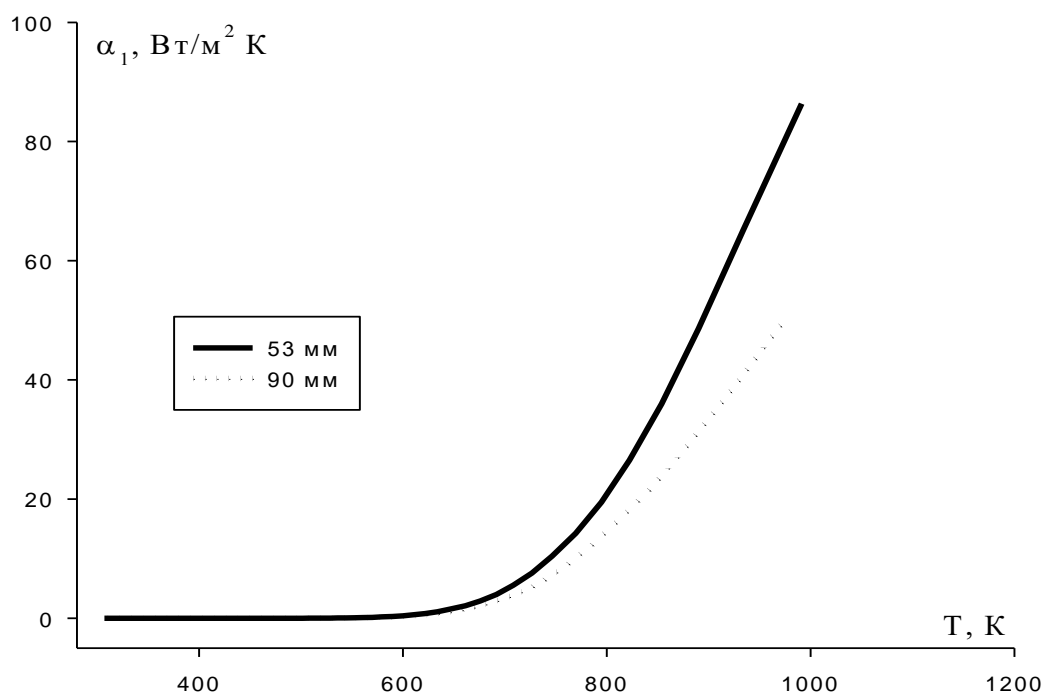


Рис. 4.8. Сравнение температурных зависимостей коэффициентов излучательной теплоотдачи для образцов из меди высотой 5,3 см и 9 см.

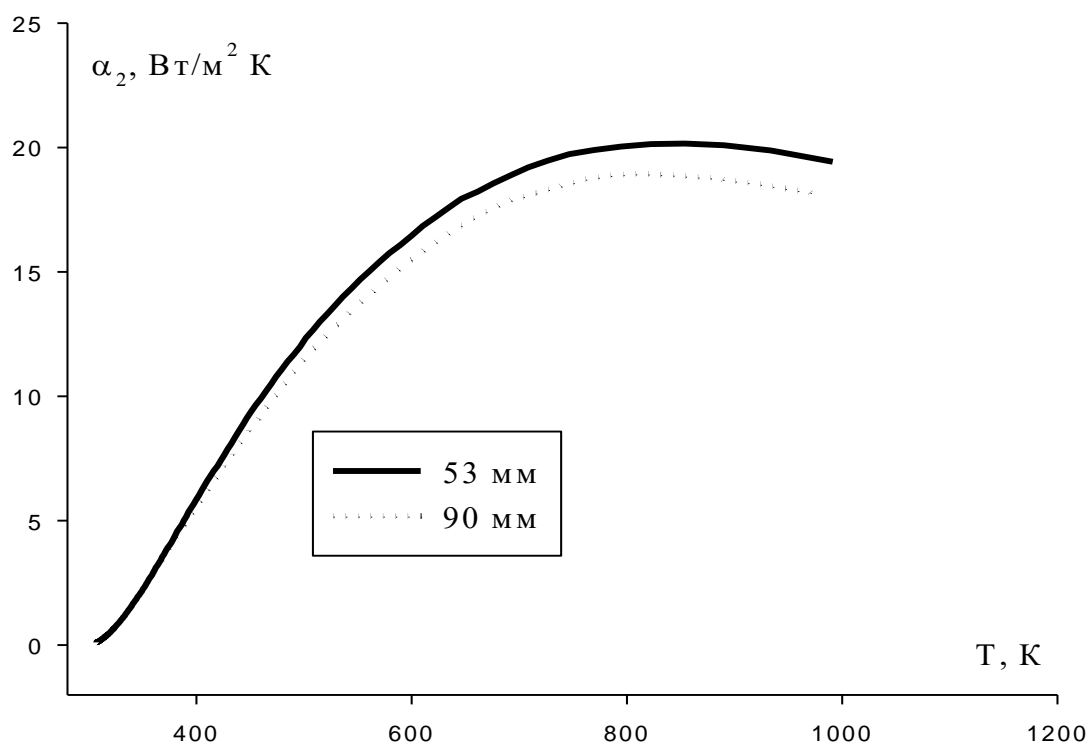


Рис. 4.9. Сравнение температурных зависимостей коэффициентов кондуктивной теплоотдачи для образцов из меди высотой 5,3 см и 9 см.

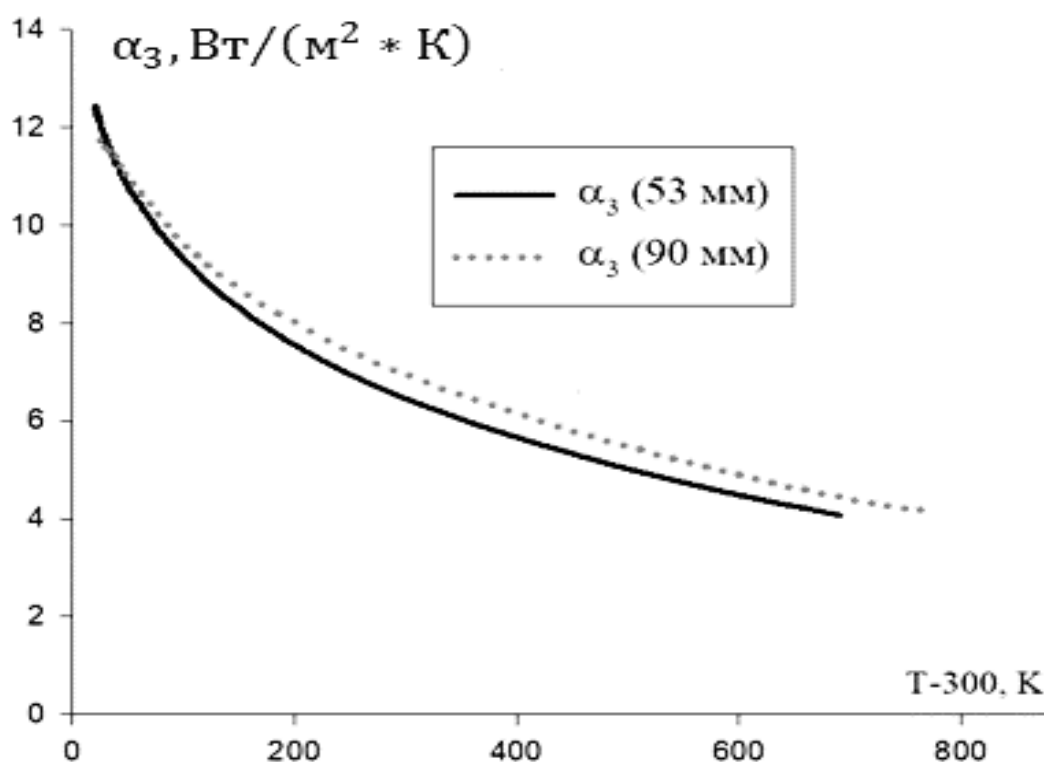


Рис. 4.10. Сравнение температурных зависимостей коэффициентов конвективной теплоотдачи для образцов из меди высотой 5,3 см и 9 см.

Как видно, коэффициенты теплоотдачи в пределах погрешности эксперимента не зависят от длины цилиндра, а зависят от материала и состояния поверхности образца [150-154].

Результаты данного параграфа опубликовано в работах [150-154].

#### **4.2. Влияние высоты цилиндрических образцов из латуни Л63 на кинетику их охлаждения и коэффициентов теплоотдачи**

В данном параграфе приведены результаты экспериментального исследования влияния величины высоты цилиндрических образцов из латуни марки Л63 на кинетику их охлаждения и коэффициентов теплоотдачи.

Другим представителем медных сплавов, занимающих особое место благодаря удачному сочетанию высоких технологических и эксплуатационных характеристик [148, 149, 155-157], являются латуни- сплавы меди и цинка, обладающие уникальным сочетанием высокой пластичности с высокой твердостью, коррозионной стойкостью, износостойкостью, высоким уровнем механических, теплофизических и электрических свойств, технологичностью и низкой стоимостью [158-161]. Латуни используются в автомобилестроении, судостроении, электротехнической промышленности.

Деформируемые латуни маркируют буквой Л и цифрой, соответствующей массовому содержанию меди в сплаве в процентах. Цинк растворяется в меди, образуя  $\alpha$ -твердый раствор с предельной концентрацией 39%.

Марки латуни определяли из значения плотности исследуемых образцов

$$m = m_1 + m_2,$$

где  $m$ -масса образца,  $m_1, m_2$ - масса меди и цинка в ее составе, соответственно.

$$\rho V = \rho_1 V_1 + \rho_2 V_2, V = V_1 + V_2.$$

$$\rho - \rho_2 = (\rho_1 - \rho_2) \frac{V_1}{V}.$$

Плотность латуни Л63  $\rho = 8268,41 \text{ кг/м}^3$  , плотность меди  $\rho_1 = 8950 \text{ кг/м}^3$  и плотность цинка  $\rho_2 = 7140 \text{ кг/м}^3$  .

$$\frac{V_1}{V} = \frac{\rho - \rho_2}{\rho_1 - \rho_2} = 0,6234 = 62,34 \% \text{ Cu и } 37,66 \% - \text{Zn}.$$

Латунь Л63- это двухкомпонентный по химическому составу сплав, состоящий из 62-65% меди, 34,22 - 37,5 % цинка и примесей до 0,5 % в качестве которых присутствуют железо (до 0,2%), фосфор(до 0,01%), олово (до 0,005%), свинец (до 0,07 %). висмут (до 0,002%).

Латунь Л63 называют торговой, поскольку среди всех латуней она занимает первое место по объему производства. Предельная растворимость цинка в меди составляет примерно 35 % — это граница существования  $\alpha$ -фазы. Латунь Л63 имеет небольшое количество  $\beta$ -фазы и формально должна считаться двойной ( $\alpha+\beta$ ) латунью. Но малое количество  $\beta$  - фазы практически не влияет на большинство физических и механических свойств, поэтому её чаще рассматривают как однофазный сплав [159-161].

Некоторые физические свойства латуни Л63 [162]: температуры ликвидуса- 910°C, солидуса - 900°C; плотность  $\rho=8430 \text{ кг/м}^3$ ; теплопроводность  $\lambda=110 \text{ Вт/(м К)}$ ; удельная теплоемкость  $C=385 \text{ Дж/(кг К)}$ ; коэффициент линейного расширения  $\alpha=20,5 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ ; удельное электросопротивление при температуре 293К- 0,07 мкОм м; модуль Юнга при сжатии- 50 ГПа и модуль Юнга-  $115 \pm 20 \text{ ГПа}$ .

Близость позиций меди и цинка в периодической таблице - цинк находится под номером 30, а медь- под номером 29, свидетельствует о том, что они имеют близкие атомные радиусы. Этот факт позволяет, несмотря на различные кристаллические решетки, образовывать однофазные твердые растворы, когда содержание меди в сплаве превышает 13,5 %. Если медь является основным компонентом, то при равновесных условиях существует всего одна фаза - твердый раствор цинка в ГЦК меди [160].

Объектами исследования являлись цилиндрические образцы латуни марки Л63 диаметром 1,5 см и высотами 1,3 см, 2,5 см, 4,1 см, 8,7 см и 13,3 см с высверленными с одного конца каналами для термопары.

Методом охлаждения были исследованы закономерности кинетики охлаждения нагретых образцов латуни Л63 в широком диапазоне температур. Экспериментально полученные временные зависимости температуры образцов с достаточно хорошей точностью описываются тем же уравнением (3.18).

Формула (3.18) показывает, что теплота передается в окружающую среду в условиях свободной конвекции одновременно тремя способами.

В качестве примера на рис. 4.11-4.14 приведены кинетические кривые охлаждения цилиндрических образцов латуни марки Л63 диаметром 1,5 см и высотами 13,3 см, 41 см, 87 мм и 13 мм, соответственно. Тут же ниже к каждому рисунку приданы результаты Sigma Plot-обработки графиков.

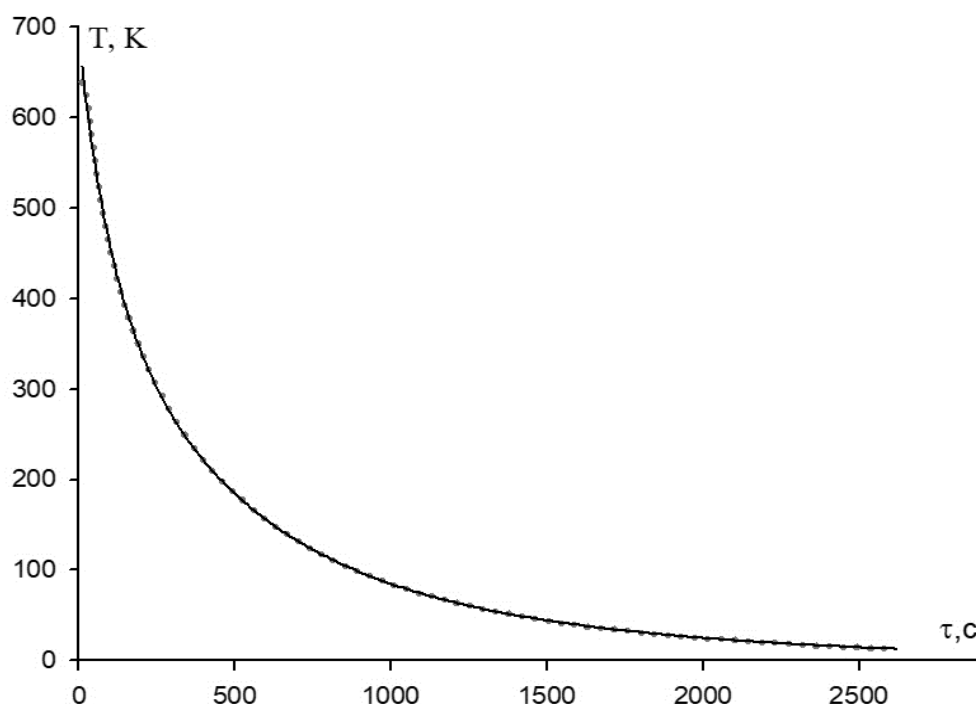


Рисунок 4.11. Зависимость температуры образца из латуни цилиндрической формы диаметром  $d=15$  мм и высотой 133 мм от времени охлаждения.

<b>R</b>	<b>Rsqr</b>	<b>Adj Rsqr</b>	<b>Standard Error of Estimate</b>
0,9999	0,9998	0,9998	1,7292

	Coefficient	Std. Error	t	P	VIF
a	227,1412	8,9813	25,2906	<0,0001	116,2578<

b	0,0104	0,0004	28,6536	<0,0001	50,3555<
c	294,9203	12,6325	23,3461	<0,0001	1019,7703<
d	0,0026	0,0002	15,9230	<0,0001	1124,3685<
k	165,5005	20,0226	8,2657	<0,0001	6716,9747<
l	0,0010	$4,7650 \cdot 10^{-5}$	20,6189	<0,0001	486,8643<

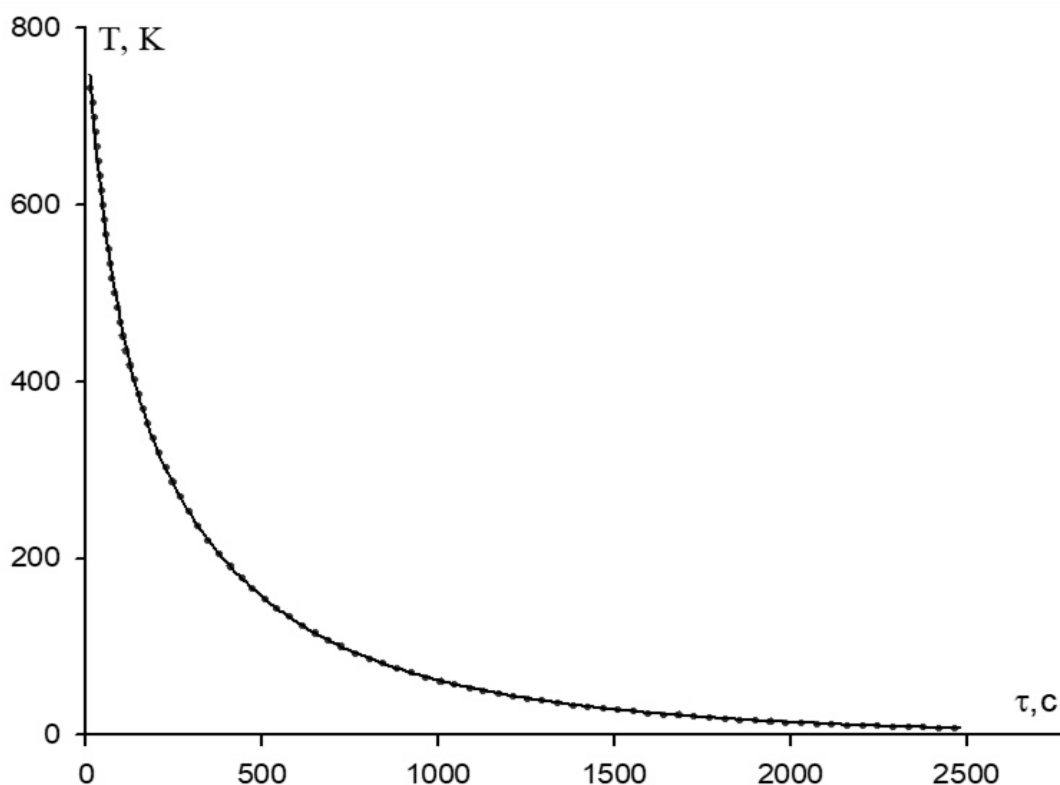


Рисунок 4.12. Зависимость температуры образца из латуни цилиндрической формы диаметром  $d=15$  мм и высотой  $h=41$  мм от времени охлаждения.

<b>R</b>	<b>Rsqr</b>	<b>Adj Rsqr</b>	<b>Standard Error of Estimate</b>
0,9999	0,9999	0,9999	1,6237

	<b>Coefficient</b>	<b>Std. Error</b>	<b>t</b>	<b>P</b>	<b>VIF</b>
a	278,5281	7,9537	35,0188	<0,0001	71,0780<
b	0,0145	0,0004	35,3042	<0,0001	40,5819<
c	329,1840	7,4905	43,9469	<0,0001	291,6053<

d	0,0035	0,0002	23,4019	<0,0001	532,7250<
k	191,7274	12,8366	14,9360	<0,0001	2371,8378<
l	0,0013	$3,4637 \cdot 10^{-5}$	37,4871	<0,0001	182,5210<

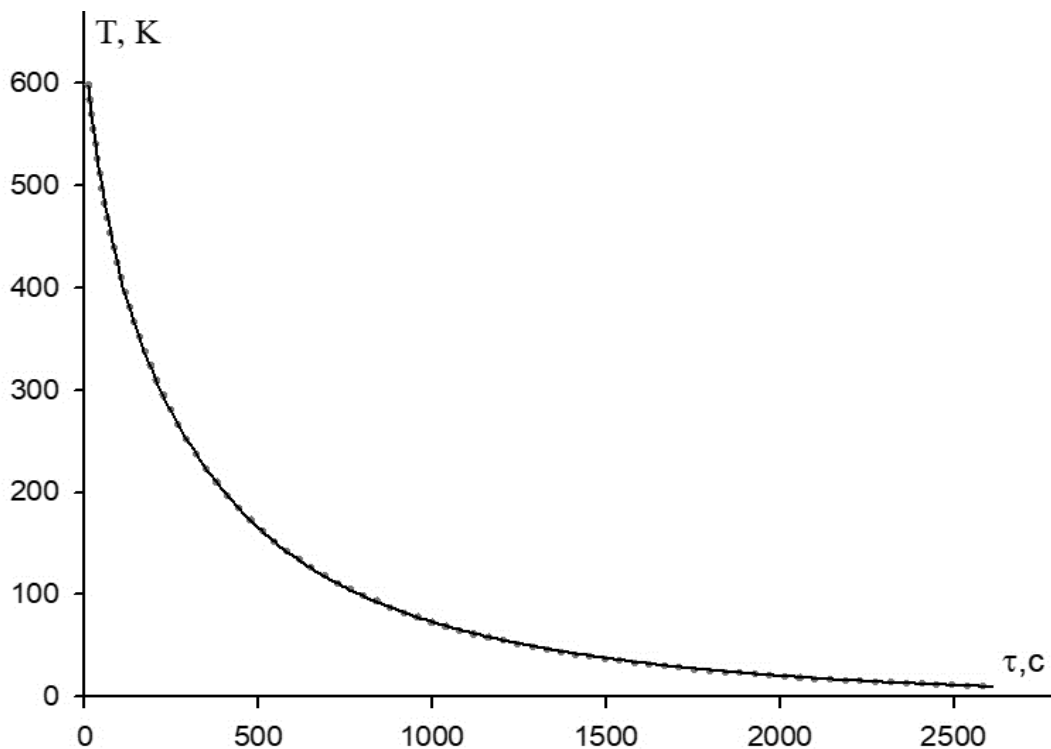


Рисунок 4.13. Зависимость температуры образца из латуни цилиндрической формы диаметром  $d=15$  мм и высотой  $h=87$  мм от времени охлаждения

**R**      **Rsqr**      **Adj Rsqr**      **Standard Error of Estimate**  
1,0000    1,0000      1,0000      0,4761

	<b>Coefficient</b>	<b>Std. Error</b>	<b>t</b>	<b>P</b>	<b>VIF</b>
a	120,4597	1,6985	70,9198	<0,0001	31,9981<
b	0,0167	0,0003	58,4315	<0,0001	27,9936<
c	296,5780	1,3679	216,8193	<0,0001	108,8706<
d	0,0037	$3,6254 \cdot 10^{-5}$	100,7950	<0,0001	261,3151<
k	211,5397	2,2183	95,3612	<0,0001	915,7600<
l	0,0012	$5,6619 \cdot 10^{-6}$	206,4530	<0,0001	93,4075<

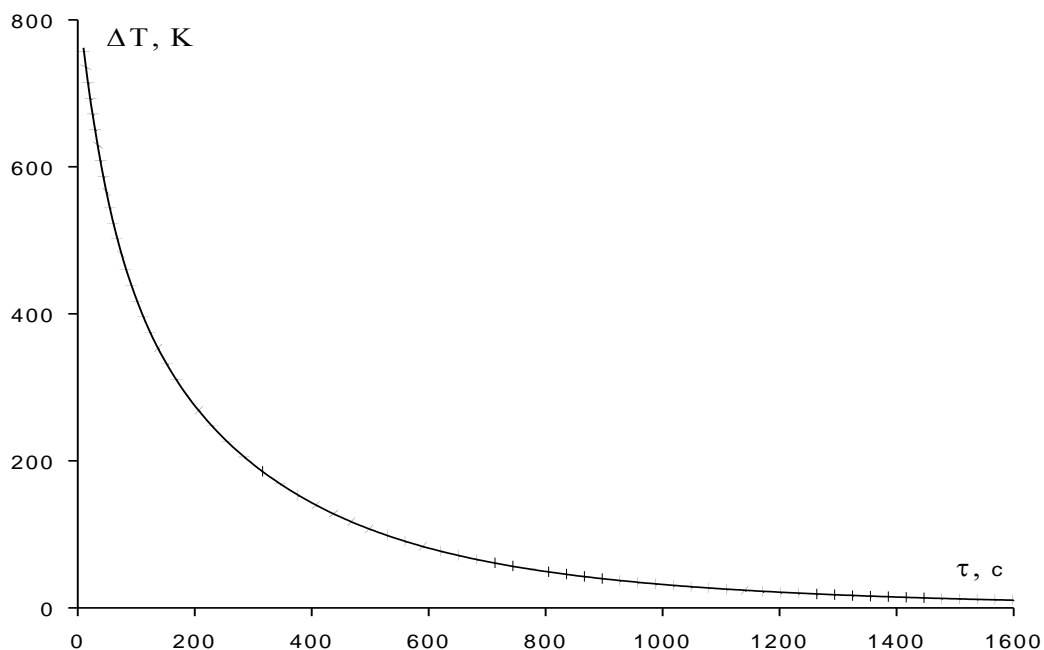


Рис. 4.14. Зависимость температуры цилиндрического образца из Л63 высотой 1,3 см и диаметром 1,5 см от времени охлаждения

**R**      **Rsqr**      **Adj Rsqr**      **Standard Error of Estimate**  
 1,0000    1,0000      1,0000      0,6903

	<b>Coefficient</b>	<b>Std. Error</b>	<b>t</b>	<b>P</b>	<b>VIF</b>
a	161,2083	0,6699	240,6353	<0,0001	38,0898<
b	0,0012	5,7279E-006	213,2298	<0,0001	24,5537<
c	388,2038	0,5069	765,9057	<0,0001	101,9452<
d	0,0003	6,3281E-007	416,7598	<0,0001	172,4933<
k	343,5762	0,3087	1113,1229	<0,0001	404,6443<
l	4,1743E-006	4,3867E-008	95,1574	<0,0001	150,9092<

На рис. 4.15 - 4.18 приведены зависимости разности температур образцов и окружающей среды  $\Delta T$ , охлаждений за счет излучательной  $\Delta T_1$ , кондуктивной  $\Delta T_2$  и конвективной  $\Delta T_3$  теплоотдачи от времени для цилиндрических образцов латуни Л63 диаметром 1,5 см и высотами: 13,3; 8,7; 4,1; 2,5 и 1,3 см.



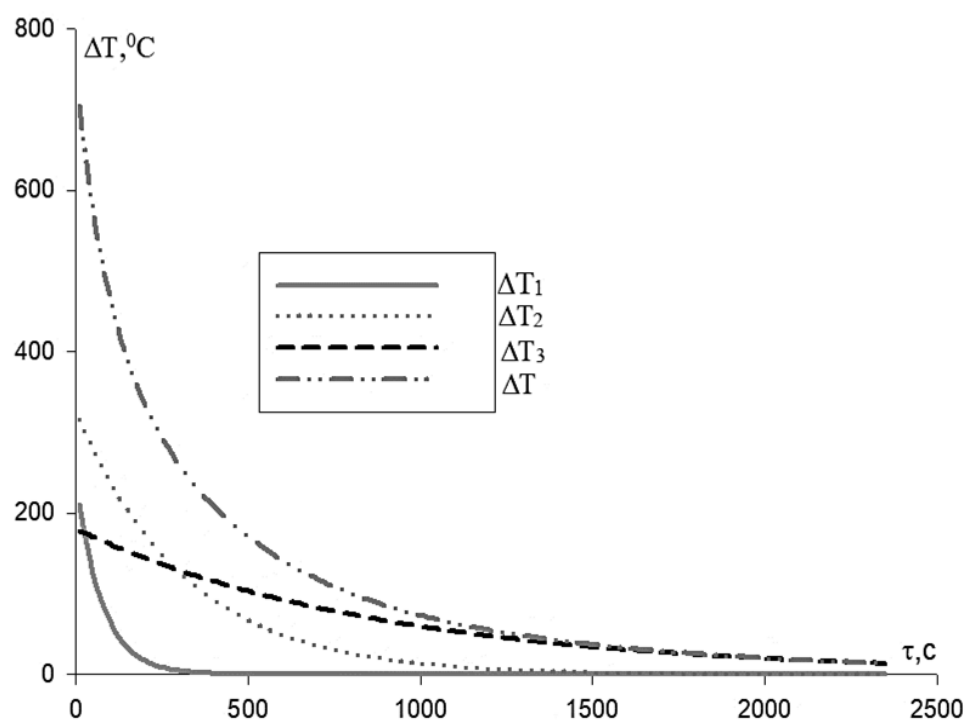


Рисунок 4.15. Зависимость общего охлаждения, охлаждения за счет излучательной  $\Delta T_1$ , кондуктивной  $\Delta T_2$  и конвективной  $\Delta T_3$  теплоотдачи от времени охлаждения для образца диаметром 15 мм и высотой 133 мм

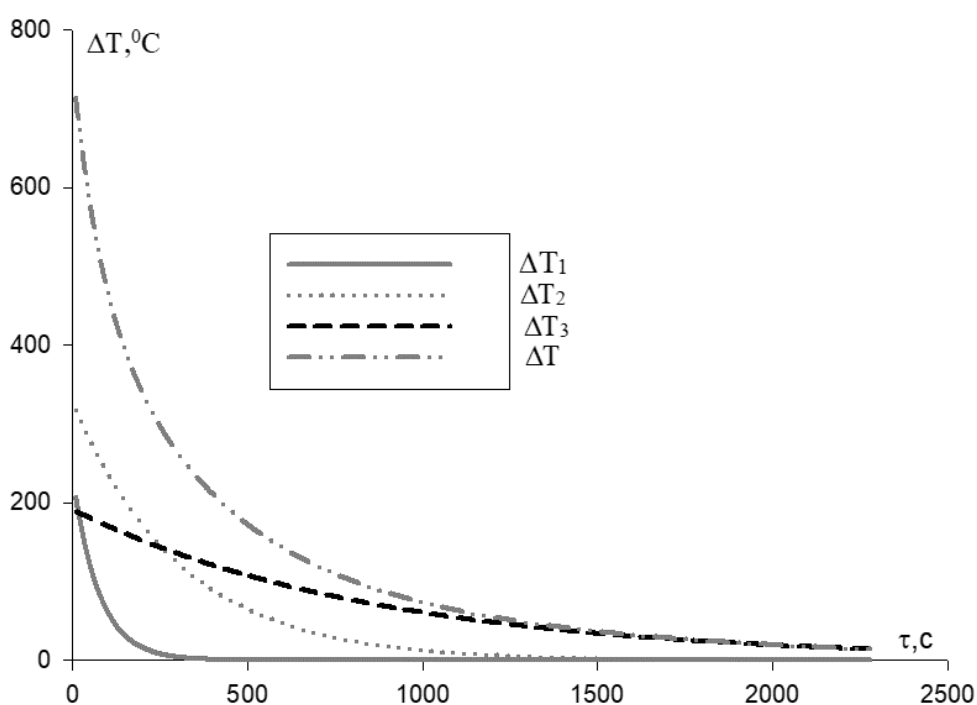


Рисунок 4.16. Зависимость общего охлаждения, охлаждения за счет излучательной  $\Delta T_1$ , кондуктивной  $\Delta T_2$  и конвективной  $\Delta T_3$  теплоотдачи от времени для цилиндрического образца диаметром 15 мм и высотой 87 мм.

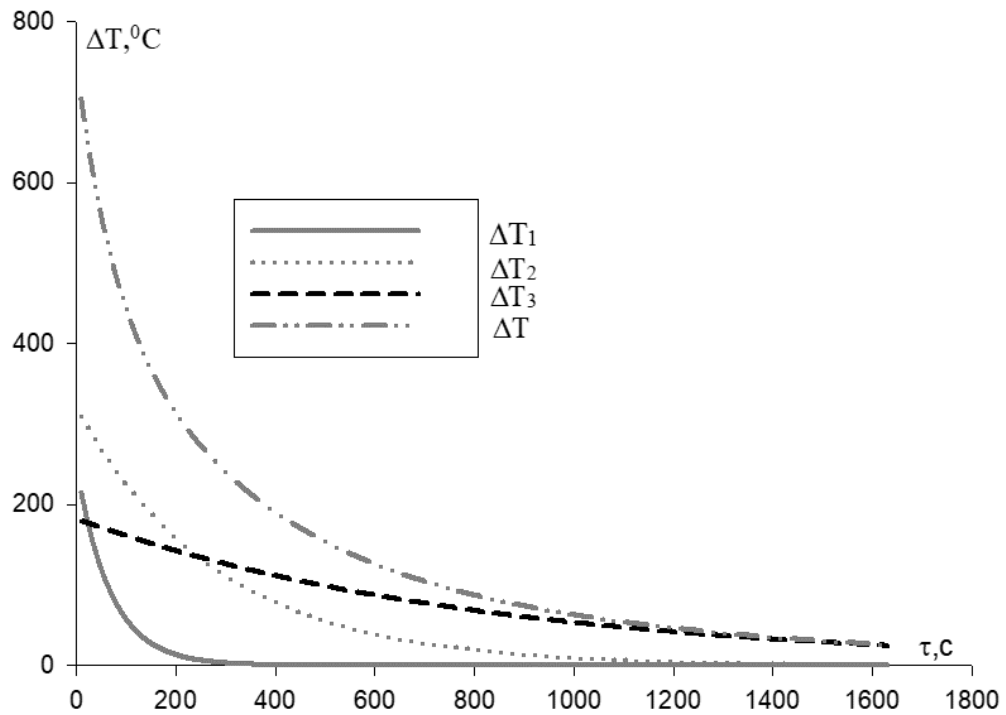


Рисунок 4.17. Зависимость общего охлаждения, охлаждения за счет излучательной  $\Delta T_1$ , кондуктивной  $\Delta T_2$  и конвективной  $\Delta T_3$  теплоотдачи от времени для цилиндрического образца диаметром 15 мм и высотой 41 мм.

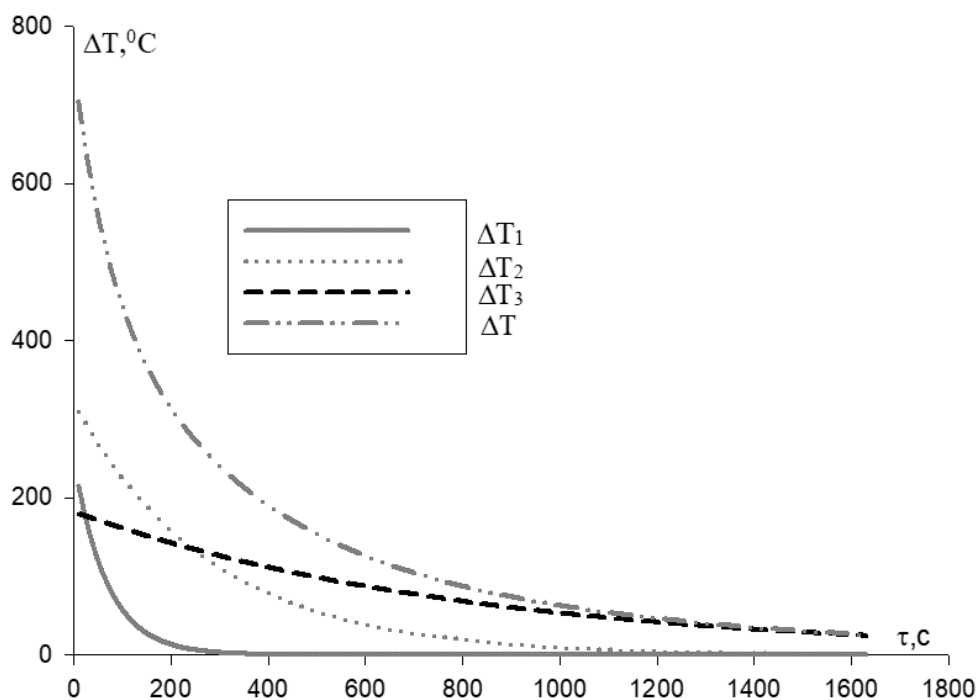


Рисунок 4.18. Зависимость общего охлаждения, охлаждения за счет излучательной  $\Delta T_1$ , кондуктивной  $\Delta T_2$  и конвективной  $\Delta T_3$  теплоотдачи от времени для цилиндрического образца диаметром 15 мм и высотой 25 мм.

Как видно из рис. 4.15- 4.18, процесс охлаждения за счет теплового излучения протекает быстрее, чем в случаях теплопроводности и конвекции.

На рис. 4.19-4.21 в качестве примера приведены зависимости скоростей охлаждения от времени для образцов латуни марки Л63 диаметром 1,5 см и высотой 4,1, 8,7 и 13,3 см.

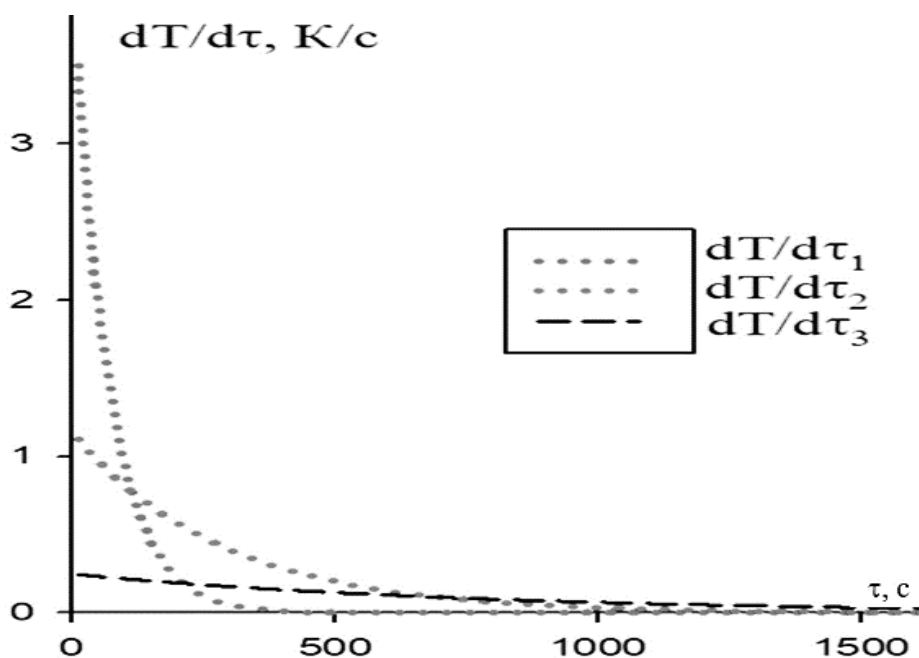


Рис. 4.19. Зависимости скоростей охлаждения за счет излучательного ( $dT/d\tau_1$ ), кондуктивного ( $dT/d\tau_2$ ) и конвективного ( $dT/d\tau_3$ ) теплоотдачи от времени для цилиндрического образца высотой 133 мм.

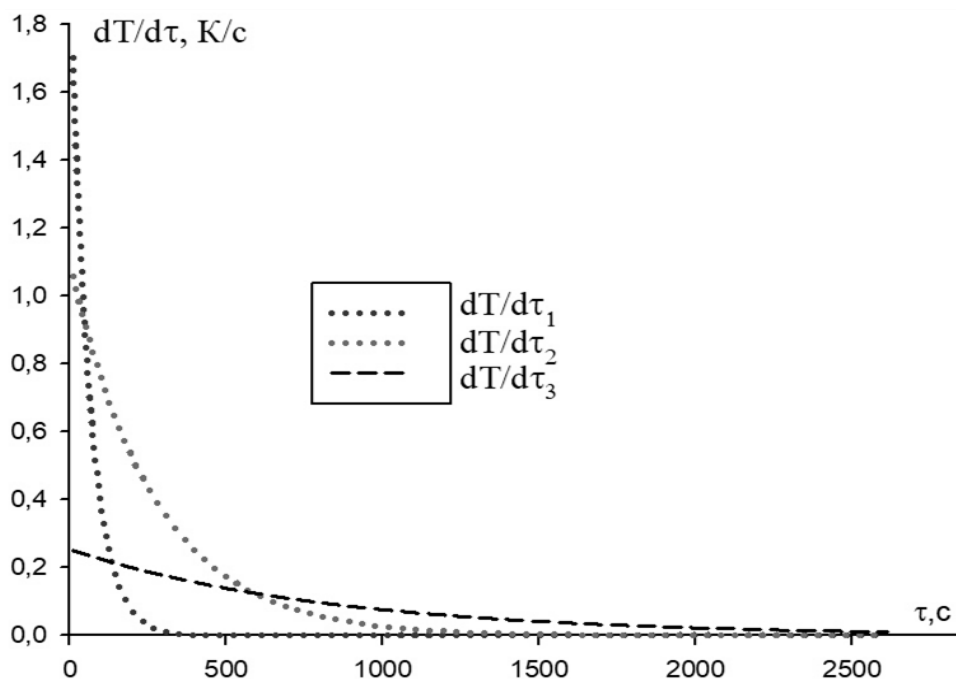


Рис. 4.20. Зависимости скоростей охлаждения за счет излучательного ( $dT/d\tau_1$ ), кондуктивного ( $dT/d\tau_2$ ) и конвективного ( $dT/d\tau_3$ ) теплоотдачи от времени для цилиндрического образца высотой 87 мм.

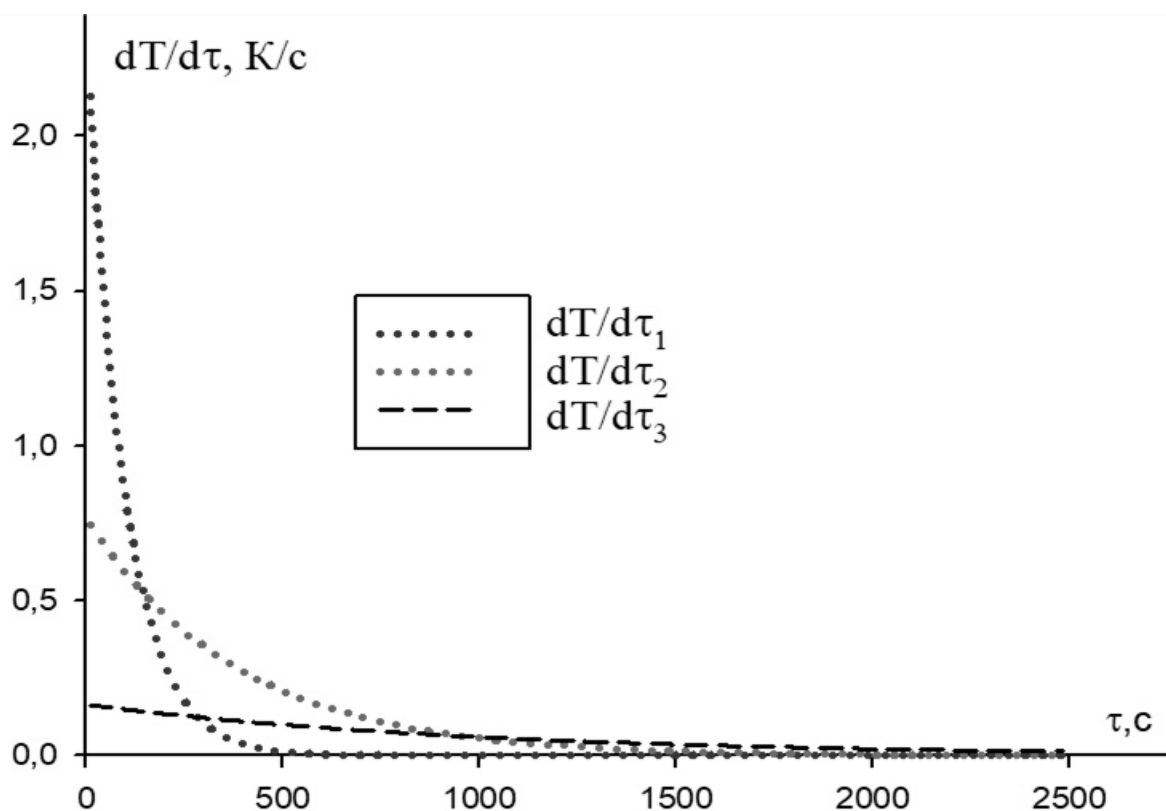


Рис. 4.21. Зависимости скоростей охлаждения за счет излучательного ( $dT/d\tau_1$ ), кондуктивного ( $dT/d\tau_2$ ) и конвективного ( $dT/d\tau_3$ ) теплоотдачи от времени для цилиндрического образца высотой 41 мм.

В табл. 4.2 приведены значения постоянных в уравнения (3.18) для образцов из латуни Л63 диаметра 1,5 см с разными высотами.

Таблица 4.2

Постоянные уравнения (3.18) для латуни  
марки Л63 диаметра 1,5 см с разными высотами

h, см	V/S, см	$\Delta T_1, K$	$\tau_1, c$	$\Delta T_2, K$	$\tau_2, c$	$\Delta T_3, K$	$\tau_3, c$
1,3	0,237	251	51	320	210	182	604
2,5	0,288	248	62	325	255	180	734
4,1	0,317	250	68	320	284	180	808
8,7	0,345	246	74	328	306	182	880
13,3	0,355	248	76	326	308	179	905

Обработка кривых зависимостей характерных времён охлаждения от отношения объема цилиндра к его площади поверхности  $V/S$  для латуни Л63 показывает, что в пределах погрешности определения выражаются уравнением.

$$\tau_i = ax, \quad (4.5)$$

где  $x = V/S$ ,  $a = 213,3$  с/см для  $\tau_1$ ,  $886,7$  с/см для  $\tau_2$  и  $2550$  с/см для  $\tau_3$ .

С использованием температурных зависимостей теплоемкостей меди и цинка [54,55] нами по правилу Неймана-Коппа получена следующая формула для зависимости теплоемкости латуни марки Л63 от температуры

$$\begin{aligned} C(T) &= 0,63 (388,47 + 17,94x - 2,0x^2 + 0,22x^3) + \\ &\quad 0,37 (393,96 + 15,52x - 0,16x^2 + 0,76x^3), \\ C(T - 300) &= 390,50 + 17,04x - 1,32x^2 + 0,42x^3, \end{aligned} \quad (4.6)$$

где  $x = (T - 300)/100$ . Согласно литературным данным [162], удельная теплоемкость латуни Л63 при 293 К равна 385 Дж/(кг К). По формуле (4.6) при 300 К – 390,5 Дж/(кг К). Сравнение показывает, что использование правила Неймана-Коппа в данном случае для латуни оправдано.

Используя значения удельной теплоемкости по формуле (4.6) и экспериментально полученные временные зависимости скорости охлаждения, для каждого процесса нами вычислены соответствующие коэффициенты теплоотдачи для латуни марки Л63 по формулам (3.21) и (3.22).

На рис. 4.22-4.26 приведены температурные зависимости коэффициентов излучательной  $\alpha_1$ , кондуктивной  $\alpha_2$  и конвективной  $\alpha_3$  теплоотдачи для латуни марки Л63 диаметром 1,5 см с разными высотами.

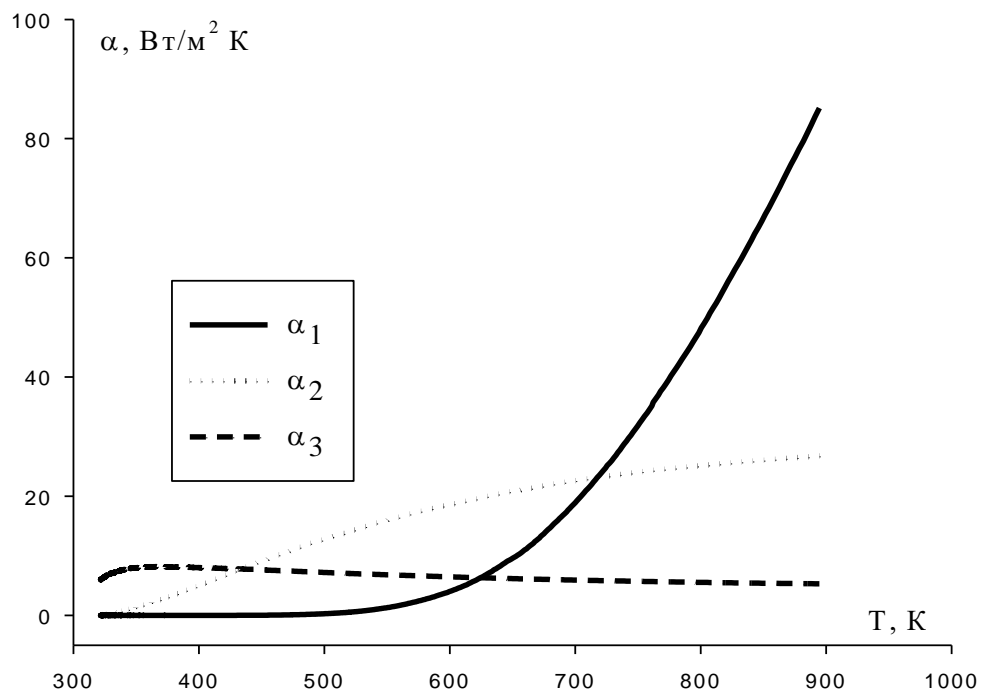


Рис. 4.22. Температурные зависимости коэффициентов излучательной  $\alpha_1$ , кондуктивной  $\alpha_2$  и конвективной  $\alpha_3$  теплоотдачи для латуни Л63 диаметром 1,5 см и высотой 1,3 см.

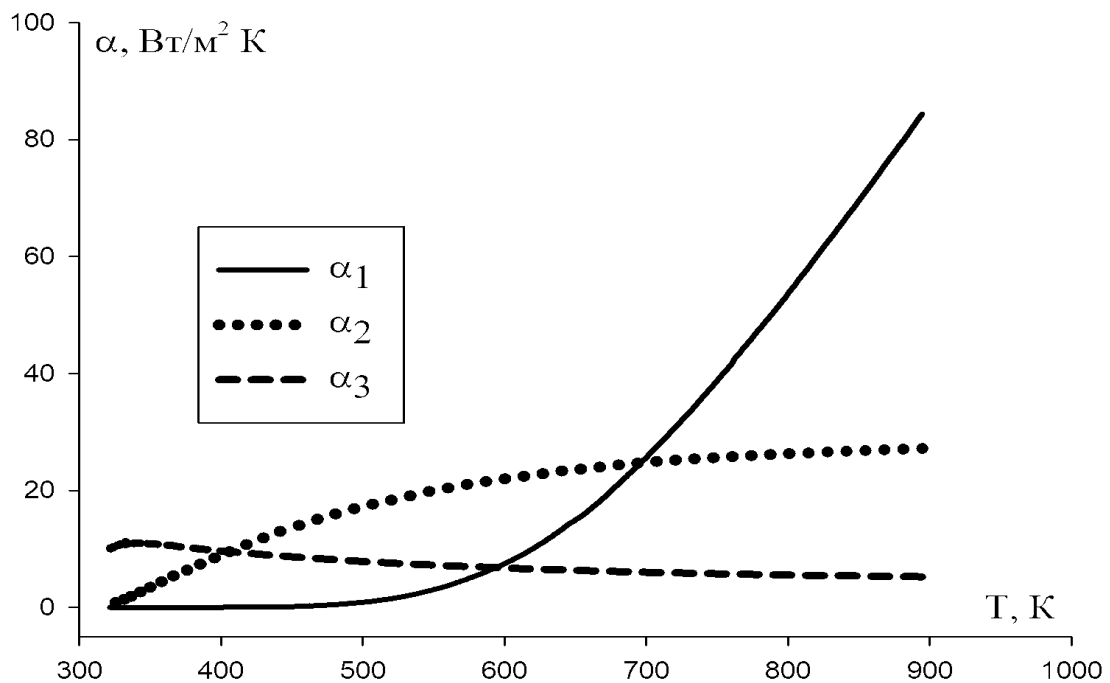


Рис. 4.23. Температурные зависимости коэффициентов излучательной  $\alpha_1$ , кондуктивной  $\alpha_2$  и конвективной  $\alpha_3$  теплоотдачи для латуни Л63 диаметром 1,5 см и высотой 2,5 см.

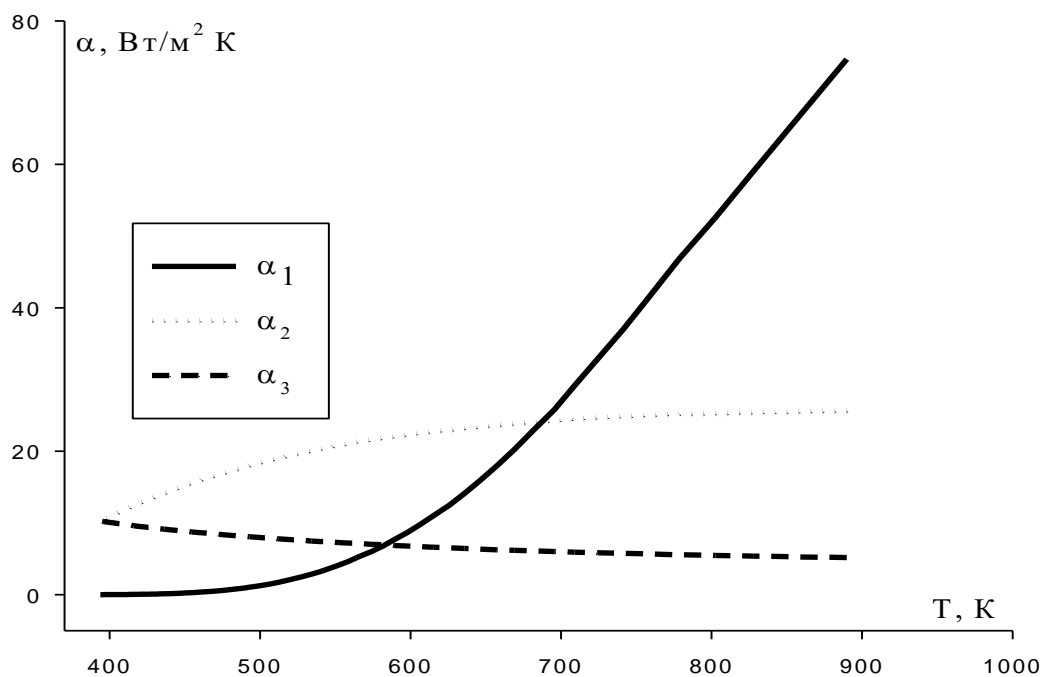


Рис. 4.24. Температурные зависимости коэффициентов излучательной  $\alpha_1$ , кондуктивной  $\alpha_2$  и конвективной  $\alpha_3$  теплоотдачи для латуни Л63 диаметром 1,5 см и высотой 4,1 см.

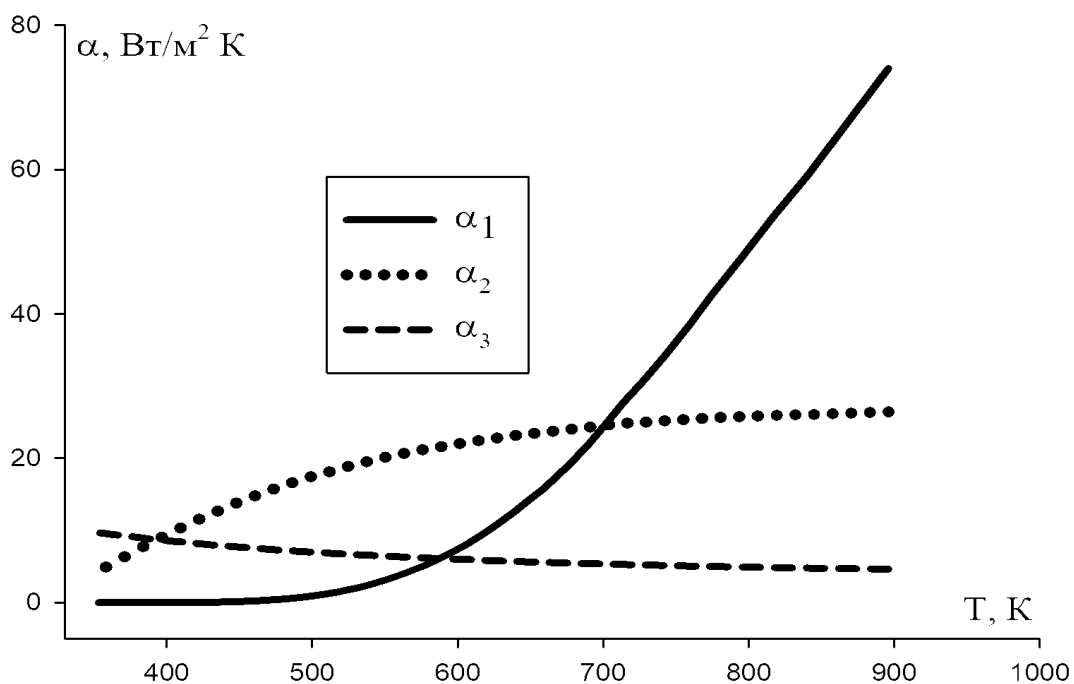


Рис. 4.25. Температурные зависимости коэффициентов излучательной  $\alpha_1$ , кондуктивной  $\alpha_2$  и конвективной  $\alpha_3$  теплоотдачи для латуни Л63 диаметром 1,5 см и высотой 8,7 см.

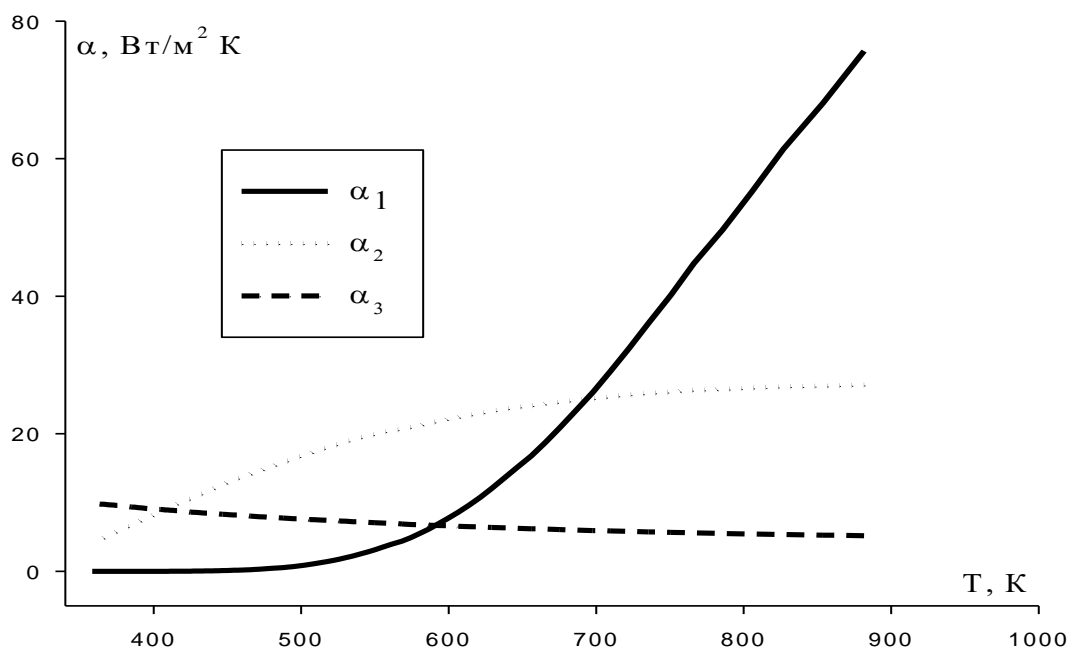


Рис. 4.26. Температурные зависимости коэффициентов излучательной  $\alpha_1$ , кондуктивной  $\alpha_2$  и конвективной  $\alpha_3$  теплоотдачи для латуни Л63 диаметром 1,5 см и высотой 13,3 см.

Как видно из рис. 4.22-4.26, естественное воздушное охлаждение за счет конвекции имеет небольшой коэффициент теплоотдачи ( $\sim 20$  Вт/(м<sup>2</sup>·К)) и очень слабо зависит от температуры.

На рис. 4.27-4.30 приведены температурные зависимости коэффициентов теплоотдачи при различных высотах цилиндра.

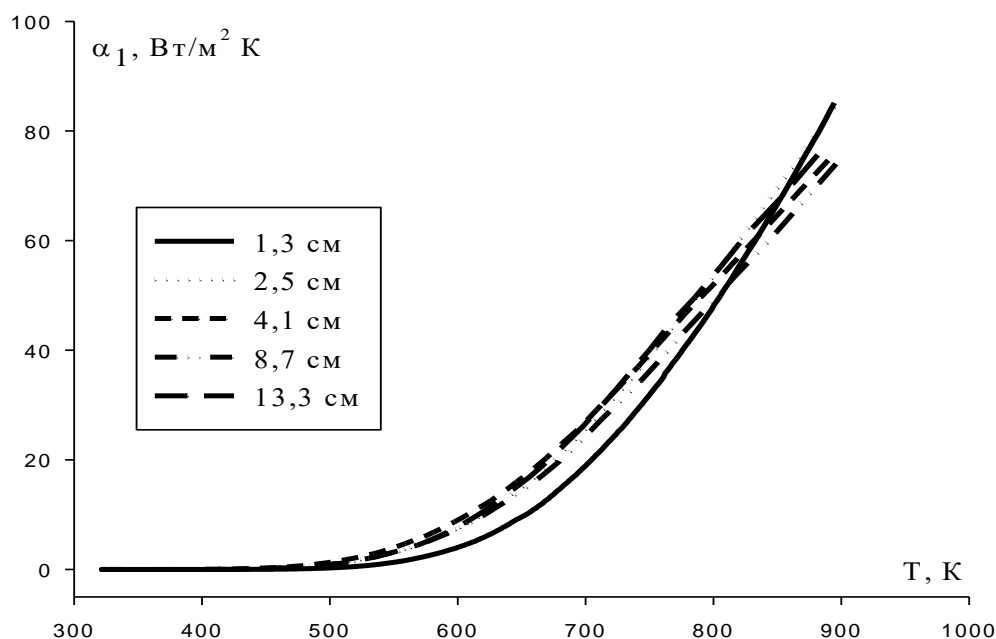


Рис. 4.27. Температурные зависимости коэффициентов излучательной теплоотдачи при разных высотах цилиндров из латуни Л63.



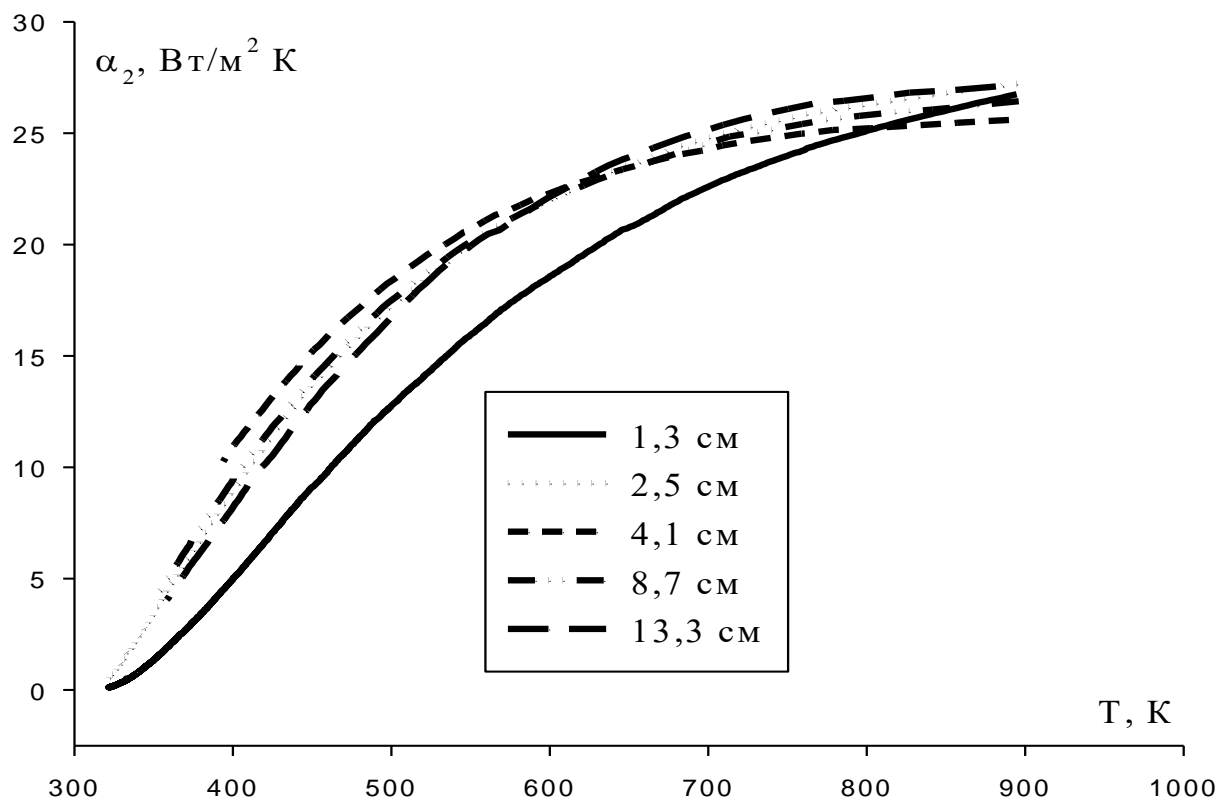


Рис. 4.28. Температурные зависимости коэффициентов кондуктивной теплоотдачи при разных высотах цилиндров из латуни Л63.

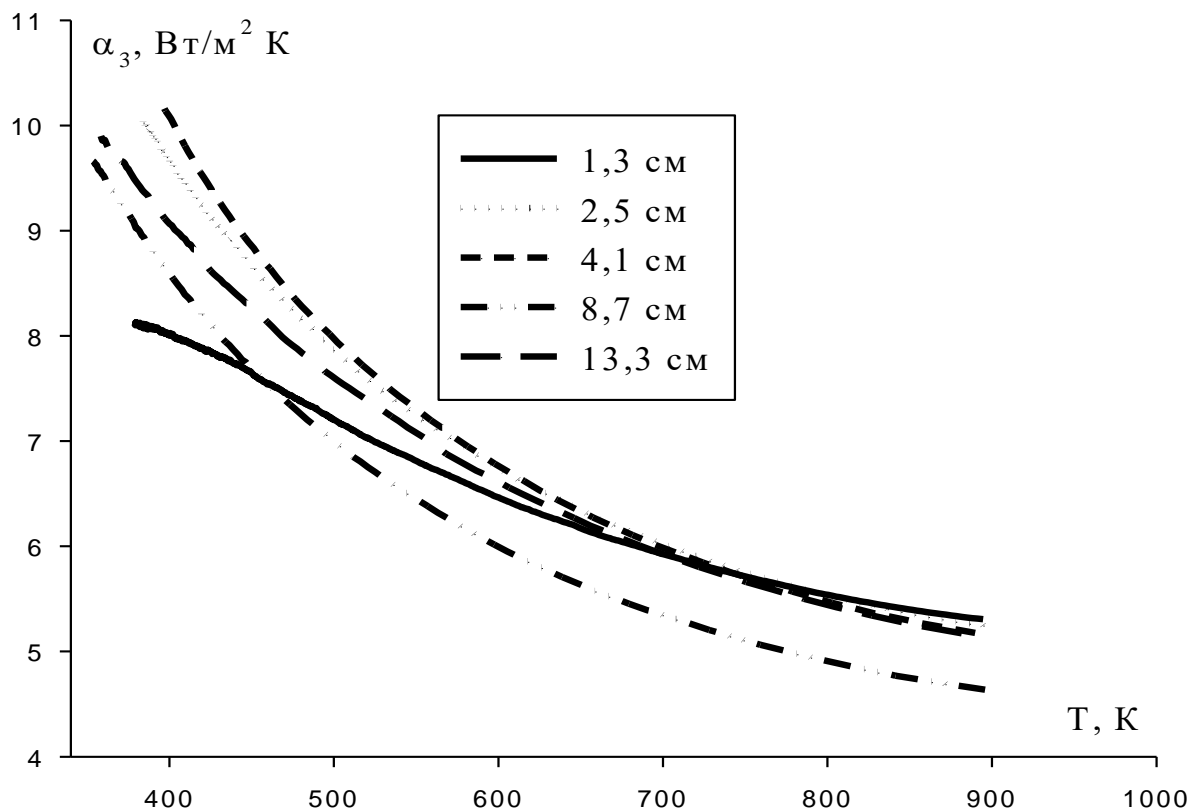


Рис. 4.29. Температурные зависимости коэффициента конвективной теплоотдачи при разных высотах цилиндров из латуни Л63.

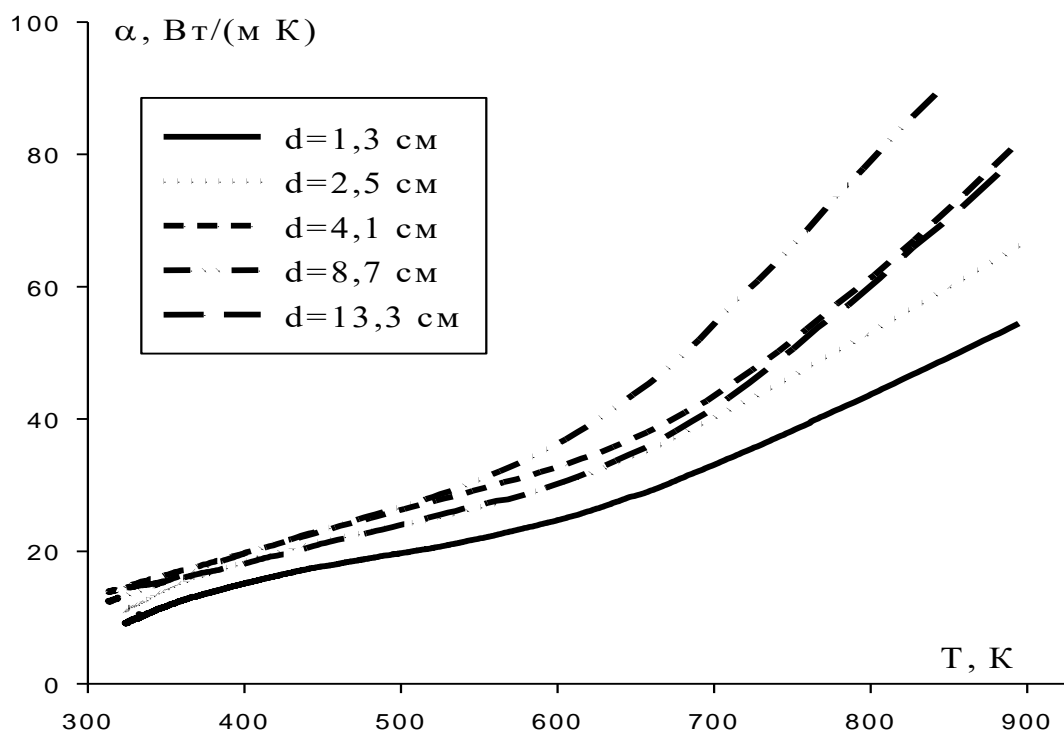


Рис. 4.30. Температурные зависимости общего коэффициента теплоотдачи при различных высотах цилиндров из латуни Л63.

Как видно, характерное время охлаждения увеличивается в ряду излучательной, кондуктивной и конвективной теплоотдачи. Вклад теплового излучения и теплопроводности на процесс охлаждения образцов заметно при высоких температурах. Характерные времена охлаждения за счет теплового излучения, теплопроводности и конвекции с ростом отношения объема к площади образца в пределах погрешности эксперимента увеличиваются линейно, с повышением температуры в условиях свободной конвекции вклад излучения в охлаждении образцов увеличивается.

Результаты данного раздела были опубликованы в работах [163, 164].

#### 4.3. Кинетика охлаждения цилиндрической стали 45 разных диаметров и наблюдаемый в них фазовый переход

В данной параграфе приведены результаты экспериментального исследования кинетики охлаждения и процессов теплоотдачи образцов из стали марки

45 формы цилиндра с диаметрами 15, 20, 25, 30 и 37 мм и высотой 95 мм в интервале температуры от 1023 К до 308 К.

Изучение фазовых переходов в сталях, а также влияния размера образцов на кинетику их охлаждения и процессы теплообмена с окружающей средой имеет важное практическое значение для понимания процессов охлаждения крупных стальных конструкций. Контроль процессов охлаждения стальных деталей играет ключевую роль в определении их эксплуатационных свойств.

Целью данной части работы было экспериментально определить характер охлаждения и изменение коэффициентов теплоотдачи образцов из стали 45 в зависимости от их размера и температуры, а также исследовать фазовый переход первого рода, происходящий в исследуемом диапазоне температур.

Углеродистая сталь 45 является наиболее распространенным в применении конструкционным материалом [165, 166]. В состав сталей кроме углерода входят и другие элементы, но углерод является основным компонентом, оказывающим влияние на структуру и свойства железных сплавов.

В работе была использована углеродистая сталь марки 45 с содержанием углерода в составе не менее 0,45 %. Химический состав стали 45 приведен в табл. 4.3 из работы [165]. Содержание элементов в %.

Таблица 4.3

Химический состав стали 45 по элементам, %

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	As	Fe
0,42 - 0,5	0,17 - 0,37	0,5 - 0,8	до 0,25	до 0,04	до 0,035	до 0,25	до 0,25	до 0,08	~97

Для оценки однородности распределения температуры в образце вычислили число Био. При температуре 300 К для стали 45  $\alpha = 20 \text{ Вт/(м К)}$ , коэффициент теплопроводности  $\lambda \approx 79 \frac{\text{Вт}}{\text{м К}}$ , для цилиндра  $d=3,7 \text{ см}$  и  $h=9,5 \text{ см}$  -  $V/S = 7,73 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  получаем число Био  $Bi = 0,002$ . При  $Bi < 0,1$  тело можно считать «термически тонким», а распределение температуры внутри него – равномерным. В этом случае можно использовать формулу (3.18) для обработки результатов по кинетике охлаждения.

Методом охлаждения были исследованы кинетические кривые охлаждения образцов стали марки 45 цилиндрической формы высотой 95 мм и диаметрами 15, 20, 25, 30 и 37 мм в интервале температур от 750 °С до 35 °С.

В качестве примера на рис. 4.31-4.32 приведены кинетические кривые охлаждения цилиндрических образцов стали 45 высотой 95 мм диаметрами 15 мм и 20 мм.

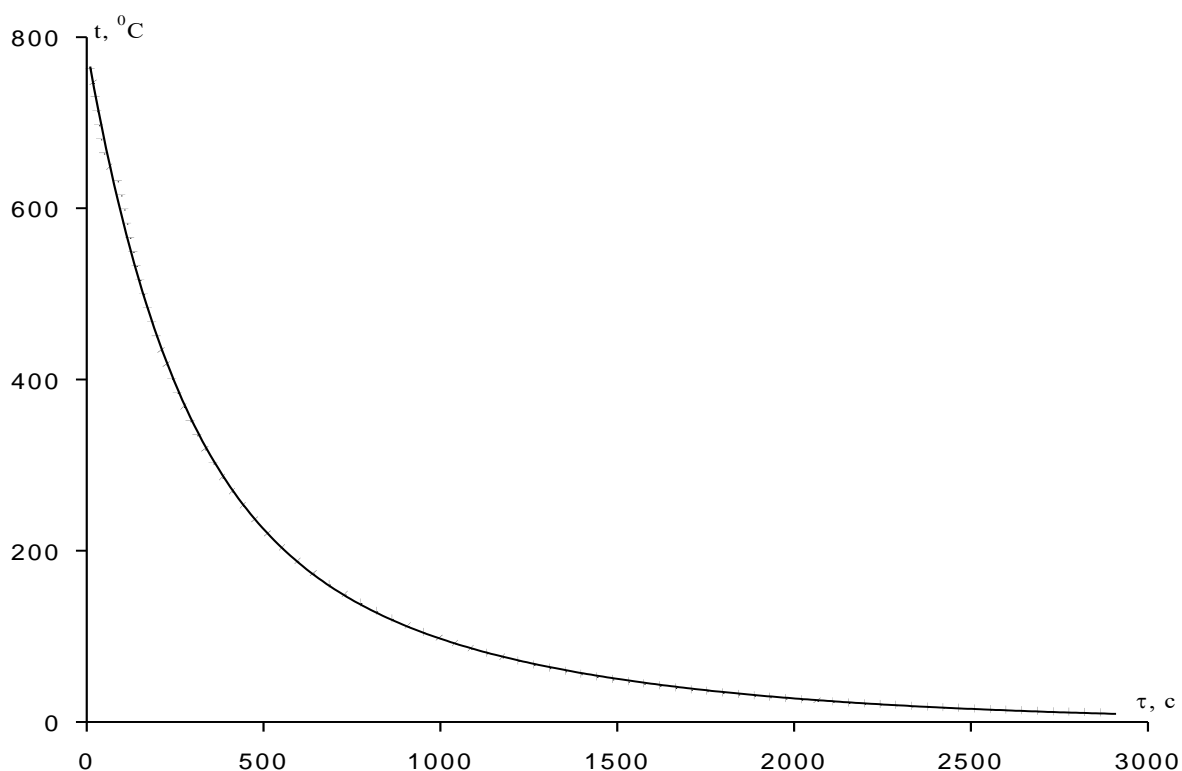


Рис. 4.31. Зависимость температуры образца из стали 45 диаметром 15 мм от времени охлаждения

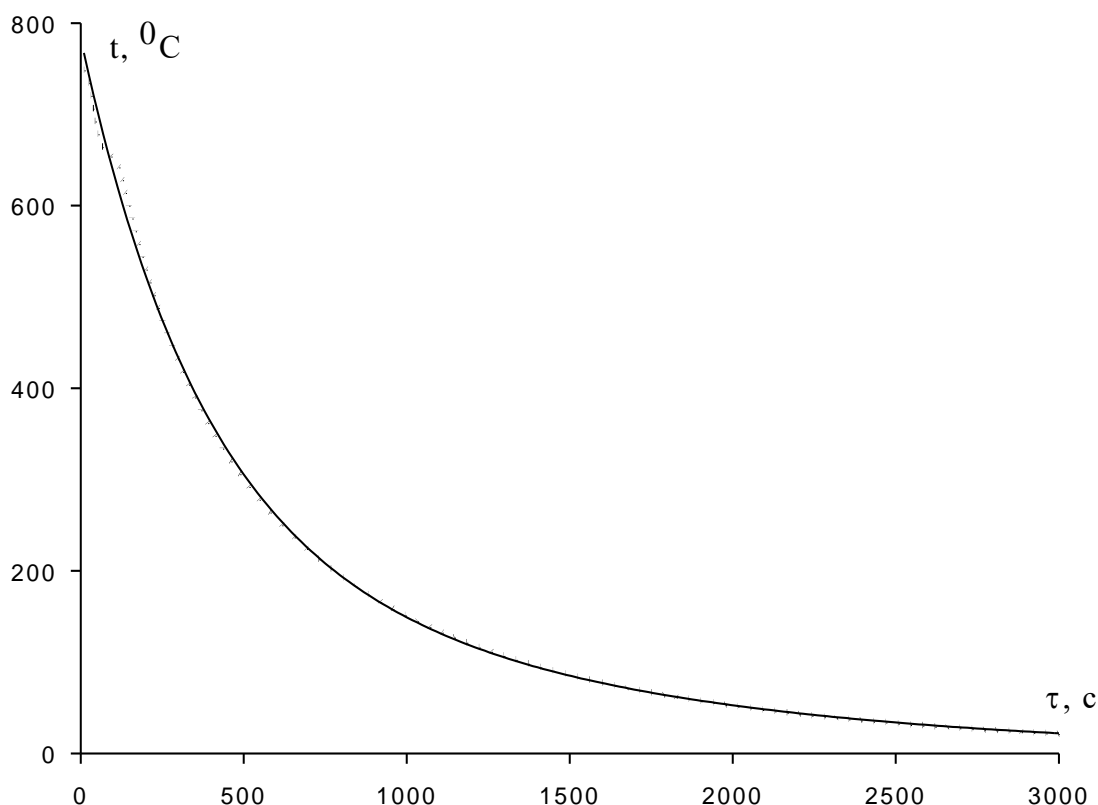


Рис. 4.32. Зависимость температуры образца из стали 45 диаметром 20 мм от времени охлаждения

Как видно, на кривых охлаждения в области около  $675^{\circ}\text{C}$  наблюдается перегиб, связанный с выделением тепла. Такие же изгибы в кинетических кривых охлаждения наблюдаются в цинк-алюминиевых сплавах [59-60]. Для анализа этих перегибов и переходов использовали математический аппарат, встроенный в Origin Pro программы. Сначала выделили базовую линию. На рис. 4.33-4.36 в качестве примера приведены кинетические кривые охлаждения стали 45 высотой 95 мм с разными диаметрами: кружочки эксперимент, сплошная линия- базовая линия.

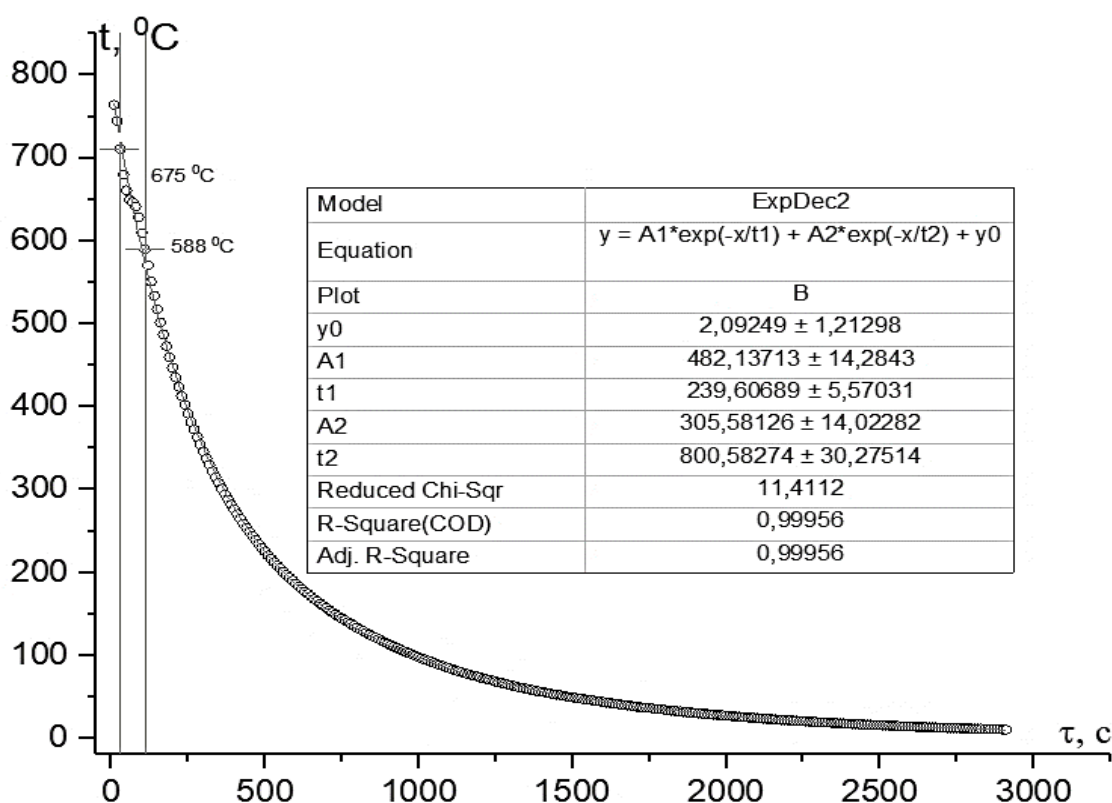


Рисунок 4.33. Зависимость температуры образца  $d = 15$  мм от времени охлаждения. Область аномального охлаждения выделены от  $675^{\circ}\text{C}$  до  $588^{\circ}\text{C}$

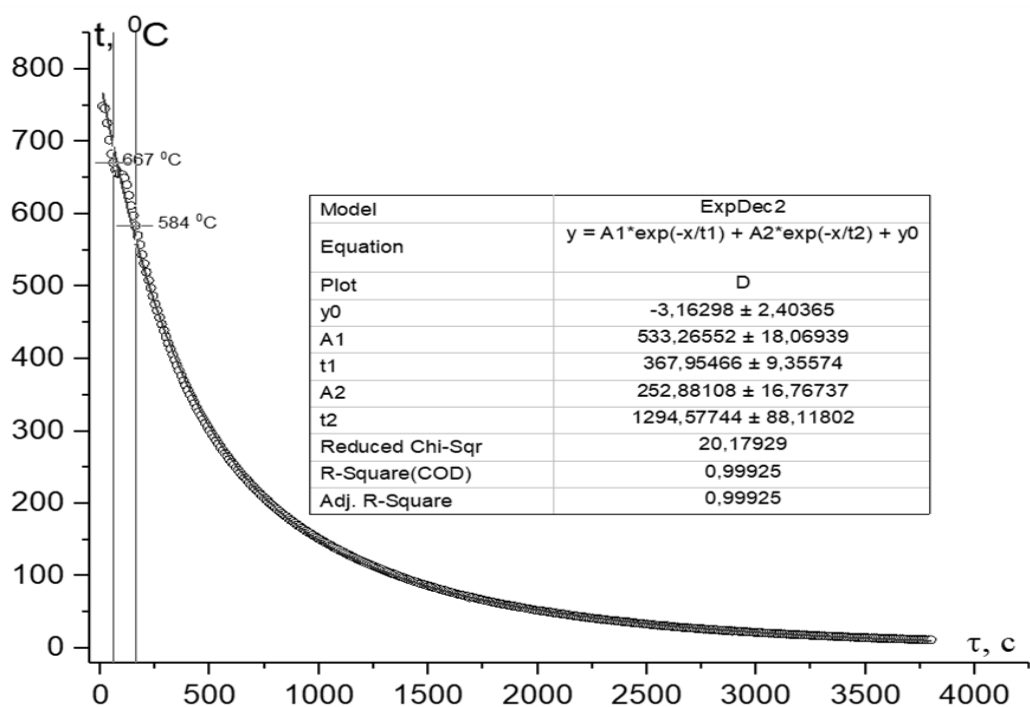


Рисунок 4.34. Зависимость температуры образца  $d = 20$  мм от времени охлаждения. Область аномального охлаждения выделены от  $667^{\circ}\text{C}$  до  $584^{\circ}\text{C}$

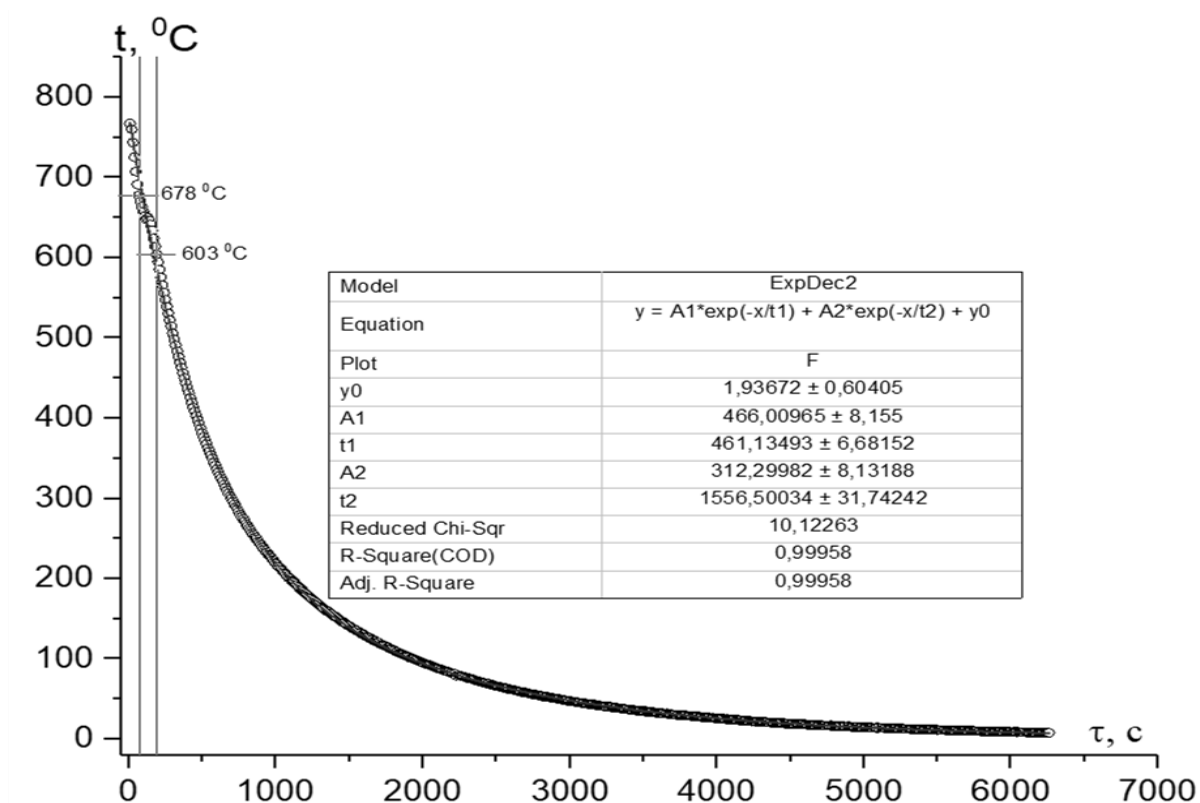


Рисунок 4.35. Зависимость температуры образца  $d = 25$  мм от времени охлаждения. Область аномального охлаждения выделены от  $678^{\circ}\text{C}$  до  $603^{\circ}\text{C}$

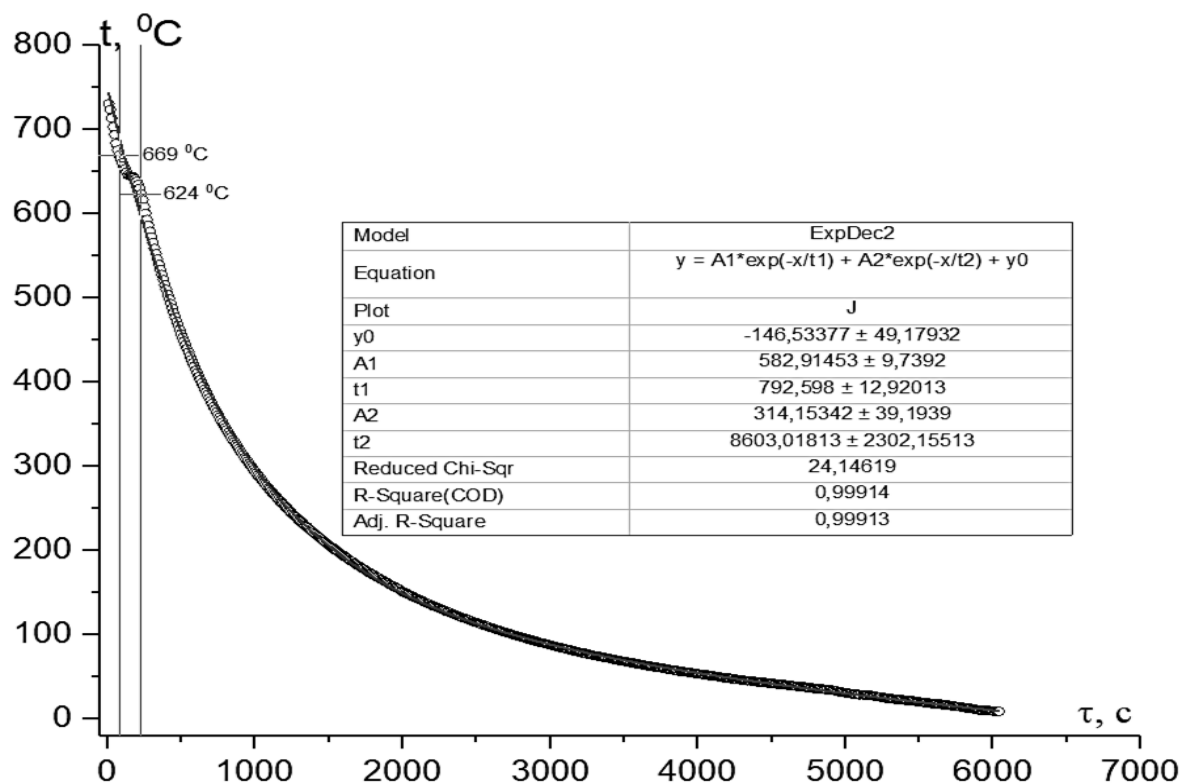


Рисунок 4. 36. Зависимость температуры образца  $d = 37$  мм от времени охлаждения. Область аномального охлаждения выделены от  $669^{\circ}\text{C}$  до  $624^{\circ}\text{C}$ .

На рис. 4.37-4.41 приведены температурные зависимости разностей температур образцов разного диаметра и базовых линий.

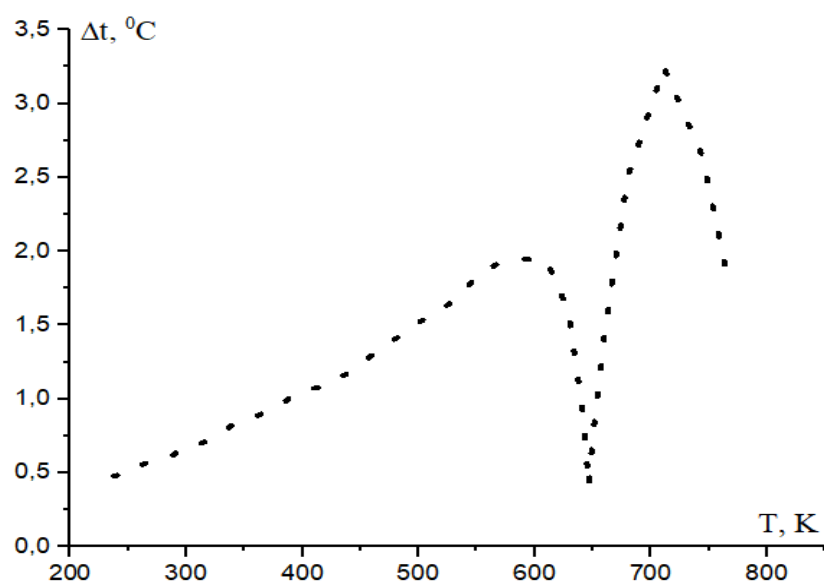


Рисунок 4.37. Температурная зависимость разности температур образца цилиндрической стали 45 высотой 95 мм и диаметром 15 мм и базовой линии.

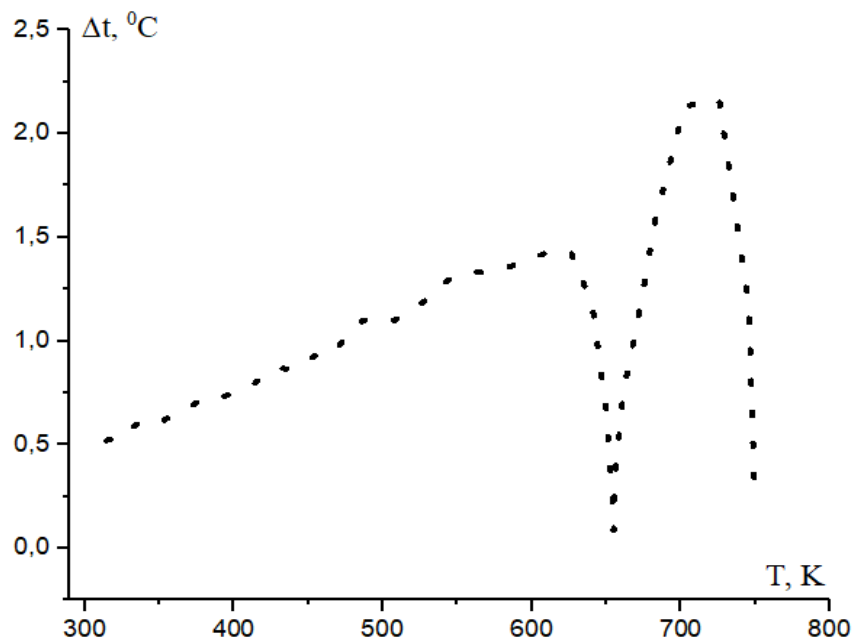


Рисунок 4.38. Температурная зависимость разности температур образца высотой 95 мм и диаметром 20 мм и базовой линии.



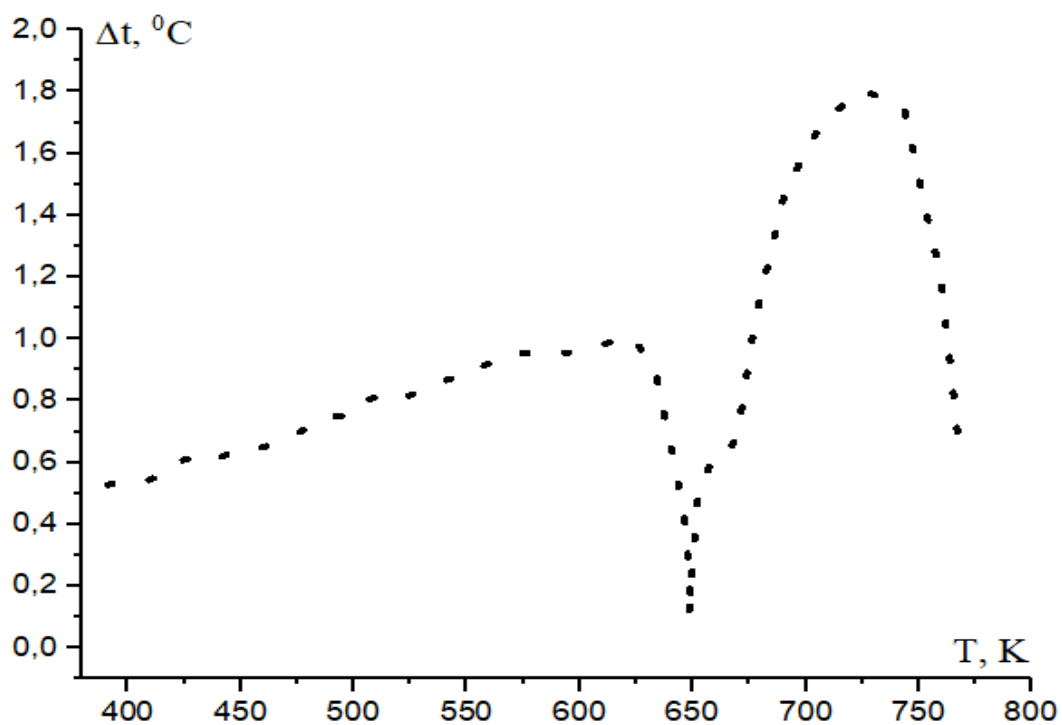


Рисунок 4.39. Температурная зависимость разности температур образца цилиндрической стали 45 высотой 95 мм и диаметром 25 мм и базовой линии.

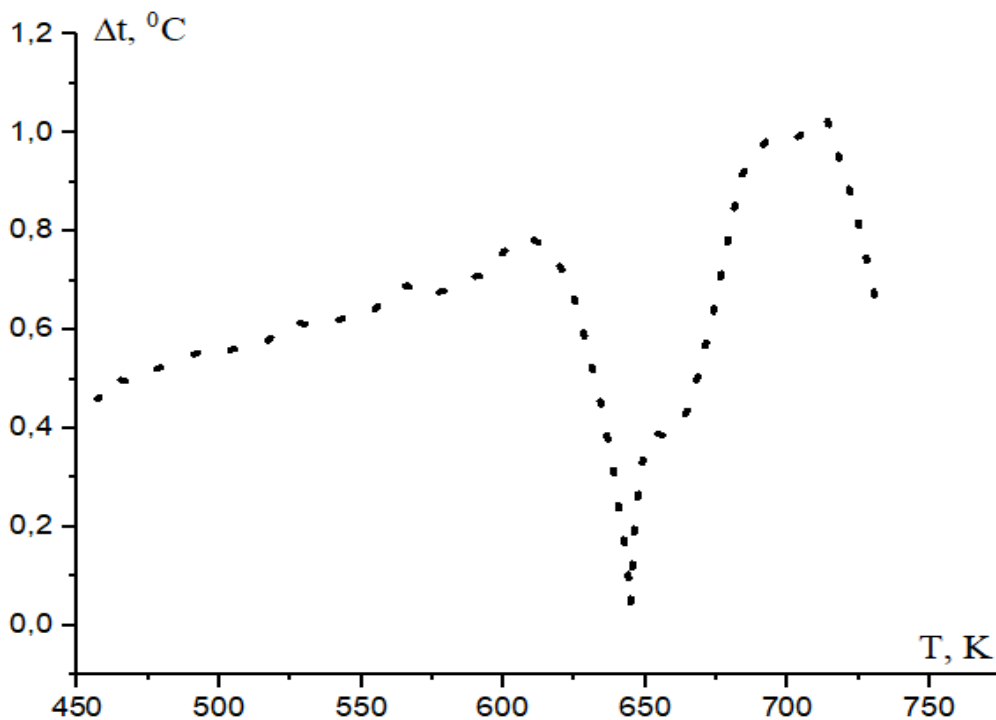


Рисунок 4.40. Температурная зависимость разности температур образца цилиндрической стали 45 высотой 95 мм и диаметром 35 мм и базовой линии.

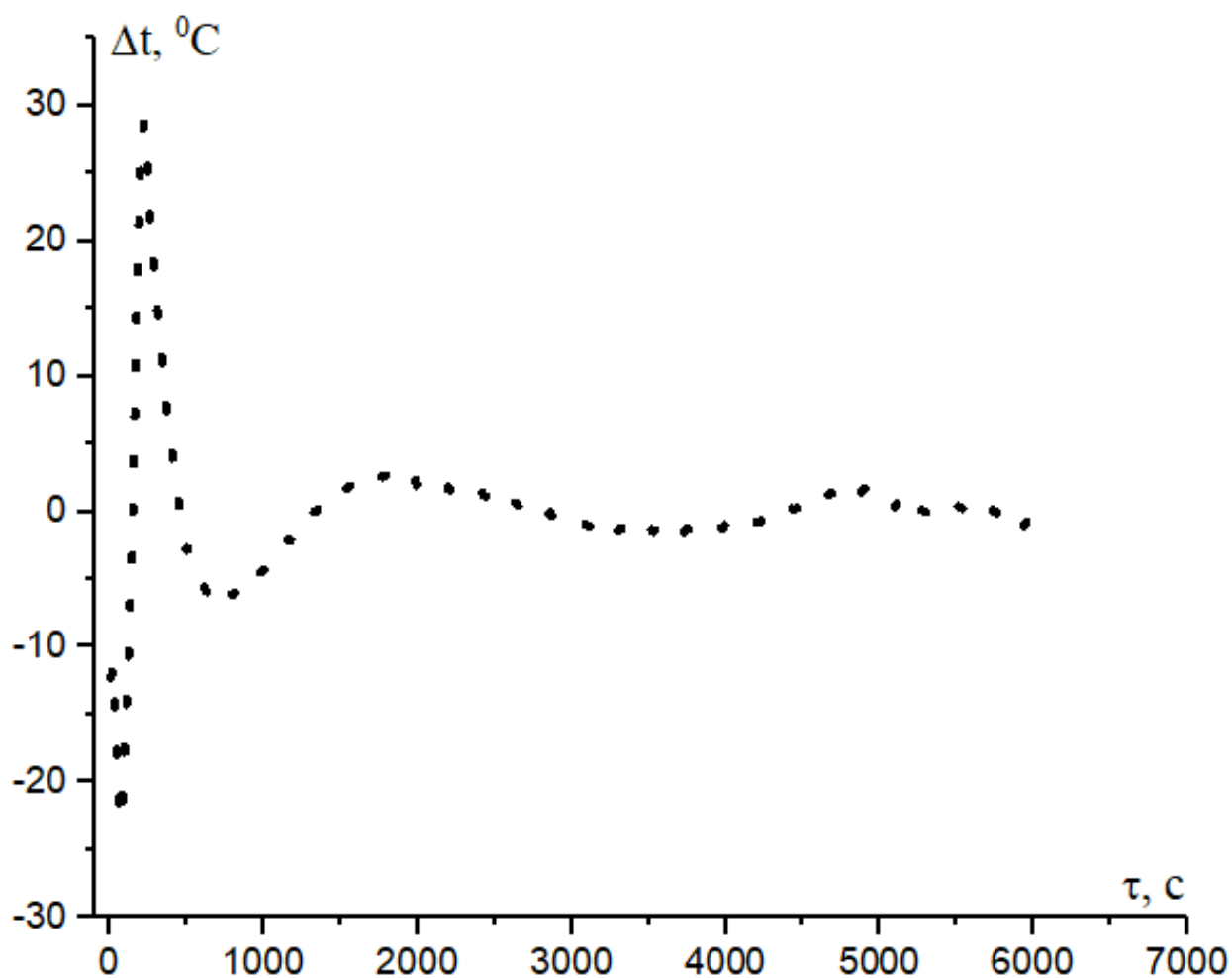


Рисунок 4.41. Температурная зависимость разности температур образца цилиндрической стали 45 высотой 95 мм и диаметром 37 мм и базовой линии.

Обработка графиков с помощью программы Origin Pro 17 показала, что лучше всего базовая линия описывается уравнением (3.18). В качестве примера на рис. 4.42-4.43 приведены кривые охлаждения за счет излучения  $\Delta T_1$  и конвекции  $\Delta T_2$  для образцов диаметрами 2,0 и 2,5 см.

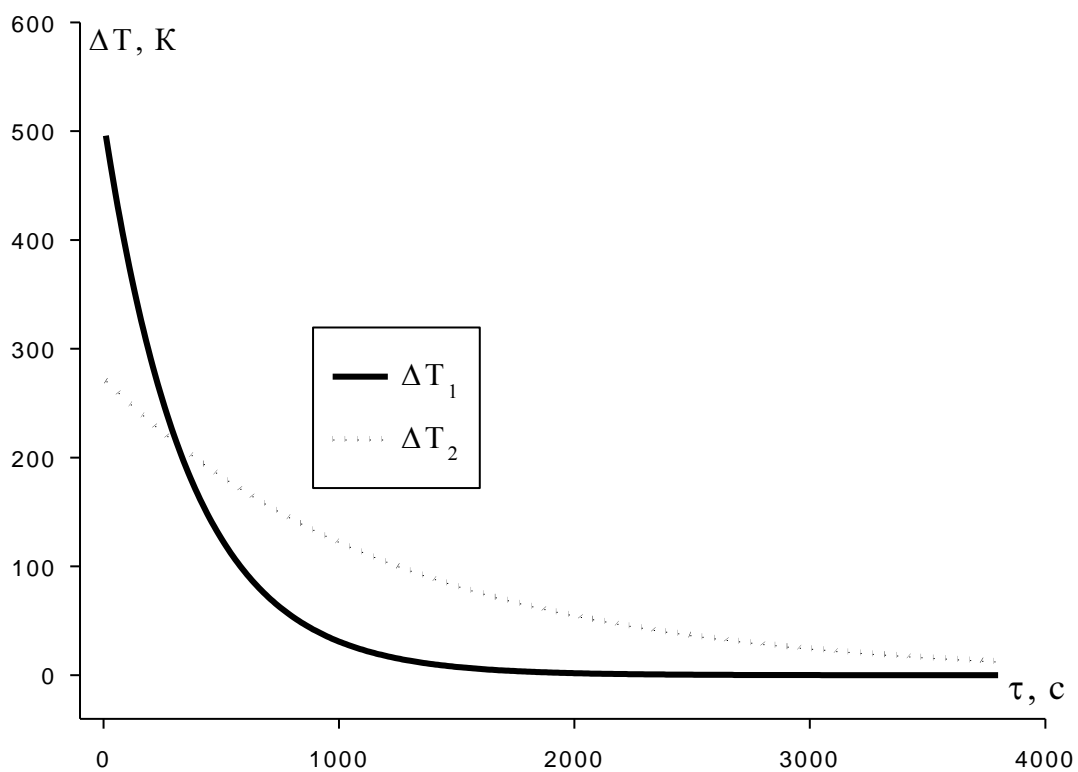


Рисунок 4.42. Кривые охлаждения за счет излучательного  $\Delta T_1$  и конвективного теплоотдачи  $\Delta T_2$  для образцов диаметром 2.0 см.

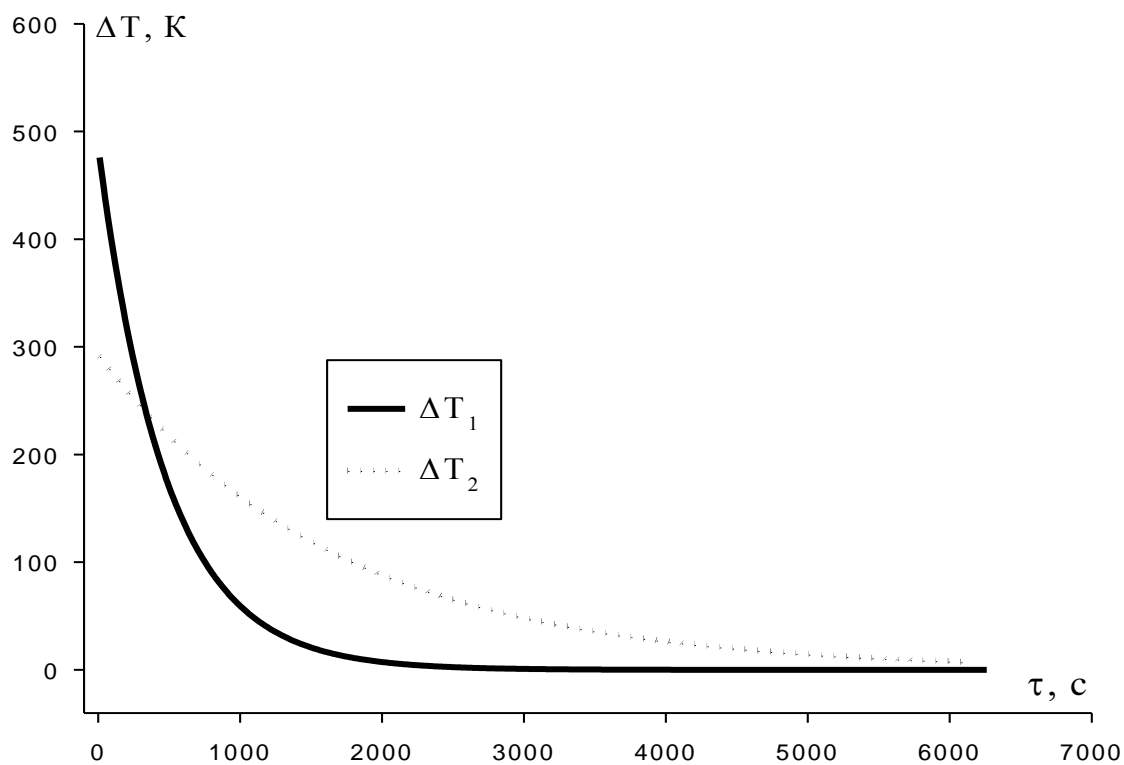


Рисунок 4.43. Кривые охлаждения за счет излучательного  $\Delta T_1$  и конвективного теплоотдачи  $\Delta T_2$  для образцов диаметром 2.5 см.

Как видно из приведенных рисунков, при высоких температурах образец охлаждается в основном за счет излучения, а при низких температурах - за счет конвекции.

В табл. 4.4 приведены найденные значения постоянных уравнения (3.18) для цилиндрической стали 45.

Таблица 4.4

Значения параметров в уравнения (3.18) для стали 45 разных диаметров

d, мм	$\Delta T_1$ , K	$\tau_1$ , с	$\Delta T_2$ , K	$\tau_2$ , с	V, $10^{-6} \text{ м}^3$	S, $10^{-3} \text{ м}^2$	$\frac{V}{S}$ , $10^{-3} \text{ м}$
15	502	243	287	800	16,8	4,8	3,50
20	510	357	273	1250	29,8	6,6	4,52
25	486	476	293	1600	46,6	8,4	5,55
37	504	625	294	2000	102,1	13,2	7,73

Как видно из табл. 4.4, характерное время охлаждения за счёт излучения  $\tau_1$  меньше, чем характерное время охлаждения за счёт конвекции  $\tau_2$ .

На рис. 4.44 приведена зависимость характерных времён охлаждения стали от отношения объема цилиндра к его площади поверхности V/S.

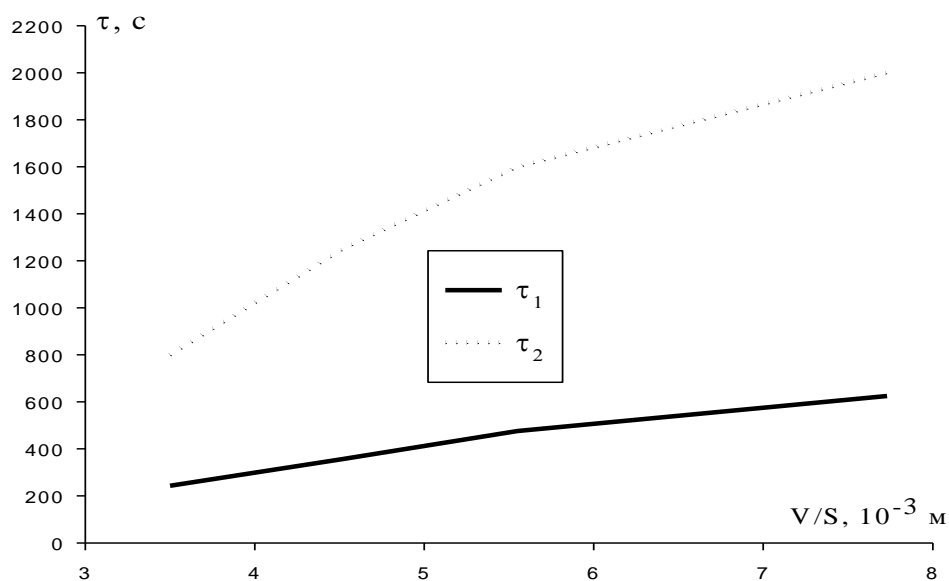


Рис. 4.44. Зависимости характерных времён охлаждения от величины V/S для образцов стали 45 разного диаметра.

Как видно из рисунка, с увеличением  $V/S$  характерные времена охлаждения растут. Такие же закономерности были найдены в работах [62-73] для алюминиевых образцов разной марки и размера.

На рис. 4.45 - 4.49 в качестве примера приведены температурные зависимости скорости охлаждения образцов стали 45 разного диаметра.

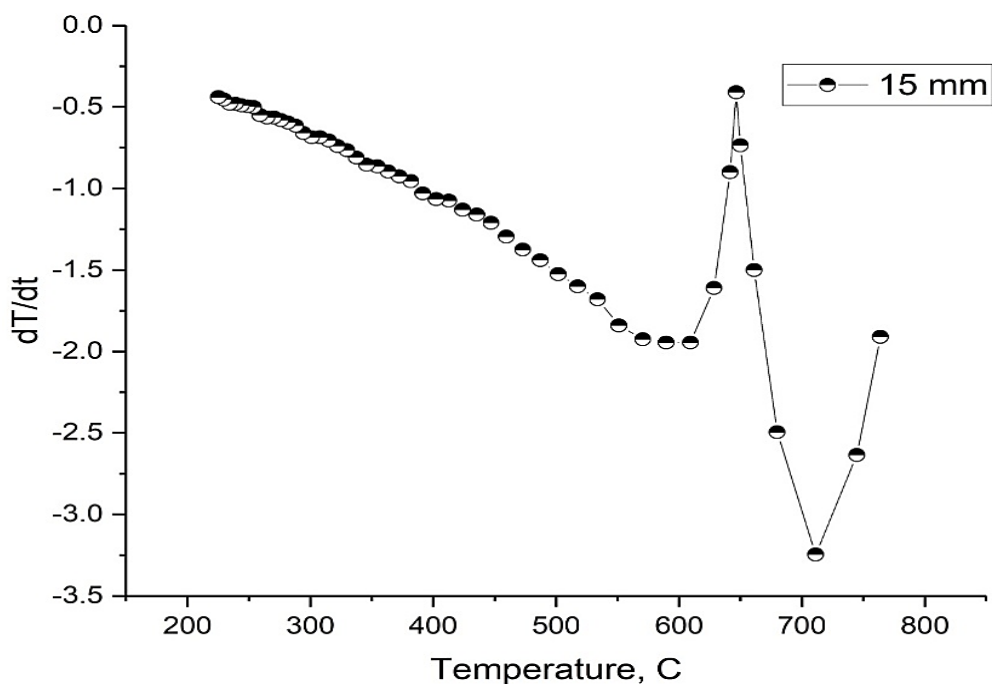


Рисунок 4.45. Температурная зависимость скорости охлаждения образцов стали 45 диаметром 15 мм.

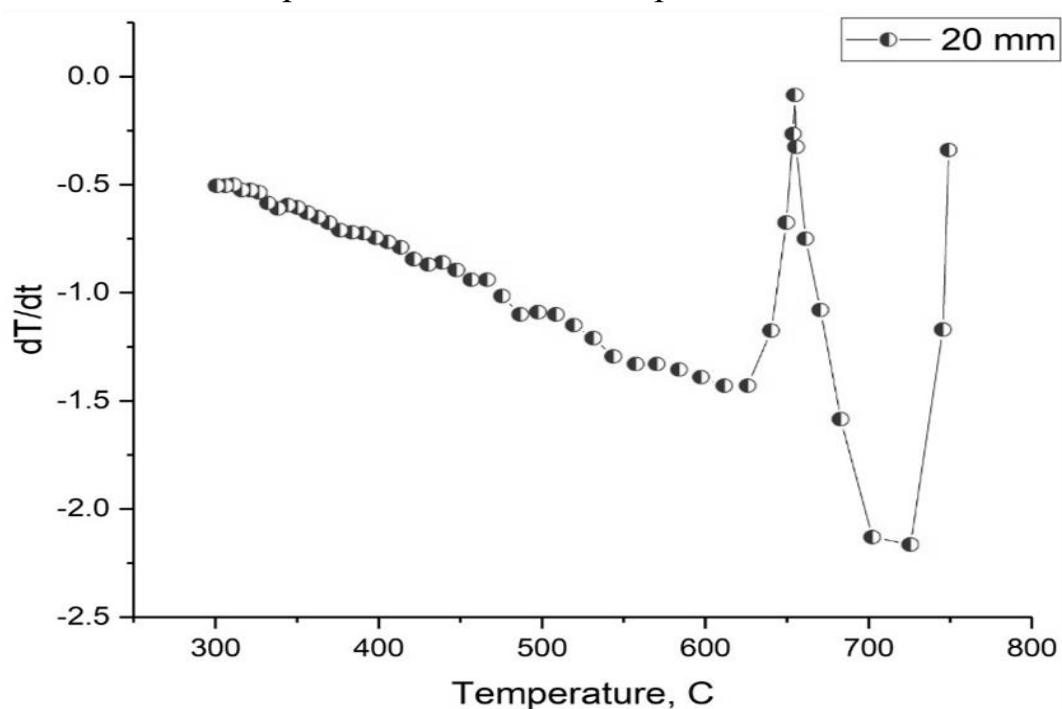


Рисунок 4.46. Температурная зависимость скорости охлаждения образцов стали 45 диаметром 20 мм.

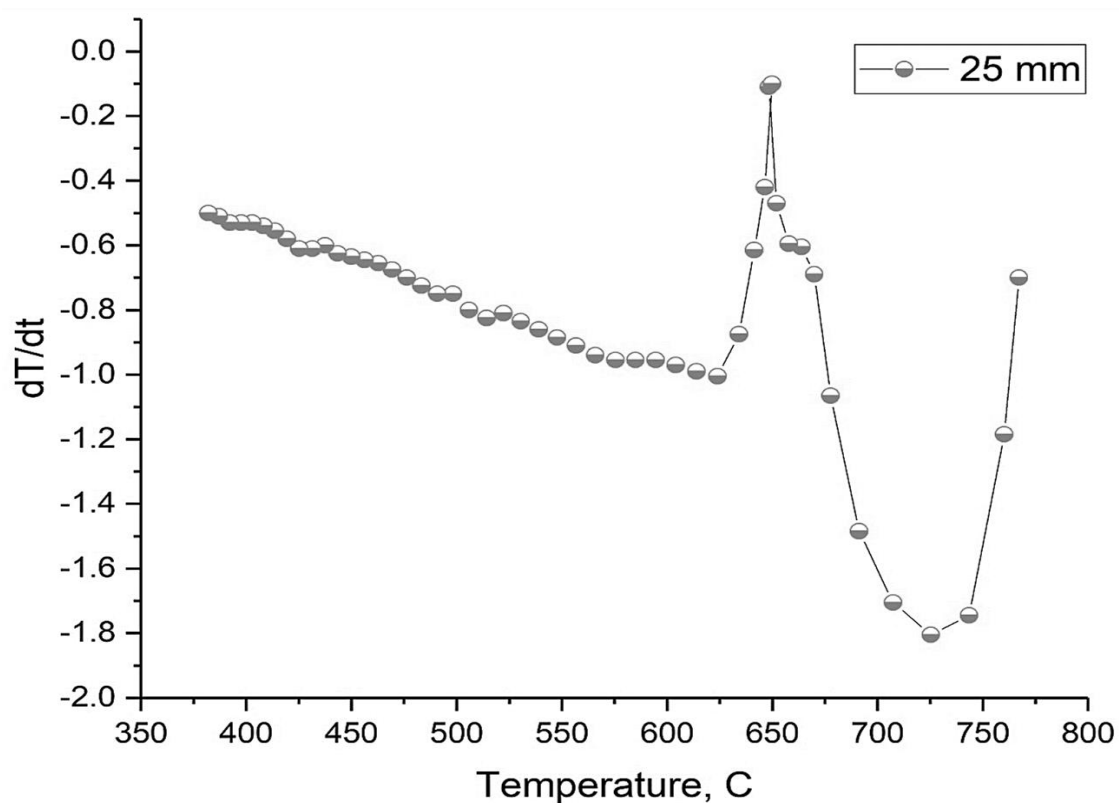


Рисунок 4.47. Температурная зависимость скорости охлаждения образцов стали 45 диаметром 25 мм.

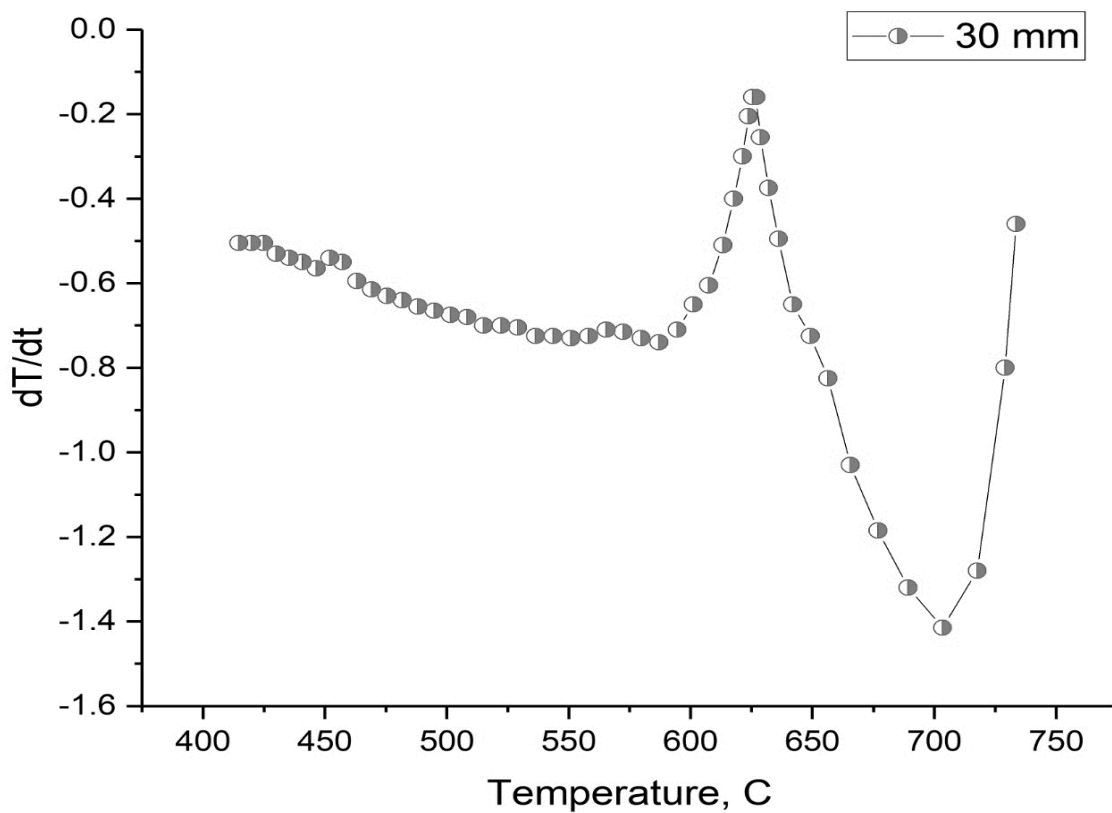


Рисунок 4.48. Температурная зависимость скорости охлаждения образцов стали 45 диаметром 30 мм.

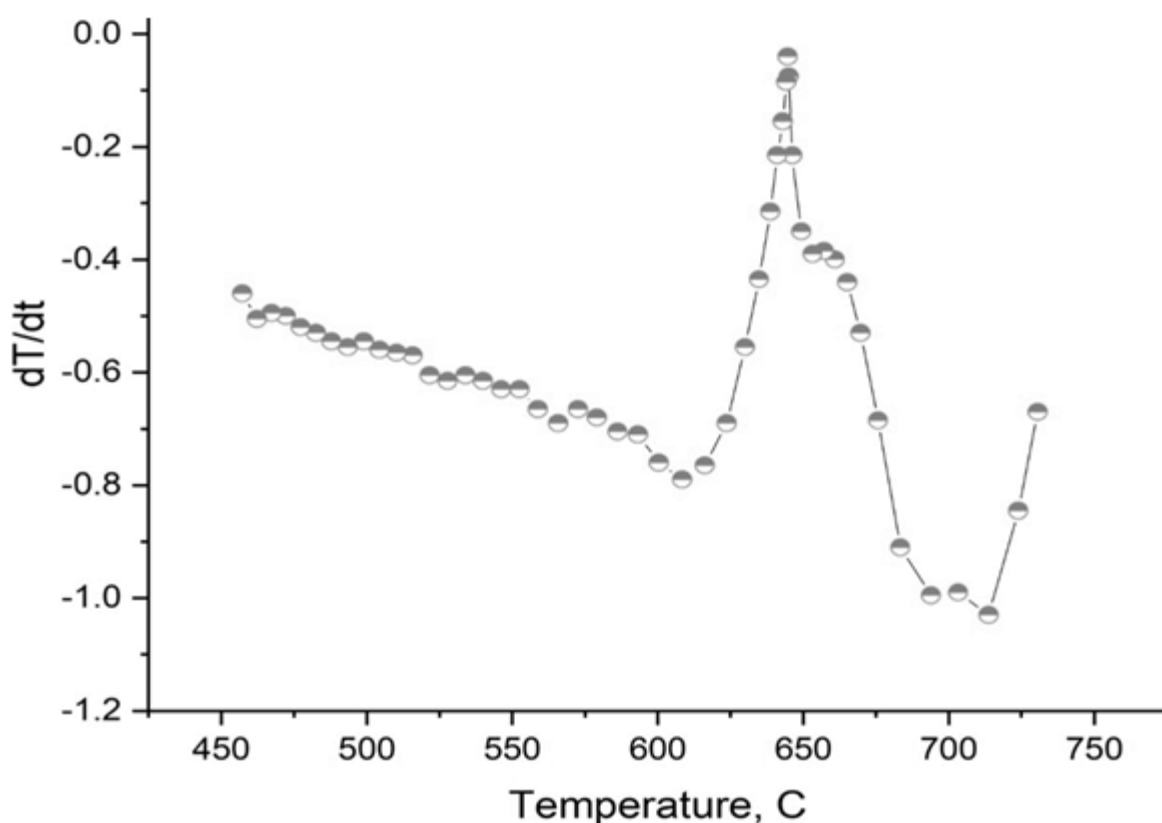


Рисунок 4.49. Температурная зависимость скорости охлаждения образцов стали 45 диаметром 37 мм.

Из приведенных рисунков видно, что фазовый переход в стали 45 начинается примерно при температуре 940 К и заканчивается при 900 К.

Sigma Plot-обработкой экспериментальных данных авторов [167 -170] по температурной зависимости удельной теплоемкости стали 45 до области фазового перехода нами получена формула

$$C(T - 300) = 456,67 + 21x, \quad (4.8)$$

где  $x = (T - 300)/100$ .

Используя вычисленные значения температурной зависимости теплоемкости по формуле (4.8) и экспериментальные значения скорости охлаждения, коэффициент конвективной теплоотдачи вычислили по формуле

$$\alpha(T) = \frac{\rho V C(T) \left( -\frac{dT}{d\tau} \right)}{S(T - T_0)} \quad (4.9)$$

где  $T_0$ - температура окружающей среды. Плотность образцов принята равной  $\rho = 7826 \text{ кг/м}^3$ .

Для вычисления коэффициента излучательной теплоотдачи использовали формулу (3.22). На рис. 4.50 и 4.51 в качестве примера приведены температурные зависимости коэффициентов излучательной  $\alpha_1$  и конвективной  $\alpha_2$  теплоотдач.

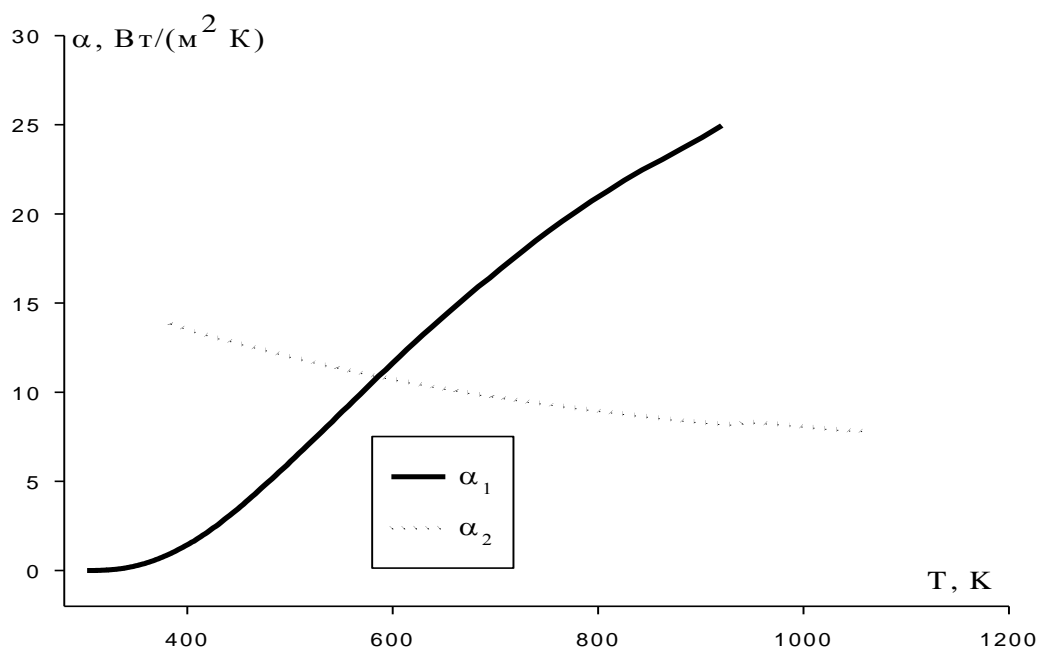


Рисунок 4.50. Температурная зависимость коэффициентов излучательной  $\alpha_1$  и конвективной  $\alpha_2$  теплоотдач цилиндрической стали диаметром 1,5 см.

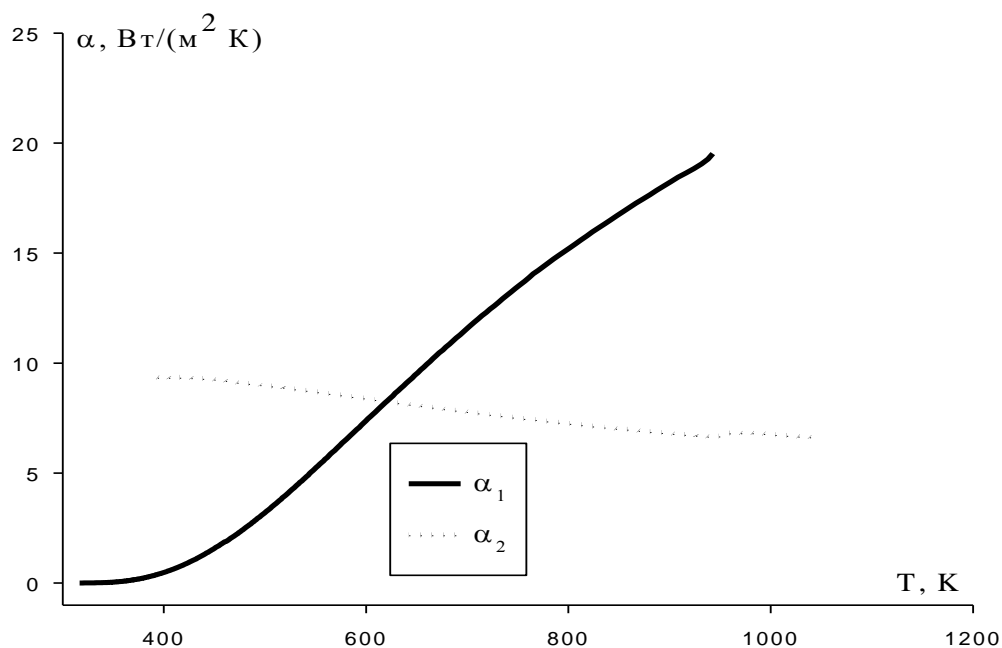


Рисунок 4.51. Температурные зависимости коэффициентов излучательной  $\alpha_1$  и конвективной  $\alpha_2$  теплоотдач цилиндрической стали диаметром 3,7 см.



Как видно из рисунков, с повышением температуры коэффициент конвективной теплоотдачи уменьшается, а коэффициент излучательной теплоотдачи растет. На рис. 4.52 приведены температурные зависимости коэффициента излучательной теплоотдачи для образцов с диаметрами 1,5 см и 3,7 см.

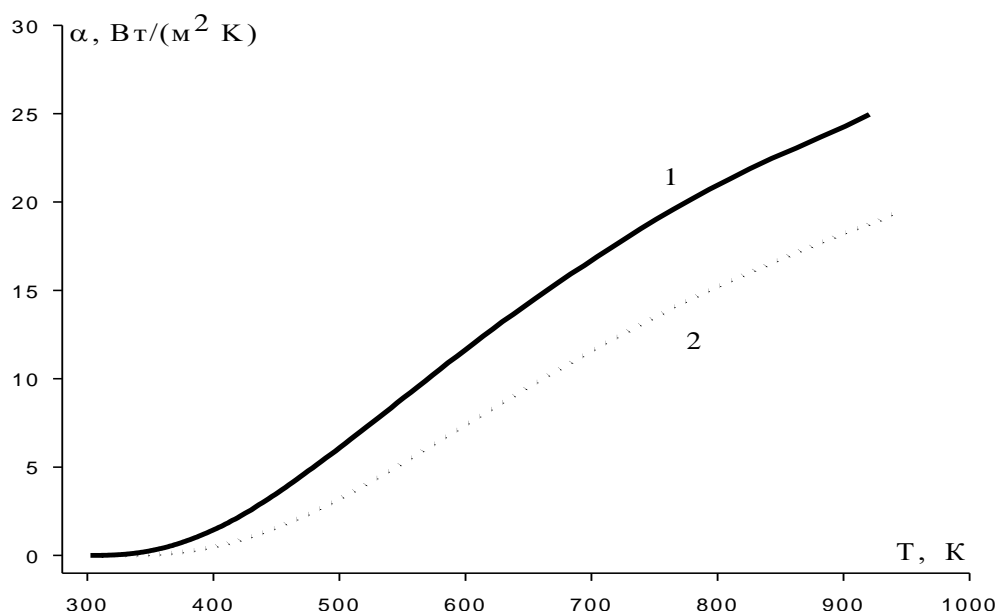


Рисунок 4.52. Температурные зависимости коэффициента излучательной теплоотдачи для цилиндрических сталей 45 диаметром 1,5 см (1) и 3,7 см (2).

Как видно из рис. 4.52, с ростом диаметра цилиндра коэффициент излучательной теплоотдачи уменьшается, поэтому зависимость характерного времени охлаждения  $\tau_i$  от величины  $V/S$  нелинейная. Она согласуется с экспериментальными данными авторов [62-64] для образцов из алюминия разного марки формы цилиндра и сферы.

Температурная зависимость удельной теплоемкости очень чувствительна к фазовым переходам. В таблице 4.5 представлена зависящая от температуры удельная теплоемкость стали 45, основанная на данных из [170].

Таблица 4.5

Температурная зависимость удельной теплоемкости стали 45

Т, К	373	473	573	673	773	873	973	1073	1173
С, Дж/ (кг К)	473	494	515	536	583	578	611	720	708

На рис. 4.53 приведены экспериментальные и вычисленные с помощью уравнения  $C = 394,67 + 0,21 T$  температурные зависимости удельной теплоемкости стали 45, где в интервале температуры от 373 К до 1173 К наблюдаются две области фазового перехода первого рода.

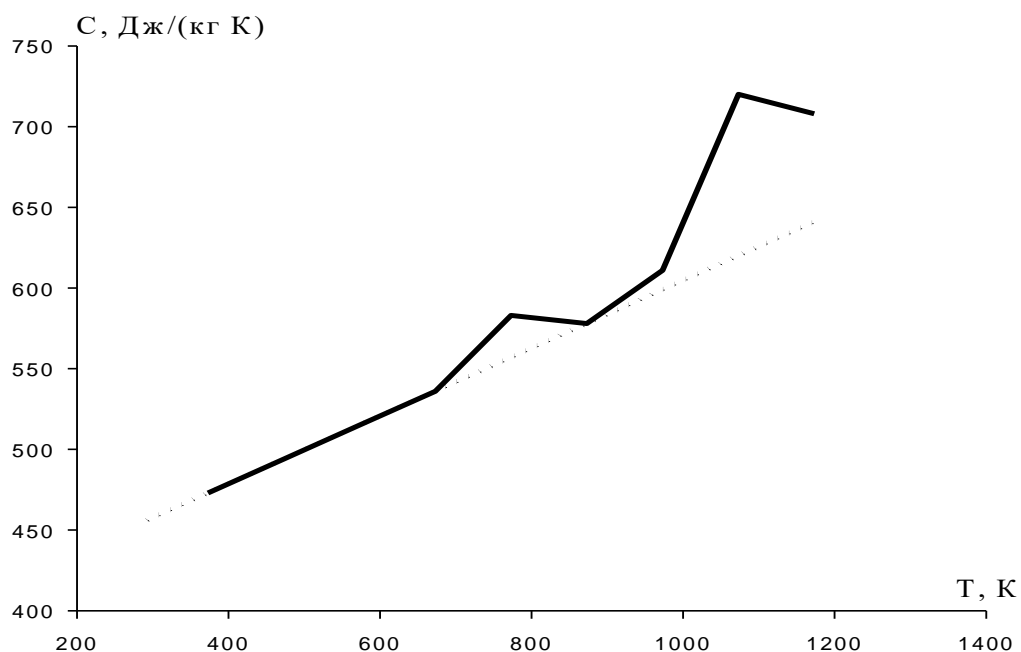


Рис. 4.53. Экспериментальные (···) и численные (---) температурные зависимости удельной теплоемкости стали 45.

Все стальные сплавы с 0,02 до 2,14% углерода при 1000 К претерпевают эвтектоидное превращение. В сплавах с 0,02 до 0,8% углерода перед этим происходит выделение  $\alpha$ -фазы из  $\gamma$ -фазы. Ниже 773 К в равновесном состоянии все сплавы железа с углеродом имеют две фазы:  $\alpha$  и  $Fe_3C$  [171]. Полученные нами результаты показывают, что происходит перегиб на зависимости температуры образца от времени охлаждения, что свидетельствует о фазовом переходе первого рода в стали 45. Согласно работам [171-173], наблюдается фазовый переход только в сплавах с углеродом при 926,2 К и оно связано с эвтектоидной реакцией  $\gamma \leftrightarrow \alpha + Fe_3C$  или с переходом  $\gamma \leftrightarrow \alpha$ . Если сравнить с зависимостью теплоемкости от температуры при 1000 К, то теплоемкость начинает увеличиваться. Температурная зависимость теплоемкости и кривой охлаждения указывают на фазовый переход первого рода в стали 45.

Результаты исследований показывают, что образцы стали 45 охлаждаются радиационно- конвективной теплоотдачей, при высоких температурах в основном за счет теплового излучения, а при низких температурах - за счет конвекции. Характерные времена охлаждения зависят от геометрических размеров образца и его коэффициента теплоотдачи. С увеличением отношения объема цилиндра к его площади поверхности характерные времена охлаждения нелинейно растут. Наблюден изгиб на кривой охлаждения, связанный с фазовым переходом первого рода для всех исследованных образцов. На кривых зависимости скорости охлаждения от температуры для образцов разного диаметра более явно выражен фазовый переход, где он начинается при температуре 940 К и заканчивается при 900 К. Предположено, что он связан с эвтектоидной реакцией  $\gamma \leftrightarrow \alpha + Fe_3C$  или с переходом  $\gamma \leftrightarrow \alpha$ . Используя вычисленные значения температурной зависимости теплоемкости и экспериментально полученные значения скорости охлаждения, вычислены коэффициенты конвективной и излучательной теплоотдачи. Установлено, что с повышением температуры коэффициент конвективной теплоотдачи слабо уменьшается, а коэффициент излучательной теплоотдачи растет, с ростом диаметра цилиндра коэффициенты теплоотдачи уменьшаются. При высоких температурах образец охлаждается за счет излучения, а при низких - за счет конвекции.

На примере образцах стали 45 показана возможность обнаружения и исследования фазового перехода первого рода в образцах стали 45 методом охлаждения. Сравнение с температурной зависимостью удельной теплоемкости стали 45 показало удовлетворительное совпадение области фазового перехода.

Результаты данного раздела опубликованы в работе [174].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана уникальная экспериментальная установка, позволяющая исследовать кинетику охлаждения металлов синхронно в трёх пространственных направлениях. Для чего используются три термопары, фиксирующие изменение температуры в реальном времени, а компьютерная обработка данных делает картину охлаждения наглядной и точной. Ярким преимуществом установки и прилагаемой к ней методики регистрации кинетики охлаждения объектов исследования является простота техники эксперимента, высокая точность получаемых результатов и малая затрата времени на проведение опытов.

2. Методом охлаждения проведено исследование равномерности температурного поля в металлических образцах различной формы. Показано, что для оценки однородности распределения температуры металлических тел достаточно рассчитать число Био, которое характеризует соотношение между внутренним и поверхностным теплообменом. Анализ полученных данных выявил, что температурный градиент внутри образцов практически отсутствует, что свидетельствует о высокой однородности теплового поля. Для аналитического описания процесса охлаждения целесообразно использовать не дифференциальное уравнение теплопроводности Фурье, а балансовое уравнение тепла.

3. Установлено, что при естественном воздушном охлаждении основным механизмом является конвективно-излучательная теплоотдача, а зависимости  $\frac{\Delta T_i}{(\Delta T_i)_{\tau=0}}$  и  $\ln \frac{\Delta T_i}{(\Delta T_i)_{\tau=0}}$  от  $N = \frac{\tau}{\tau_i}$  имеют общий характер для охлаждения излучением, теплопроводностью и конвекцией. Используя экспериментальные значения характерных времён охлаждения и начальную, температура тела, по этой зависимости можно определить его температуру в любой момент времени или промежуток времени, по завершению которого достигается требуемая температура.

4. Ключевым фактором, определяющим скорость охлаждения, является так называемый приведённый размер - отношение объёма тела к его площади поверхности, через которую происходит теплообмен. Чем больше этот размер, тем медленнее охлаждается объект. Кроме того, для разных форм тел, например, параллелепипеда или цилиндра, приведённый размер будет различным, что наглядно показывает, как форма тела влияет на скорость его охлаждения.

5. Установлено, что коэффициенты теплоотдачи образцов зависят от их температуры, геометрических размеров и теплофизических свойств окружающей среды. С увеличением температуры наблюдается рост коэффициентов излучательной и кондуктивной теплоотдач, в то время как коэффициент конвективной теплоотдачи, наоборот, уменьшается. Сравнение коэффициентов теплоотдачи образцов разного размера показывает, что в пределах погрешности эксперимента они слабо зависят от длины и значительно уменьшаются при увеличении диаметра образца.

6. Показана возможность определения температуры фазовых переходов в образцах стали 45 методом охлаждения. Сравнение с температурной зависимостью удельной теплоемкости стали 45 показало удовлетворительное совпадение области фазового перехода. На основе результатов эксперимента предполагается, что наблюдаемый фазовый переход связан с эвтектоидной реакцией  $\gamma \leftrightarrow \alpha + Fe_3C$  или с переходом  $\gamma \leftrightarrow \alpha$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. Чечулин, Б.Б. Масштабный фактор и статистическая природа прочности металлов [Текст] / Чечулин Б.Б. - М.: Металлургия, 1963. - 152 с.
2. Сухонос, С.И. Масштабный эффект - неразгаданная угроза [Текст] / Сухонос С.И. - М.: Новый Центр, 2001. - 68 с.
3. Матюнин, В.М. Общие закономерности проявления масштабного фактора при определении прочности и твердости металла [Текст] / Матюнин В.М., Дубов А.А., Марченков А.Ю. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. -2010. -Том 76. №8. -С.43-47.
4. Sahin, O. Dynamic hardness and reduced modulus determination on the (001) face of p-Sn single crystals by a depth sensing indentation technique [Text] / Sahin O., Uzun O., Kolemen U., Uyar, N. // Journal of Physics: Condensed Matter. - 2007. Vol. 19. Issue 30. - Article No. 306001.
5. McElhaney, K. Determination of indenter tip geometry and indentation contact area for depth-sensing indentation experiments [Text] / McElhaney K., Vlassak J., Nix W. // Journal of Materials Research. - 1998. - Vol. 13. - pp. 1300-1306.
6. Локализация пластической деформации и неравновесные структурно-деформационные превращения [Текст] - Избранные труды профессора А.А. Преснякова - Алматы, 2004. - 271 с. ISBN 9965-730-15-6 Л
7. Пресняков, А.А. Локализация пластической деформации [Текст]/А.А. Пресняков. – М.: Машиностроение, 1988. – 56 с.
8. Кузьмин, С.А. Влияние масштабного фактора на развитие сверхпластичности алюминия [Текст] / С.А. Кузьмин, В.А. Лихачев, К.Х. Никонов // Известия вузов. Цветная металлургия, 1980. - №6. -С. 67-70.
9. Черноглазова, Т.В. Прогнозирование эксплуатационных свойств изделий из хрупких и пластичных материалов на основе масштабного эффекта [Текст] / Т.В. Черноглазова, Н.Н. Мофа, М.Б. Исмаилов. – Алма - Ата: КазНИ-ИНТИ, 1991. -С.15-39.
10. Джанбусинов, Е.А. Влияние температуры на проявление масштабного эффекта у пластичных материалов [Текст] / Джанбусинов Е.А., Черноглазова

Т.В., Мофа Н.Н. // Сб. научных трудов «Материаловедение конструкционных материалов сельскохозяйственных машин». - Алма-Ата, 1986. -С.62 – 66.

11. Черноглазова, Т.В. Влияние размеров образцов на показатели прочности бескислородной меди [Текст] / Черноглазова Т.В., Пресняков А.А., Мофа Н.Н. // Проблемы прочности, 1984. - №9. -С.64-67.

12. Гарбер, Р.Н. О масштабном факторе в поликристаллических нитях меди [Текст] / Р.Н. Гарбер // В кн.: Нитевидные кристаллы и тонкие пленки. - Воронеж: Воронежский политехн. ин-т, 1975.- Ч. 1. -С.262-264.

13. Механические свойства алюминиевых сплавов: монография [Текст] / Н. А. Грищенко, С. Б. Сидельников, И. Ю. Губанов [и др.]. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2012. – 196 с. ISBN 978-5-7638-2653-1

14. Пресняков, А.А. Современные представления о локализации пластической деформации [Текст] / А.А. Пресняков // В кн.: Локализация пластической деформации. - Алма-Ата: Наука, 1981. -С.5-11.

15. Пресняков А.А. О физической природе локализации пластической деформации [Текст] / А.А. Пресняков // В кн.: Локализация пластической деформации, Алма-Ата: Наука, 1981. -С.102-109.

16. Фридман, В.М. О влиянии масштабного фактора на прочность твердых сплавов [Текст] / В.М. Фридман, Н.И. Щербань// Проблемы прочности 1980. - №11 - С. 111-114.

17. Механика материалов. Методы и средства экспериментальных исследований: учебное пособие [Текст] / В.Э. Вильдеман [и др.]; под ред. В.Э. Вильдемана. - Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2011. - 165 с. - ISBN 978-5-398-00652-0

18. Писаренко, Г.С. Экспериментальные методы в механике деформируемого твердого тела [Текст] / Г.С. Писаренко, В.А. Стрижало. - Киев: Наукова думка, 1986. - 264 с.

19. Писаренко, Г. С. Экспериментальные методы в механике деформируемого твердого тела: монография [Текст] / Г. С. Писаренко, В. А. Стрижало /

НАН Украины. Ин-т проблем прочности им. Г. С. Писаренко; ред. В. В. Вероцкая. – Киев: Наукова думка, 2018. – 429 с.

20. Писаренко, Г.С. Избранные труды [Текст] / Г. С. Писаренко / Отв. ред. В.Т. Трощенко. - Киев: Наук. думка, 2010. - 728 с.

21. Pavelko, V Model of the influencing of sizes on fatigue life of sheet details from an aluminum alloy [Text] / V. Pavelko, J. Timoshchenko // Transport and Telecommunication. -Vol. 4, N 2, 2003. -P.49-56.

22. Голынец, С.А. Оценка влияния размеров образцов на механические свойства при растяжении жаропрочных титановых и никелевых сплавов [Текст] / С.А. Голынец, М.А. Горбовец, В.А. Каранов // Труды ВИАМ. Технологии материалов. 2018, № 2(63). – С.86-94. DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-3-86-94

23. Супрун, В. И. Влияние масштабного фактора на прочность горных пород [Текст]/ В.И. Супрун, Я.В. Левченко, А.С. Колотовкин, К.С. Ворошилин. - Горный информационно- аналитический бюллетень. – 2023. – № 10. –С.5–19. DOI: 10.25018/0236. 1493.2023. 10.0.5.

24. Молчанов, Л.Н. Влияние длины надрезанного образца на долговечность стали при повторном ударном изгибе [Текст] / Л.Н. Молчанов // Проблемы прочности, 1981, № .6, -С.93-96.

25. Кузьмин, С.А. Влияние масштабного фактора на развитие сверхпластичности алюминия [Текст] / С.А. Кузьмин, В.А. Лихачев, К.Х. Никонов. - Известия вузов. Цветная металлургия, 1980, №6. -С.67-70.

26. Мофа Н.Н. Локализация пластической деформации алюминия и некоторых его сплавов [Текст] /Н.Н. Мофа: Автореферат диссертации. М., 1983. - 23 с.

27. Зуев, Л.Б. Физика макролокализации пластического течения [Текст] / Л.Б. Зуев, В.И. Данилов, С.А. Баранникова. - Новосибирск: Наука, 2008. - 327с.

28. Зуев, Л.Б. Физика неоднородного пластического течения [Текст] /Л.Б. Зуев, Ю.А. Хон, В.В. Горбатенко. - М.: Физматлит, 2024. - 320 с.



29. Zuev, L.B. The Features of Localized Plasticity Autowaves in Solids [Text] /L.B. Zuev, S.A. Barannikova, O.A. Maslova // Materials Research. 2019. Vol. 22. No 4. P. 104–123. DOI: 10.1590/1980- 5373-mp-2018-0694.
30. Баранникова С.А., Исследование разномасштабных характеристик процессов пластической деформации в алюминии [Текст] / С.А. Баранникова, С.В. Колосов, П.В. Исхакова // Известия Алтайского государственного университета. 2025. № 1 (141). С. 11–20. DOI: 10.14258 /izvasu (2025)1-01.
31. Сиделёв А. А., Моделирование закономерностей проявления масштабного эффекта при динамическом нагружении образцов простейших конфигураций [Текст] / А.А. Сиделёв, В.Н. Белов. - Инженерный журнал: наука и инновации, 2013, вып. 12. -С.1-10. URL: <http://engjournal.ru/catalog/appmath/hidden71160.html>
32. Белов В.Н. Стохастические модели временных процессов в разных областях науки и техники [Текст]/ В.Н. Белов. - Волгоград, Политехник, 2002.- 216 с.
33. Койфман М.Л. Главный масштабный эффект в горных породах и углях [Текст] / М.Л. Койфман - В кн.: Проблемы механизации горных работ. М., АН СССР, 1963.- С.39-56.
34. Койфман МЛ. О влиянии размеров на прочность образцов горных пород [Текст] / М.Л. Койфман. - В кн.: Исследование физико-механических свойств горных пород применительно к задачам управления горным давлением. М.: АН СССР, 1962. -С.6-14.
35. Протодяконов М.М., Койфман МЛ. О проявлении масштабного эффекта в горных породах и углях [Текст] /М.М. Протодяконов, М.Л. Койфман - Труды совещания международного бюро по механике горных пород при Германской Академии наук. Лейпциг, 1963.
36. Шашенко, А.Н. Масштабный эффект в горных породах [Текст] / А.Н. Шашенко, Е.А. Сдвижкова, С.В. Кужель. - Донецк, Норд-Пресс, 2004. - 126 с.
37. Шабуневич В.И. О масштабном эффекте исследуемых объектов [Текст] / В.И. Шабуневич. - Тр. НПП ВНИИЭМ, 2010, т. 116, № 3.-С.13-16.

38. Черноглазова Т. В. Роль локализации деформации в масштабном эффекте у меди и ее сплавов [Текст] / Т.В. Черноглазова. Автореф. к. физ.-мат. наук, ЛПИ, 1989. – 23 с.
39. Райхель А.М., Непомнящий С.А., Шведун В.Г. К вопросу о влиянии масштабного фактора на прочность сталлов [Текст] / А.М. Райхель, С.А. Непомнящий, В.Г. Шведун - Проблемы прочности, 1986, № 10. -С.43-46.
40. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года [Текст] / Е.Н. Каблов. - Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. - С. 7-17.
41. Антипов В.В. Перспективы развития алюминиевых, магниевых и титановых сплавов для изделий авиационно-космической техники [Текст] / В.В. Антипов. - Авиационные материалы и технологии. 2017. №5. -С.186-194. DOI: 10.18577 /2071-9140-2017-0-S-186-194.
42. Андреев, В.А. Актуальные проблемы прочности [Текст] / В.А. Андреев, В.М. Асташинский, В.Е. Бабич и др. - Минск: ИВЦ Минфина, 2024. - 470 с.
43. Экспериментальные исследования свойств материалов при сложных термомеханических воздействиях [Текст] /Под ред. В.Э. Вильдемана. - М.: Физматлит, 2012 - 204 с.
44. Meyers, M.A. Mechanical properties of nanocrystalline materials [Text] / Meyers M.A., Mishra A., Benson D.J. / Progress in Materials Science. - 2006. - Vol. 51. Issue 6.-pp. 427-556.
45. Братухин, А.Г. Конструкционные и функциональные материалы современного авиастроения [Текст] / Братухин А.Г., Погосян М.А., Тарасенко Л.В., Суков В.И. - М.: Издательство МАИ, 2007. - 304 с.
46. Черноглазова Т.В., Мофа Н.Н., Влияние температуры на масштабную зависимость прочности меди и латуней [Текст] /Т.В. Черноглазова, Н.Н. Мофа. - Проблемы прочности, 1990, № 11. -С.104 -109.
47. Томенко Ю.С. Влияние формы и размеров образцов на характеристики механических свойств стали [Текст] /Ю.С. Томенко. - Заводская лаборатория, 1979, № 4. -С.360-369.

48. Ламашевский, В.П. Экспериментальное исследование эффектов масштаба и формы тела на закономерности деформирования и разрушения структурно-неоднородных материалов [Текст] / В.П. Ламашевский, А.А. Лебедев. - Проблемы прочности, 1982, № 9. -С.68-72.
49. Фридман, В.М. О влиянии масштабного фактора на прочность твердых сплавов [Текст] / В.М. Фридман, Н.И. Шербань. - Проблемы прочности, 1980, № 11. -С.111-113.
50. Сосновский Л.А. Влияние длины образцов на предельные напряжения при растяжении сталей [Текст] / Л.А. Сосновский. - Проблемы прочности, 1976, № 4. -С.30- 33.
51. Черноглазова, Т.В. Влияние размера образцов на показатели прочности бескислородной меди [Текст] / Т.В. Черноглазова, Н.Н. Мофа. - Проблемы прочности, 1984, N 9. -С.64-67.
52. Банных, С.А. Роль масштабного фактора при сверхпластической деформации [Текст] / С.А. Банных, В.М. Лещинский, О.Б. Чуланов и др. - Пластичность металлов и сплавов с особыми свойствами. 1982. -С.18-23.
53. Кузьмин, С.А. Влияние масштабного фактора на развитие сверхпластичности алюминия А7 [Текст] / С.А. Кузьмин, В.А. Лихачев, К.Х. Никонов. - Известия вузов. Цветная металлургия, 1980, №6. -С.67-70.
54. Мирзоев, Ф.М. Теплофизические свойства алюминия различной степени чистоты и сплавов системы Al-Si [Текст] / Ф.М. Мирзоев, З. Низомов, М.Б. Акрамов. - Душанбе: Сино, 2020. - 105 с.
55. Nizomov, Z. Thermophysical properties of aluminum of different purity [Текст] / Z. Nizomov, F.M. Mirzoev // Scientific research of the SCO countries: synergy and integration- International Conference. - Beijing, China, 2019. -P.213-223.
56. Низомов, З. Исследование температурной зависимости удельной теплоемкости алюминия марки ОСЧ и А7 [Текст] / З. Низомов, Б. Н. Гулов, И. Н. Ганиев, Р. Х. Саидов, Ф.У. Обидов, Б. Б. Эшов // Доклады Академии наук Республики Таджикистан, 2011. - Т.54. - №1. -С.53 - 59.

57. Низомов, З. Температурная зависимость теплофизических свойств алюминия марки А5 [Текст] / З. Низомов, Р.Х. Саидов, Ф.М. Мирзоев, М.Б. Акрамов // Доклады Академии наук Республики Таджикистан, 2014. - Т. 57. - № 2. -С.140-144.
58. Низомов, З. Теплостойкость алюминия высокой чистоты и его сплавов [Текст] / З. Низомов, Р.Х. Саидов, Б.Н. Гулов. - LAMBERT Academic Publishing, 2012. - 96 с.
59. Низомов, З. Термодинамические свойства цинк-алюминиевых сплавов легированных РЗМ [Текст]/ З. Низомов, Р.Х. Саидов, Дж.Г. Шарипов. - LAP LAMBERT Academic Publishing RU, 2018.-137 с.
60. Авезов, З.И. Теплофизические свойства цинк-алюминиевых сплавов (Zn5Al, Zn55Al) с элементами II А группы [Текст] / З.И. Авезов, Р.Х. Саидзода, З. Низомов. - Душанбе: Сино, 2020. - 138 с.
61. Иброхимов, Н.Ф. Теплофизические свойства сплава АМг2 с редкоземельными металлами [Текст] / Н.Ф. Иброхимов, И.Н. Ганиев, З. Низомов. - LAP LAMBERT Academic Publishing RU, 2014. - 86 с.
62. Низомов, З. Влияния размера и формы, алюминиевых образцов различных марок, на кинетику их охлаждения и процессов теплоотдачи [Текст] /З. Низомов, И.Т. Турахасанов, Р.Х. Саидзода. – Душанбе: Сино, 2025. – 170 с. ISBN 978-99985-226-0-2.
63. Низомов, З. Влияние размера образцов из алюминия на кинетику их охлаждения и процессов теплоотдачи [Текст] / З. Низомов, И.Т. Турахасанов, М.Р. Файзиева // Вестник Таджикского национального университета. Серия естественных наук, 2022.-№1.-С.165-177.
64. Низомов, З. Влияние диаметра цилиндрических образцов из алюминия различных марок на кинетику охлаждения [Текст] / З. Низомов, И.Т. Турахасанов, Р.Х. Саидзода // Вестник Таджикского национального университета. Серия естественных наук, 2024.-№1. -С.88-99.
65. Турахасанов, И.Т. Влияние размера цилиндрических образцов из алюминия марки А5 на время и скорость охлаждения [Текст] / И.Т. Турахасанов

// Ученые записки Худжандского государственного университета им. академика Б. Гафурова. Серия естественных наук, 2022.- №1(60). - .14-19.

66. Turakhasanov, I.T. Effect of A5N Cylindrical Aluminum Specimens on the Cooling Kinetics [Text] / I.T. Turakhasanov, Z. Nizomov, D. Nematov // Trends in sciences, 2022; 19(24):3536. Веб-сайт: <https://www.preprints.org /manuscript /202211.0390/v1>. - <https://doi.org/10.48048 tis.2022.3536>. -P.1-11.

67. Nizomov, Z. Influence of the diameter of cylindrical samples made of different grades of aluminum on the cooling kinetics [Text] /Z. Nizomov, I.T. Turakhasanov, R. Kh. Saidzoda // Bulletin of the Tajik national university. Series of natural sciences/ 2024. No.1. <https://doi.org /10.62965 /tnu.sns.2024.1.8>, -P.69-77.

68. Nizomov, Z. [Effect of Size on Cooling Kinetics of Spherical Samples from Different Grades of Aluminum \[Text\]](#) / Z Nizomov, I.T. Turakhasanov, R. Kh. Saidzoda, D Nematov // Engineering Science & Technology – 4117.-V.512. -P.418-426. 2024-04-30, <https://doi.org/ 10.37256/ est.5220244117>.

69. Турахасанов, И.Т. Влияние размера цилиндрических образцов из алюминия марки А6 на времени и скорости охлаждения [Текст] / И.Т. Турахасанов, З. Низомов, М.Б. Акрамов, Ш.С. Содатдинов // Вестник технического колледжа, 2022.- № 1(1). -С.46-52.

70. Низомов З. Влияния размера образцов алюминия на коэффициент конвективной теплоотдачи [Текст] /З. Низомов – Сборник статей Международной научной конференции «Развитие новых направлений в науке: современное состояние и перспективы», посвящ. 20-летию основания НИИ ТНУ. – Душанбе: «Типография ТНУ». –С.45-49.

71. Турахасанов, И.Т. Исследование кинетики охлаждения сферических образцов из алюминия марки А5 [Текст] / И.Т. Турахасанов, З. Низомов, Р.Х. Саидзода. - Матер. VIII Межд. конф. «Современные проблемы физики». Душанбе, 2022. -С.206-209.

72. Турахасанов, И.Т. Зависимость кинетики охлаждения сферических образцов из алюминия марки А6 от их размера [Текст] / И.Т. Турахасанов, З. Низомов, С.И. Абдурахмонзода. - Матер. Межд. НПК “Новые достижения в

области естественных наук и информационных технологий”. - Душанбе, 2023. -С.67-70.

73. Низомов, З. Влияние величины диаметра сферических образцов из различных марок алюминия на кинетику их охлаждения [Текст] / З. Низомов, И.Т. Турахасанов, Р.Х. Саидзода. - Матер. Межд. науч. конф. «Современные проблемы физики конденсированного состояния». - Душанбе: Издательство ТНУ, 2023. -С.94-98.

74. Низомов, З. Вклад тепловое излучение в охлаждении алюминия марки А5N [Текст] / З. Низомов, Дж.Г. Шарипов, Б.Н. Гулов, И.Т. Турахасанов. - Матер. Межд. НПК «Роль химии и химической промышленности в ускоренной индустриализации страны». – Душанбе: Изд-во ТТУ им. акад. Осими М.С., 2024. –С.301-303.

75. Турахасанов, И.Т. Исследование кинетики охлаждения сферических образцов из алюминия марки АВ 98 [Текст] / И.Т. Турахасанов, З. Низомов, Ш.С. Содатдинов. - Матер. Симпозиума по естественным, точным и математическим наукам. - Душанбе. - 2022. - Т.3. -С.494-497.

76. Низомов, З. Влияние масштабного фактора на охлаждение образцов из алюминия [Текст] / З. Низомов, И.Т. Турахасанов. – Матер. Симпозиума физиков Таджикистана. - Душанбе: «Дониш», 2022. -С.111-114.

77. Nizomov, Z. Estimation of the contribution of heat radiation and convective heat exchange for aluminum of various degrees of purity with natural air heat discharge [Text]/ Z. Nizomov, F.M. Mirzoev, Z.I. Avezov, I.T. Turakhasanov. - International Scientific-practical journal. Endless light in science, 2022. -pp.131-140. DOI 10.24412/2709-1201-2022-1-29-38.

78. Turakhasanov, I.T. Effect of the size of AV 98 aluminum cylindrical specimens of the cooling kinetics [Text] / I.T. Turakhasanov, Z. Nizomov, Sh.S. Sodatdinov, F.M. Mirzoev. - “Science and technologies” IV International Scientific and Practical conference. Materials. Endless light in science, 2022. -pp.113-119. DOI - 10.24412/2709-1201-2022-123-129.

79. Давидзон, М. И. Конвективный теплообмен: линейная и нелинейная теории [Текст] / М.И. Давидзон. - М.: Издание книг ком, 2020. - 256 с.
80. Себиси, Т. Конвективный теплообмен. Физические основы и вычислительные методы [Текст] /Т. Себиси, П. Брэдшоу: Пер. с англ. под ред. проф. У.Г. Пирумова. - М.: Мир, 1987. - 592 с.
81. Крейт, Ф. Основы теплопередачи [Текст] / Ф. Крейт, У. Блэк: Пер. с англ.-М.: Мир, 1983. - 512 с.
82. Дульнев, Г.Н. Теория тепло- и массообмена [Текст] / Г.Н. Дульнев. – СПб.: НИУИТМО, 2012. – 195 с.
83. Михеев, М.А. Основы теплопередачи [Текст] / М.А. Михеев, И.М. Михеева. - М.: Бастет, 2010. - 342 с.
84. Князева, А.Г. Теплофизические основы современных высокотемпературных технологий [Текст] / А.Г. Князева. - Томск: Изд-во ТПУ, 2009. - 357 с.
85. Кутателадзе, С.С. Анализ подобия в термофизике [Текст] / С.С. Кутателадзе. - Изд-во «Наука», Сибирское отделение, 1982. - 280 с.
86. Соколов, А.Н. Методика расчета свободноконвективного теплообмена на твердых поверхностях в широком интервале температур [Текст] /А.Н. Соколов//Теплофизика и теоретическая теплотехника//Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, 2012, № 2 (78). - С.88-91.
87. Ткаченко, Л.А. Теория теплообмена: Учебное пособие [Текст] / Л.А. Ткаченко, А.В. Репина. Под общей ред. проф. Н.Ф. Кашапова. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2017. – 151 с.
88. Уонг, Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров: справочник [Текст] / пер. с англ. В.В. Яковлева и В.И. Колядина. - М.: Атомиздат, 1979.- 216 с.
89. Теплообмен: курс лекций [Текст] /М.С. Лобасова, К.А. Финников, Т.А. Миловидова и др. – Красноярск: ИПК СФУ, 2009.- 296 с.

90. Теория тепломассообмена: учебник для вузов [Текст] / [ С. Исаев и др.]; под ред . А. Леонтьева. - 3-е изд., испр . и оп. - Москва: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. – 462 с. ISBN 978-5-7038-4527-1
91. Исаченко, В.П. Теплопередача [Текст] / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – М.-Л.: Энергия, 1965. – 424 с.
92. Гебхарт, Б. Свободноконвективные течения, тепло- и массообмен. В 2-х книгах, кн. 1. Пер. с англ. [Текст] / Б. Гебхарт, Й. Джалурия, Р. Махаджан, Б. Саммакия – М.: Мир, 1991. – 678 с.
93. Shang, D-Y. Effect of variable thermophysical properties laminar free convection of gas [Text] / D-Y. Shang, B-X. Wang // Int. J. Heat Mass Transfer. – 1990. – V. 33. – № 7. –P.1387–1395.
94. Shang, D-Y. Effect of variable thermophysical properties laminar free convection of polyatomic gas [Text] / D-Y. Shang, B-X. Wang // Int. J. Heat Mass Transfer. – 1991. – V. 34. – № 3. –P.749–755.
95. Hernandez, J. Effects of variable properties and non-uniform heating on natural convection flows in vertical channels [Text] / J. Hernandez, B. Zamora // Int. J. Heat Mass Transfer. – 2005. – V. 48. –P.793–807.
96. Pozzi, A. Variable-property effects in free convection [Text] / A. Pozzi, M. Lupo // Int. J. Heat and Fluid Flow. – 1990. –V. 11. – № 2. –P.135–141.
97. Emery, A.F. The effects of property variations on natural convection in a square enclosure [Text] / A.F. Emery, J.W. Lee // J. Heat Transfer. – 1999. – V. 121. – № 1. –P.57–62.
98. Справочник по теплообменникам, т. 2 [Текст] / Пер. с англ. под ред. О.Г. Мартыненко и др. - М.: Энергоатомиздат, 1987.- 352 с.
99. Блох, А.Г. Основы теплообмена излучением [Текст] /А.Г. Блох. - М.-Л.: Госэнергоиздат, 1962. - 332 с.
100. Рубцов, Н.А. Теплообмен излучением в сплошных средах [Текст] / Н.А. Рубцов. - Новосибирск: Наука, 1984. - 277 с.
101. Излучательные свойства твердых материалов: справочник [Текст] / Под общ. ред. А.Е. Шейндлина. Энергия, 1974. - 472 с.



102. Спэрроу, Е.М. Теплообмен излучением [Текст] /Э.М. Спэрроу, Р.Д. Сесс / пер. с англ. С. З. Сориц и Л. М. Сорокопуда; под ред. А. Г. Блоха. - Ленинград: Энергия. Ленингр. отд-ние, 1971. - 294 с.
103. Теплообмен излучением: Справочник [Текст] / А.Г. Блох, Ю.А. Журавлев, Л.Н. Рыжков. - М.: Энергоатомиздат, 1991.- 432 с.
104. Heat Transfer Handbook [Текст] / A. Bejan, A. D. Kraus [editors]. – Hoboken, N.J.; [Chichester]: Wiley, 2003. – XIV, 1479 p.
105. Термодинамические свойства воздуха [Текст] / Сычев В. В., Вассерман А. А., Козлов А. Д., Спиридонов Г. А., Цымарный В. А. - ГСССД. Серия монографии. М.: Издательство стандартов, 1978. - 276 с.
106. Варгафтик, Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей [Текст] / Н.Б. Варгафтик. – М.: Наука, 1972. – 720 с.
107. Таблицы физических величин. Справочник [Текст] / Под ред. И.К. Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976. – 1008 с.
108. Розанов, Л.Н. Вакуумная техника [Текст] /Л.Н. Розанов. - М.: Высшая школа, 1990.-320 с.
109. Гусев, А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии [Текст] / А.И. Гусев. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. - 416 с.
110. Суздалев, И.В. Нанотехнология: физикохимия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов [Текст]/И.В. Суздалев. - М.: КомКнига, 2007. -592 с.
111. Дмитриев, А.С. Введение в нанотеплофизику [Текст] / А.С. Дмитриев. - М.: БИНОМ, 2019. - 790 с.
112. Zhang, Z.M. Nano/microscale heat transfer [Текст] / Z.M. Zhang // Springer Nature Switzerland AG, 2020. - 761 p.
113. Lepri, S. Thermal transport in low dimensions: from statistical physics to nanoscale heat transfer [Текст] / Lepri S. - Springer, 2016. - 407 p.
114. Chen Y.Y., Yao Y.D., Lin B.T. et al. Specific heat of fine copper particles [Text]/ Y.Y. Chen, Y.D. Yao, B.T. Lin et al.// Nanostruct. Matter. 1995.V.6. – P. 597-600.

115. Yao Y.D. Thermal and magnetic studies of nanocrystalline Ni [Text]/ Y.D. Yao, Y.Y. Chen, C.M. Hsu et al. // Nanostruct. Matter. 1995.V.6. – P. 933-936.
116. Trampenau J. Vibrational behavior of nanocrystalline Ni [Text]/ J. Trampenau, K. Bauszur, W. Petry, U. Herr // Nanostruct. Matter. 1995.V.6. – P. 551-554.
117. Sun N.X. Heat-capacity comparison among the nanocrystalline, amorphous, and coarse-grained polycrystalline states in element selenium [Text] /N.X. Sun, K. Lu// Phys. Rev. B54, 1996, 9, P. 6058-6061.DOI: <https://doi.org/10.1103>
118. Гафнер, Ю.Я. Возможные механизмы роста теплоемкости в наноструктурированных металлах [Текст] / Ю.Я. Гафнер, С.Л. Гафнер, И.С. Замулин, Л.В. Редель, В.М. Самсонов // Физика твердого тела, 2013. - Том 55. - Вып. 10. - С. 2026-2033.
119. Gafner, Y.Y. Analysis of the heat capacity of nanoclusters of FCC metals on the example of Al, Ni, Cu, Pd, and Au [Text] /Y.Y. Gafner, S.L. Gafner, I.S. Zamulin, L.V. Redel // The Physics of Metals Metallography, 2015. - 116 (6). -P. 568-575. DOI: 10.1134/S0031918X15040055
120. Гафнер, С.Л. Моделирование теплоемкости кластеров никеля и меди методом молекулярной динамики: влияние формы и размера / С.Л. Гафнер, Л.В. Редель, Ю.Я. Гафнер // ЖЭТФ. 2012. - Т. 141. - № 3. - Р. 488-501.
121. Родунер, Э. Размерные эффекты в наноматериалах [Текст] / Э. Родунер - М.: Техносфера, 2010. - 352 с.
122. Самсонов В.М. О проблеме теплоемкости нанокластеров и наноструктурированных материалов [Текст] / В.М. Самсонов//Вестник ТвГУ. Серия «Физика». 2011. Выпуск 14. – С. 4-13.
123. Журавлёв, Л.Г. Физические методы исследования металлов и сплавов: Уч. пособие [Текст] / Л.Г. Журавлёв, В.И. Филатов. - Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2004. -157 с.
124. Балабанов, П.В. Теоретические и практические аспекты измерения теплофизических свойств гетерогенных материалов: монография. [Текст] / П.В. Балабанов, А.П. Савенков. - Тамбов, 2016. – 188 с.
125. Мищенко, С. В. Метод и измерительное устройство для определения

теплофизических свойств материалов с использованием регулярного режима [Текст] / С. В. Мищенко, С. В. Пономарев, С. В. Григорьева [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2001. – Т. 7, № 3. –С.362 – 372.

126. Буравой, С.Е. Перспективы исследования теплофизических свойств методами монотонного режима [Текст] / С.Е. Буравой, Е.С. Платунов, В.В. Курепин. - Материалы 5 Международная теплофизической школы. Часть 1. Тамбов: Изд. ТГТУ, 2004. -С.66-74.

127. Ивлиев А. Д. Метод температурных волн в теплофизических исследованиях (анализ советского и российского опыта) [Текст] / А. Д. Ивлиев // Теплофизика высоких температур. – 2009. – Т. 47, № 5. –С.771 – 792.

128. Пономарев, С.В. Устройство для измерения теплофизических свойств веществ методами регулярных режимов [Текст] / С.В. Пономарев, С.В. Мищенко// Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2021. Т. 27. №1. С. 6–13. DOI: [10.17277/vestnik.2021.01.pp.006-013](https://doi.org/10.17277/vestnik.2021.01.pp.006-013)

129. Пономарев, С.В. Теоретические и практические основы теплофизических измерений [Текст] / С.В. Пономарев, С.В. Мищенко, В.М. Полунин, А.Г. Дивин, А.А. Чуриков / Под ред. Пономарев С.В., Вертоградский В.А. –М.: Физматлит, 2008. - 408 с.

130. Теплофизические измерения: учеб. пособие [Текст] / Е. С. Платунов, И. В. Баранов, С. Е. Буравой, В. В. Курепин; под ред. Е. С. Платунова. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2010. – 738 с.

131. Перевозчиков, С.М. Автоматизированная система измерения теплофизических параметров металлов и сплавов [Текст] / С.М. Перевозчиков, Л.Д. Загребин // ПТЭ, 1998. - № 3. -С.155 – 158.

132. Прикладная физика: Теплообмен в приборостроении [Текст] / Г.М. Кондратьев, Г.Н. Дульнев, Е.С. Платунов, Н.А. Ярышев. - СПб.: СПбГУ ИТМО, 2003. - 560 с.

133. Кравчун, С. Н. Метод периодического нагрева в экспериментальной теплофизике [Текст] / С. Н. Кравчун, А. А. Липаев. – Казань: Изд-во Казанского ун-та, 2006. – 208 с.

134. Малый патент №TJ 510 Республика Таджикистан, МПК (2011.01) G 01 K 17/08. / Установка для измерения теплоёмкости твёрдых тел [Текст] / Заявитель и патентообладатель: Низомов З., Гулов Б., Саидов Р., Обидов З.Р., Мирзоев Ф., Аvezов З., Иброхимов Н. - № 1100659; заявл. 03.10.11; опубл. 12.04.12. Бюлетен изобретения 72, 2012. -3 с.
135. Низомов, З. Исследование температурной зависимости коэффициента теплоотдачи меди, алюминия А7 и цинка [Текст] / З. Низомов, Р. Саидов, Б. Гулов, З. Аvezов // Матер. межд. конф. «Современные проблемы физики конденсированных сред и астрофизики». - Душанбе: Бахт LTD, 2010. -С.38-41.
136. Nizomov, Z. Research of thermophysical properties of metals and alloys by cooling method [Text] / Z. Nizomov, B.N. Gulov, Z.I. Avezov, J.G. Sharipov // Proceeding of the international symposium on innovative development of science. - Dushanbe, 2020. -P.115-116.
137. Низомов, З. Оценка теплофизических свойств металлов и сплавов методом охлаждения [Текст] / З. Низомов, Р.Х. Саидзода, Ф.М. Мирзоев, Дж.Г. Шарипов // Матер. науч. - прак. семинара «Наука - производству», посвященную 100 летию НИТУ «МИСиС». - Турсунзаде, 2017. -С.84-90.
138. Малый патент №TJ 1648 (Республика Таджикистан). Установка для определения однородности температурного поля и скорости охлаждения металлических материалов / Низомов З., Содатдинов Ш.С., Турахасанов И.Т., Шарифи Дж.Г., Мирзода И.О., Комилов М.М. - Приоритет изобретения от 02.07.25.
139. Малый патент № TJ 877 (Республика Таджикистан). Установка для определений теплоёмкости и теплопроводности твёрдых тел / И. Н. Ганиев, Н. Ф. Иброхимов, Ф. Ш. Зокиров. - Приоритет изобретения от 09.01.2019.
140. Шарипова Х. Я. Физико-механические и химические свойства алюминиево-магниевого сплава АМг2, легированного галлием, индием и таллием [Текст]/ Х.Я. Шарипова. Дисс. ... кан. тех. наук. 2.6.17 – Материаловедение. Институт химии им. Н.И. Никитина НАН Таджикистана. -Душанбе, 2025. – 178 с.

141. Nizomov, Z. Analysis of Thermal Isotropy of Parallelepiped Shape of Bronze Samples for Mechanical Engineering Applications [Text] / Z. Nizomov, S. Sodatdinov, R. Saidzoda, D. Nematov // Journal of Modern Industry and Manufacturing, 2024; 3-9. <https://doi.org/10.53964/jmim.2024009>
142. Sodatdinov, Sh. S. Thermal isotropy of parallelepiped bronze specimens [Text] / Sh. S. Sodatdinov, Z. Nizomov, B.N. Gulov, Kh. A. Toshkhodzhaev.- International Scientific-practical journal. Endless light in science, 2022, 15-16 july. - pp. 79-87. DOI -10.24412/2709-1201-2022-79-87.
143. Содатдинов, Ш.С. Тепловая однородность образцов из бронзы формы параллелипеда [Текст] / Ш.С. Содатдинов, З. Низомов, Р.Х. Саидзода. - Матер. Межд. НПК «Современное состояние взаимодействия науки с производством и инновационное развитие экономики». - Душанбе: «ТОРУС», 2022. -С.109-116.
144. Содатдинов, Ш.С. Исследование зависимости кинетики охлаждения образцов из бронзы от пространственных осей [Текст] / Ш.С. Содатдинов, З. Низомов, Б.Н. Гулов. - Матер. Межд. конф. «Роль физики в развитие науки, просвещения и инноваций». - Душанбе: Дониш. Душанбе, 2022. -С.151-154.
145. Низомов, З. Тепловая изотропность образцов из бронз формы параллелипеда [Текст] / З. Низомов, Ш.С. Содатдинов, Х.А. Тошходжаев - Матер. Межд. НПК на тему “Проблемы и перспективы развития физических наук”. – Худжанд: Изд-во ХГУ имени акад. Б. Гафурова, 2025. –С.24-31.
146. Кондратьев Г.М. Регулярный тепловой режим [Текст] / Г.М. Кондратьев. – Москва: Государственное издательство технико-теоретической литературы. – 1954. – 408 с.
147. Низомов, З. Однородность температурное поле в образце из алюминия марки А5N сложной формы [Текст] /З. Низомов, Ш.С. Содатдинов. – Вестник национального университета. Серия естественных наук. 2025. Вып. 3. –С.119-127.
148. Логинов Ю. Н. Медь и деформируемые медные сплавы [Текст] / Ю.Н. Логинов. - Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ- УПИ. - 2006. -136 с.

149. Осинцев О. Е. Медь и медные сплавы: отечественные и зарубежные марки [Текст] / О.Е. Осинцев, В.Н. Федоров В. - Машиностроение, 2004.- 336с.
150. Nizomov, Z. Influence of the Height Value of Cylindrical Specimens of Copper Grade M3 on the Kinetics of Their Cooling and Heat Transfer Processes [Text] / Z. Nizomov, Sh. Sodatdinov; R. Kh. Saidzoda; Dilshod Nematov // Engineering Science & Technology 2024-04-25 | Journal article | Author DOI: [10.37256/est.5220244118](https://doi.org/10.37256/est.5220244118) Part of DOI: [10.37256/est.522024](https://doi.org/10.37256/est.522024) Part of ISSN: [2717-5243 SCOPUS](https://scopus.com/journal/information/2717-5243)
151. Содатдинов Ш.С. Влияние высоты цилиндрических образцов из меди марки МЗ на кинетику их охлаждения [Текст] / Ш.С. Содатдинов - Вестник филиала МГУ имени М.В. Ломоносова в городе Душанбе, серия естественных наук. 2022. - Т.1, №3(25). -С.72-79.
152. Z. Nizomov, Sh. Sodatdinov; R. Kh. Saidzoda; Dilshod Nematov Influence of the Height Value of Cylindrical Specimens of Copper Grade M3 on the Kinetics of Their Cooling and Heat Transfer Processes (2024-04-25)// Engineering Science & Technology 2024-04-25 | Journal article | Author DOI: [10.37256/est.5220244118](https://doi.org/10.37256/est.5220244118) Part of DOI: [10.37256/est.522024](https://doi.org/10.37256/est.522024) Part of ISSN: [2717-5243 SCOPUS](https://scopus.com/journal/information/2717-5243)
153. Содатдинов Ш.С. Влияние высоты цилиндрических образцов из меди марки МЗ на кинетику их охлаждения [Текст] / Ш.С. Содатдинов - Вестник филиала МГУ имени М.В. Ломоносова в городе Душанбе, серия естественных наук. 2022. - Т.1, №3(25). -С.72-79.
154. Низомов, З. Зависимость кинетики охлаждения цилиндрических образцов из меди и процессы теплоотдачи от их высоты [Текст] / З. Низомов, Ш.С. Содатдинов, Р.Х. Саидзода. - Матер. Межд. науч. конф. «Современные проблемы физики конденсированного состояния». - Душанбе: Изд-во ТНУ, 2023. -С.98-102.
155. Меркулова Г.А. Металловедение и термическая обработка цветных сплавов / Г.А. Меркулова. - Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2007. - 262 с.
156. Новиков И.И., Металловедение / И.И. Новиков, В.С. Золоторевский, В.К. Портной и др. - М.: МИСиС, 2009. - 524 с.

157. Зиновьев А.В., Физико-механические свойства и пластическая деформация меди и ее сплавов / А.В. Зиновьев, А.Я. Частников, П.В. Потапов. - М.: ИРИАС, 2009. - 258с.
158. Пугачева, Н.Б. Структура и свойства деформируемых легированных латуней / Н.Б. Пугачева. - Екатеринбург: УрО РАН, 2012.
159. Ефремов, Б. Н. Латунь. От фазового строения к структуре и свойствам: монография / Б. Н. Ефремов. - Москва: ИНФРА-М, 2014. – 312 с.
160. Диаграммы состояния двойных металлических систем. Справочник / Под. ред. Н.П. Лякишева, в 4-х томах, том 3 – М.: Машиностроение, 1996. - 569 с.
161. Колесова, С.Н. Материаловедение и технология конструкционных материалов / С.Н. Колесова, И.С. Колесов. – М.: Высшая школа, 2004. -519 с.
162. Физические величины. Справочник. А. П. Бабичев, Н. А. Бабушкина, А. М. Братковский и др. / Под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. — М.: Энергоатомиздат, 1991. - 1232 с.
163. Содатдинов, Ш. С. Влияние высоты цилиндрических образцов из латуни Л63 на кинетику их охлаждения [Текст] / Ш.С. Содатдинов, З. Низомов, Р.Х. Саидзода, Дж.Г. Шарипов - Вестник Таджикского национального университета. Серия естественных наук.- 2023. - №1. -С.170-184.
164. Низомов, З. Влияние высоты цилиндра на кинетику охлаждения латуни Л63 [Текст] /З. Низомов, Ш.С. Содатдинов, Дж. Г. Шарипов. Матер. VIII Межд. конф. Современные проблемы физики. Душанбе, 2022. -С.203-206.
165. Гольдштейн, М.И. Специальные стали [Текст] / Гольдштейн М.И., Грачев С.В., Векслер Ю.Г. - М.: Металлургия, 1985. - 408 с.
166. Курдюмов, Г.В. Превращения в железе и стали [Текст] / Курдюмов Г.В., Утевский Л.М., Энтин Р.И. - М.: Наука, 1977. - 236 с.
167. Сорокин В.Г., Марочник сталей и сплавов / В.Г. Сорокин, А.В. Волосникова, С.А. Вяткин и др. // Под общ. ред. В. Г. Сорокина. - М.: Машиностроение, 1989. - 640 с.

168. Катаев, В. А. Методы исследования фазового состава и свойств углеродистой стали: [учеб.-метод. пособие]. - Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. - 84 с. ISBN 978-5-7996-1664-9
169. Гост 380–2005. Сталь углеродистая обыкновенного качества: Марки. М.: Стандартиформ, 2007.
170. Теплоёмкость и термическое расширение вещества. Терехов С.В. Справочник. ДонФТИ им. А.А. Галкина, Донецк. 2022. - 168 с.
171. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник в 3 т. Т. 2 / Под общ. ред. Н.П. Лякишева. М.: Машиностроение, 1996.
172. Финошина, Ю. В. Исследование структуры углеродистой стали после различных видов термической обработки / Ю. В. Финошина, А. В. Кириллова . - Вестник молодых ученых и специалистов Самарского университета. Машиностроение и машиноведение. 2020. 1(16). -С.208-213.
173. Оленева О.А., Селиванова О.В., Беликов С.В. Диаграмма состояния системы железо – углерод. - Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ – УПИ, 2006. - 56 с.
174. Низомов, З. Кинетика охлаждения цилиндрических образцов разного диаметра из стали марки 45 [Текст] / З. Низомов, Ш.С. Содатдинов, Дж.Г. Шарифи. – Матер. VIII Межд. конф. Современные проблемы физики. Душанбе, 2022. –С.66-70.



## **ПРИЛОЖЕНИЯ А**

**РЕСПУБЛИКА ТАДЖИКИСТАН**  
**ПАТЕНТНОЕ ВЕДОМСТВО**

**УДОСТОВЕРЕНИЕ**

Гражданин **Содатдинов Ш.С.**

Является автором изобретения **УСТАНОВКА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ  
ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ**

На изобретение выдан малый патент №ТJ **1648**

Патентообладатель **Низомов Зиёвуддин**

Страна **Республика Таджикистан**

Соавторы **Низомов З; Турахасанов И.Т; Шарифи Дж.Г; Мирзода И.О;  
Комилов М.М.**

Приоритет изобретения **02.07.2025**

Дата подачи заявления **02.07.2025**

Заявление № **2502127**

Зарегистрировано в Государственном реестре  
изобретений Республики Таджикистан

**11 ноября 2025**

Малый действителен с **2 июля 2025**  
Патент

г. по **2 июля 2035** г.

Настоящее удостоверение предъявляется при реализации прав и льгот,  
установленных действующим законодательством

РЕСПУБЛИКА ТАДЖИКИСТАН

ПАТЕНТНОЕ ВЕДОМСТВО

МАЛЫЙ ПАТЕНТ

№ TJ 1648

на изобретение

*УСТАНОВКА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ  
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ*

Патентообладатель Низомов Зиёвуддин

Страна Республика Таджикистан

Автор (ы) Низомов З; Содатдинов Ш.С; Турахасанов И.Т; Шарифи Дж.Г;  
Мирзода И.О; Комилов М.М.

Приоритет изобретения 02.07.2025

Дата подачи заявки 02.07.2025

Заявка № 2502127

Зарегистрировано в Государственном реестре  
изобретений Республики Таджикистан

11 ноября 2025

Малый  
патент действителен с 2 июля 2025

г. по 2 июля 2035 г.



ул. Назаршоева, 7, Душанбе, 734042  
Тел. (+992 37)222-20-00;  
Факс: (+992 37)222-20-08  
<http://www.df.misis.ru>  
E-mail: [ttucdo@mail.ru](mailto:ttucdo@mail.ru)

«Утверждаю»  
Директор ДФ НИТУ «МИСИС»,  
доцент  
  
Джураев М.А.

Ф-25/442 от 19.11.2025  
на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

### Акт

о внедрении изобретения в научный и учебный процессы

Настоящий акт составлен о том, что изобретение по патенту Республики Таджикистан №ТJ 1648 от 02.07.2025 г. «Установка для определения теплофизических свойств металлических материалов» в настоящее время используется при выполнении диссертационных работ на кафедре «Энергоэффективных и ресурсосберегающих технологии» (ЭиРТ) и при выполнении лабораторных работ по предметам «Физпрактикум» студентами первого курса филиала Национального исследовательского технологического университета «МИСИС» в г. Душанбе.

Авторами изобретения являются сотрудники и соискатели НИЛФКС Низомов З., Содатдинов Ш.С., Турахасанов И.Т., Шарифи Дж. Г., Мирзода И.О., Комилов М.М.

Прибор по патенту №ТJ 1648 позволяет проводить исследования распределение температурное поле и кинетики охлаждения твердых тел, температурной зависимости коэффициентов излучательной, кондуктивной и конвективной теплоотдачи, а также степени черноты металлов и сплавов.

Факт практического использования изобретения подтверждаем;

Начальник учебно-методического отдела  
ДФ НИТУ «МИСИС»



Махмадизода М.М.

Заведующий кафедрой ЭиРТ, к.т.н., доцент



Одиназода Б.Н.

Канд. к.т.н, доцент кафедры ЭиРТ



Табаров Ф.С.

Канд. к.т.н, доцент кафедры ЭиРТ




Негматов М.

**Адрес:** 734042, г. Душанбе, ул. Назаршоева, 7, ДФ НИТУ «МИСИС»

**Телефон:** (+992) 37-222-20-08; (+992) 37-222-20-09; **Эл. почта:** df@misis.ru

«Утверждаю»

Проректор по науке и инновациям  
Таджикского национального университета,  
доктор химических наук, профессор  
  
Сафармамадзода С.М.

Акт

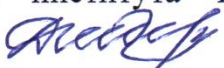
о внедрении изобретения в научный и учебный процессы

Настоящий акт составлен о том, что изобретение по патенту Республики Таджикистан №ТJ 1648 «Установка для определения теплофизических свойств металлических материалов» в настоящее время используется при выполнении диссертационных работ, при выполнении лабораторных работ студентами физического факультета на кафедре общей физики и в научно-исследовательской лаборатории «Физики конденсированного состояния» (НИЛФКС) НИИ Таджикского национального университета.

Авторами изобретения являются сотрудники и соискатели НИЛФКС Низомов З., Содатдинов Ш.С., Турахасанов И.Т., Шарифи Дж. Г., Мирзода И.О., Комилов М.М.


Прибор по патенту №ТJ 1648 позволяет проводить исследования распределение температурное поле и кинетики охлаждения твердых тел, температурной зависимости коэффициентов излучательной, кондуктивной и конвективной теплоотдачи, а также степени черноты металлов и сплавов.

Факт практического использования изобретения подтверждаем;

Директор научно-исследовательского института ТНУ, доктор физико-математических наук, профессор  Одиназода Р.Н.

Зав. научно-исследовательской лаборатории «Физики конденсированного состояния», кандидат физ.-мат. наук, ВНС  Содиков Ф.Х.

Декан физического факультета,  
канд. физ.-мат наук, доцент  Кодирзода З.А.

Зам. декана физического факультета по науке и инновации  
канд. физ.-мат наук, доцент  Шарифи Дж. Г.

Зав. кафедрой «Общей физики»  
доктор физ.-мат. наук, профессор  Акдодов Д.М.

## **ПРИЛОЖЕНИЯ Б**



МИСИС

ФИЛИАЛ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
АВТОНОМНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО  
УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИСИС» В Г. ДУШАНБЕ  
(ДФ НИТУ МИСИС)

ул. Назаршоева, 7, Душанбе, 734042

Тел. (+992)222-20-00;

<http://www.df.misis.ru>E-mail: [tuqdo@mail.ru](mailto:tuqdo@mail.ru)

УТВЕРЖДАЮ

Директор ДФ НИТУ «МИСИС»

М.А. Джураев

2025 г.

№ Ф 25/443 от 21.11.2025

На №

от

## АКТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

в учебный процесс результатов научно-исследовательской работы,  
выполненной в рамках диссертационной работы, старшим преподавателем ка-  
федры «Энергоэффективных и ресурсосберегающих технологий» (ЭиРТ),  
филиала Национального исследовательского технологического университета  
(НИТУ) «МИСИС» в город Душанбе  
Содатдиновым Шахнавозом Садриддиновичем

Мы, нижеподписавшиеся, Махмадизода М.М. - начальник учебно-методи-  
ческого отдела ДФ НИТУ «МИСИС», док. тех. наук., профессор; Одиназода Б.Н.  
– заведующий кафедрой ЭиРТ, канд. тех. наук, доцент; Каримзода М.Б. - док.  
хим. наук, профессор кафедры ЭиРТ, Низомов З. - научный руководитель дис-  
сертации, канд. физ.-мат. наук, доцент, ведущий научный сотрудник НИЛ ФКС  
им. проф. Нарзуллаева Б.Н. НИИ ТНУ составили настоящий АКТ ИСПОЛЬЗО-  
ВАНИЯ результатов научно-исследовательской работы, выполненной старшим  
преподавателем кафедры ЭиРТ Содатдиновым Ш.С. в рамках диссертационной  
работы на тему: «Влияние размера металлических образцов на распределение  
температуры, кинетику охлаждения и коэффициентов теплоотдачи».

**Основные результаты работы:** в результате изучения процессов в образ-  
цах разной формы и размера выявлено, что для металлических образцов темпе-  
ратура распределена равномерно по объему и зависит только от времени охла-  
ждения; оценена характерных времен радиационно-конвективного теплообмена  
образцов с окружающей средой и выяснено, что в порядке от теплового излуче-  
ния к теплопроводности и конвекции увеличивается; выявлено, что в пределах  
погрешности эксперимента зависимости характерных времен охлаждения от от-  
ношения объема к площади поверхности образцов при вариации длины линей-  
ные; установлено температурные зависимости коэффициентов излучательного и  
конвективного теплоотдачи образцов и показано, что температурную



конвективного теплоотдачи образцов и показано, что температурную зависимость коэффициента излучательной теплоотдачи определяет степень черноты поверхности тела, с ростом температуры растёт, в то время как коэффициент конвективной теплоотдачи зависит от физических свойств воздуха и с температурой сначала растёт, а далее медленно уменьшается; установлено, что с ростом длины образцов коэффициент теплоотдачи в пределах погрешности эксперимента остаётся постоянным; обнаружен и исследован фазовый переход первого рода в образцах из стали 45 разного размера в широком интервале температур, полученные результаты согласуются с данными теплоемкости.

Указанную работу можно использовать в учебный процесс на лекционных курсах «Теплофизика» и «Металлургическая теплотехника».

**Наименование объекта и предмета использования результатов научно-исследовательской работы соискателя:** объект внедрения – закономерности распределения температуры в металлах и сплавах, влияния размера и формы образцов на кинетику их охлаждения и процессы теплоотдачи с окружающей средой; предмет внедрения – однородность теплового поля в металлических материалах, теплофизические свойства металлов и сплавов, зависимость кинетики охлаждения и процессов теплоотдачи от размера и формы образца.

**Эффект от использования результатов:** научно-технические результаты по проблеме исследования однородности металлических материалов, а также влияния размера и формы образцов на кинетику охлаждения и коэффициентов теплоотдачи, имеют важное значение для оптимизации конструкций теплообменных устройств и повышения их эффективности, правильный выбор формы и размеров компонентов может существенно повысить эффективность теплообмена и снизить энергозатраты; позволяет значительно улучшить качество подготовки специалистов по направлению 22 03 02. Энергоэффективных и ресурсосберегающих технологий

Начальник учебно-методического отдела

ДФ НИТУ «МИСИС»

Заведующий кафедрой ЭиРТ

Профессор кафедры ЭиРТ

Соискатель

Махмадизода М.М.

Одиназода Б.Н.

Каримзода М.Б.

Содатдинов Ш.С.

**Адрес:** 734042, г. Душанбе, ул. Назаршоева, 7, ДФ НИТУ «МИСИС»

**Телефон:** (+992)

37-222-20-08; (+992)

37-222-20-09;

**Эл. почта:** df@misis.ru