

УДК 538.9

Содатдинов Шахнавоз Садридинович

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

Специальность 1.3.8– физика конденсированного состояния

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Душанбе-2026

Работа выполнена в научно-исследовательской лаборатории «Физики конденсированных сред» имени профессора Б.Н. Нарзуллаева научно-исследовательского института (НИИ) Таджикского национального университета (ТНУ).

Научный руководитель: Низомов Зиёвуддин – кандидат физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник НИИ ТНУ

Официальные оппоненты: Ивлиев Андрей Дмитриевич - д.ф.-м.н., профессор кафедры математических и естественнонаучных дисциплин ФГАОУ ВО «Уральский государственный педагогический университет», г. Екатеринбург, Россия
Эшов Б.Б. – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории «Материаловедение» Института химии имени В.И. Никитина Национальной академии наук Таджикистана, г. Душанбе, Таджикистан.

Ведущая организация: Кафедра физики Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими, г. Душанбе, Таджикистан.

Защита состоится «28 » апреля 2026 года в 10:00 часов на заседании объединенного диссертационного совета 99.0.057.02 по защите докторских и кандидатских диссертаций при Таджикском национальном университете по адресу: 734025, Республика Таджикистан, г. Душанбе, ул. Буни Хисорак, Студенческий городок, учебный корпус 16, аудитория 206.

Отзывы направлять по адресу: 734025, Республика Таджикистан, г. Душанбе, проспект Рудаки, 17, ТНУ, диссертационный совет 99.0.057.02.

E-mail: tgnu@mail.tj.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте Таджикского национального университета (www.tnu.tj).

Автореферат разослан « ____ » _____ 2026 г.

Ученый секретарь объединённого диссертационного совета 99.0.057.02,
кандидат физ.-мат. наук, СНС

Табаров С.Х.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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, экспери-

мент, сравнение и обобщение. Для обработки экспериментального материала применялись методы статистической анализа 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. Дульневим, 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 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» (ЭиРТ) 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 4 - в изданиях из Перечня ВАК РФ, в том числе 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 инте-

грации 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 рисунков и 13 таблиц, состоит из введения, 4 глав, заключение и списка использованной литературы из 174 наименования.

Ключевые слова: металлы, температура, температурное поле, теплоотдача, конвекция, теплопроводность, излучение, 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 процесса охлаждения твёрдых тел. Все образцы были изготовлены в научно-исследовательской лаборатории физики конденсированных сред им. профессора Б.Н. Нарзуллоева НИИ ТНУ.

Измерения временная зависимость температуры образцов одновременно в трех точках производились на собранном нами установке, которая представлена на рис.1. Образец 5 представляет собой тело с высверленным каналом на одном конце. В этот канал помещается термopара, концы которого подключены к цифровому мультиметру UT71B (13). Мультиметр соединён с компьютером (15), что позволяет напрямую записывать результаты измерений в виде табли-

цы. Устанавливается напряжение на автотрансформаторе (1) и контролируется с помощью измерителя Digital multimeter DI 9208 L (2). С помощью термометра фиксируется значение температуры окружающей среды. Образец помещается в печь и нагревается до температуры чуть ниже температуры плавления образца. Температура образца контролируется с помощью цифрового термометра Digital Multimeter UT71B (13). После достижения, требуемого температуры, образец быстро извлекается из печи в воздух, начинается автоматический отсчёт времени охлаждения и температуры образца до момента, когда она достигнет 35–40 °С. Каждые 10 секунд компьютер автоматически фиксирует температуру. Относительная ошибка измерения температуры в интервале от 40 °С до 400 °С составляла $\pm 1\%$, а в интервале от 400°С до 1000 °С - $\pm 2,5\%$.

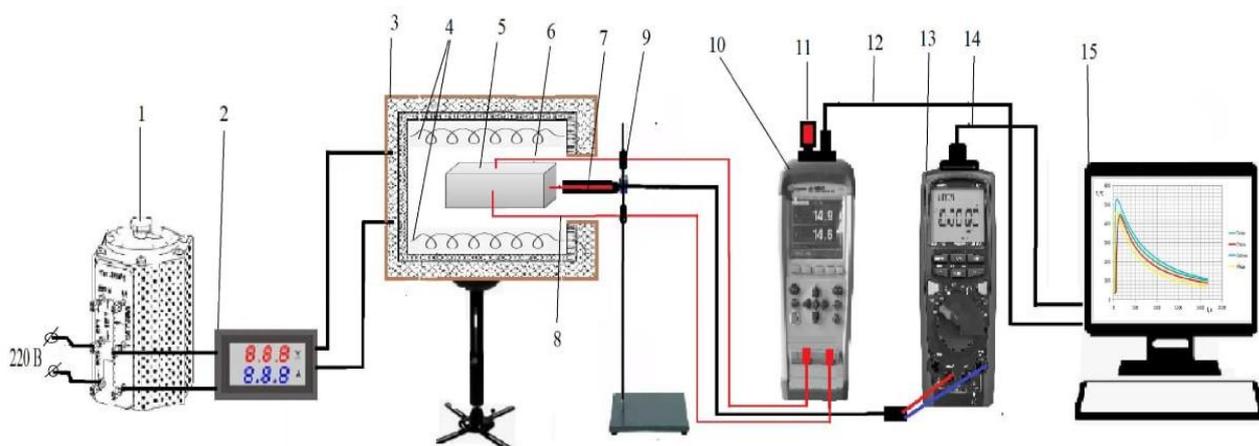


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 - ЛАТР тип 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.

Для измерения температуры одновременно в трех направлениях использовали Digital Multimeter UT71B и двухканальный портативный измеритель температуры АТ4202 (10). Прибор АТ4202 использует высокопроизводительный микропроцессор ARM, может собирать двухканальные данные о температуре одновременно и быстро реагировать на них. АТ4202 выполняет функцию передачи данных через USB (11). Стандартное компьютерное программное обеспечение может реализовать анализ данных. Прибор снабжен программным

обеспечением АТS42 для сбора данных. Погрешность $0.2\%+1^{\circ}\text{C}$. Диапазон измеряемой температуры от -200 до 1800°C . Разрешение $0,1^{\circ}\text{C}$.

Из величины измеренной температуры образца вычитаем температуру окружающую среду $\Delta T = T - T_0$. Далее строим график зависимости ΔT от времени τ . 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. Перед каждой серией измерений проверялась надёжность работы установки с помощью измерения эталонных кривых охлаждения алюминия марки А5N.

Глава III посвящено проверке однородности температурного поля в металлических образцах разной формы и размера. Необходимость в том, чтобы выявить, являются образцы «термически тонким» или нет является основанием для применения закона сохранения энергии или закона Фурье при нахождении временная зависимость температуры образца при охлаждении. В §3.1 приведены результаты проверки однородности температурное поле образца из бронзы формы параллелепипеда. Для этого было исследовано кинетика охлаждения образца из бронзы формы параллелепипеда шириной 2,4 см, длиной 4,2 см и толщиной 0,9 см одновременно и в отдельности относительно его осей X, Y, Z.

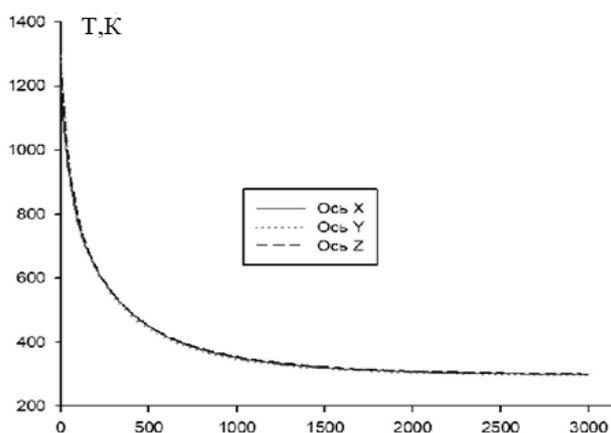


Рис. 2. Зависимость температуры параллелепипеда от времени охлаждения относительно осей X, Y, Z



Рис. 3. Образец из алюминия марки А5N

На рисунке 2 приведено сравнение кривых охлаждения относительно осей X, Y, Z. Как видно температура образца, не зависит от координаты.

§3.2 посвящено исследованию распределения температурного поля в образце из алюминия марки А5N сложной формы (рис. 3). На рис. 4 приведена зависимость температуры образца от времени охлаждения относительно осей X, Y, Z. Как видно из рисунка 4 охлаждения образца не зависит от направления. Поэтому приводимые ниже зависимости относятся к всех осей.

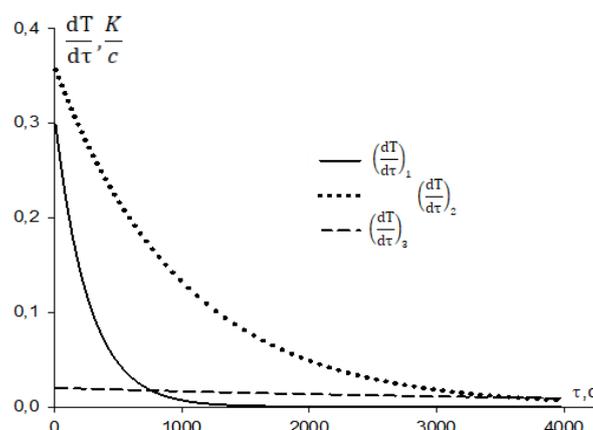
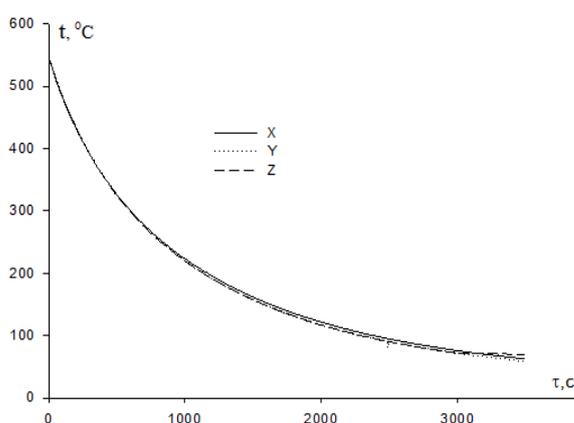


Рис. 4. Зависимость температуры алюминия А5N относительно осей X, Y, Z от времени охлаждения

Обработка с помощью программы Sigma Plot 10 показала, что кривые охлаждения описывается уравнением с 6 параметрами:

$$\Delta T = ae^{-b\tau} + ce^{-d\tau} + ke^{-l\tau} \quad (1)$$

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

Для нашего объекта исследования формула (1) имеет вид:

$$\Delta T = 81,61 e^{-\tau/263,16} + 362,67 e^{-\tau/1000} + 102,63 e^{-\tau/5000}. \quad (2)$$

На рис.5 приведено зависимость скорости охлаждения за счет излучения, теплопроводности и конвекции от времени.

Зависимость удельной теплоемкости алюминия марки А5N от температуры выражается формулой:

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

Масса образца $m=0,16$ кг, объем $59,43 \cdot 10^{-6}$ м³. Площадь поверхности $S=98,6 \cdot 10^{-4}$ м².

Коэффициенты конвективной и кондуктивной теплоотдачи вычислили по формуле:

$$\alpha_k = \frac{Cm \left(-\frac{dT}{d\tau} \right)_k}{S (T - T_0)}, \quad (3)$$

а коэффициент излучательной теплоотдачи по формуле:

$$\alpha_{и} = \frac{Cm \left(-\frac{dT}{d\tau} \right)_и}{S T}. \quad (4)$$

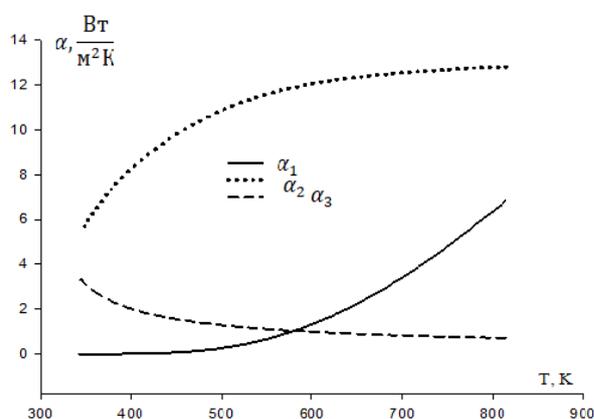


Рис. 6. Температурная зависимость коэффициентов теплоотдачи

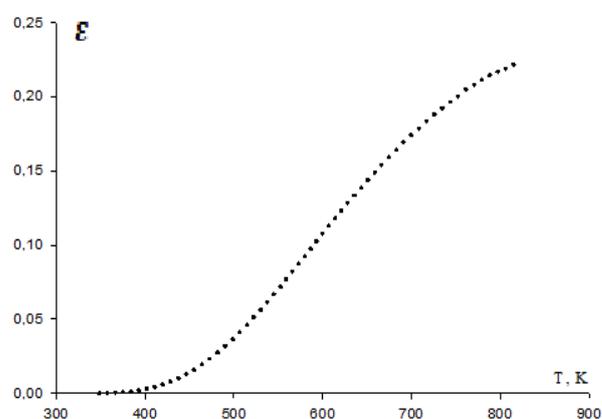


Рис. 7. Зависимость степени черноты образца от температуры

На рисунке 6 приведены температурные зависимости коэффициентов излучательной α_1 , кондуктивной α_2 и конвективной α_3 теплоотдачи. Как видно из рисунка с повышением температуры коэффициенты излучательной и кондуктивной теплоотдачи увеличиваются, а коэффициент конвективной теплоотдачи уменьшается. Под $\alpha_{и}$ будем подразумевать коэффициент излучательной теплоотдачи поверхности образца. Формула для расчета коэффициента излучательной теплоотдачи для серого тела с коэффициентом черноты ϵ имеет вид:

$$\alpha_{и} = \epsilon 0,0567 \left(\frac{T}{100} \right)^3. \quad (5)$$

Из данных по температурной зависимости коэффициента излучательной теплоотдачи с помощью формулы (5) оценили степень черноты образца. На

рисунке 7 приведена зависимости степени черноты образца от температуры.

Как видно из рисунка 7, ниже температуры 370 К степень черноты образца равна нулю, а с ростом температуры увеличивается. Численные значения, полученные в данной работе, хорошо согласуются с литературными для сильно оксидированной поверхности алюминия. В имеющихся в литературе данных о степени черноты приводятся только для одной температуры. Температурной зависимости степени черноты для металлов не встречается.

Для проверки полученных результатов вычисляем число Био. Число Био представляет собой отношение скорости кондуктивного переноса тепла к скорости аккумуляирования энергии в материале

$$Bi = \frac{\alpha V}{\lambda S},$$

где α - коэффициент теплоотдачи, λ - коэффициент теплопроводности материала тела. Для температуры 600 К общий коэффициент теплоотдачи алюминия А5N $\alpha \approx 14 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$, коэффициент теплопроводности при комнатной температуре $\lambda \approx 200 \frac{\text{Вт}}{\text{м К}}$, $V/S = 0,603 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ и $Bi \approx 0,000422$. При $Bi \ll 0,1$ в каждый момент времени температура внутри тела успевает выровняться за счет переноса теплоты теплопроводностью. Поскольку градиент температуры внутри тела практически равен нулю, то вместо дифференциального уравнения теплопроводности Фурье используем балансовое уравнение тепла.

Уменьшение энергии, аккумуляированной в твердом теле, должно быть равно тепловому потоку, отводимому от поверхности конвекцией:

$$C\rho VdT = -\alpha S(T - T_c) dt. \quad (6)$$

где C , ρ , V , S , T – соответственно удельная теплоемкость, плотность, объем, площадь и температура образца, T_c – температура окружающей среды.

В этом случае изменение избыточной температуры тела описывается дифференциальным уравнением:

$$C\rho V \frac{d(T-T_c)}{dt} = -\alpha S(T - T_c) \quad (7)$$

Разделяем переменные в уравнении (7)

$$\frac{d(T-T_c)}{T-T_c} = -\frac{\alpha S}{C\rho V} d\tau \quad (8)$$

Интегрируя уравнение (3.8) получим:

$$\ln \frac{T-T_c}{(T-T_c)_{\tau=0}} = -\frac{\alpha S}{C\rho V} \tau \quad (9)$$

$$\Delta T = (\Delta T)_{\tau=0} e^{-\left(\frac{\alpha S}{C\rho V}\right)\tau}. \quad (10)$$

В выражении (10) величина $\frac{C\rho V}{\alpha S} = \tau_i$ имеет размерность времени. При $\tau = \tau_i$ разность температуры образца и окружающей среды уменьшается в 2.71 раз. Величина τ_i зависит от материала образца и вида теплоотдачи, поэтому его будем использовать как характерное время охлаждения.

Процессы теплоотдача излучением и конвекции не зависят друг от друга. Излучения зависит от температуры и степени черноты образца, а конвекция и теплопроводность от физических свойств окружающей среды. Общая охлаждения равно сумме охлаждения конвекцией, теплопроводности и излучения:

$$\Delta T = \Delta T_k + \Delta T_T + \Delta T_{и} \quad (11)$$

Количество теплоты, уходящее за счет конвективного и кондуктивного теплоотдачи равно

$$Cm dT_k = -\alpha_k S (T - T_0) d\tau, \quad (12)$$

$$Cm dT_T = -\alpha_T S (T - T_0) d\tau, \quad (13)$$

а за счет излучения

$$Cm dT_{и} = -\alpha_{и} S T d\tau. \quad (14)$$

Обозначим $\tau_k = \frac{\rho CV}{\alpha_k S}$, $\tau_T = \frac{\rho CV}{\alpha_T S}$, $\tau_{и} = \frac{\rho CV}{\alpha_{и} S}$.

Решение уравнений (13), (14) и (15) будет следующие выражения

$$\Delta T_k = (\Delta T_k)_{\tau=0} \exp(-\tau/\tau_k), \quad \Delta T_T = (\Delta T_T)_{\tau=0} \exp(-\tau/\tau_T) \quad \text{и}$$

$$\Delta T_{и} = (\Delta T_{и})_{\tau=0} e^{-\tau/\tau_{и}}, \quad (15)$$

С учетом уравнений (12) и (15) при малых значениях числа Bi, при свободном воздушном охлаждении уравнение подобия описывается выражением:

$$\Delta T = (\Delta T_{и})_{\tau=0} \exp(-\tau/\tau_{и}) + (\Delta T_T)_{\tau=0} \exp(-\tau/\tau_T) + (\Delta T_k)_{\tau=0} \exp(-\tau/\tau_k) \quad (16)$$

где $(\Delta T_T)_{\tau=0}$, $(\Delta T_k)_{\tau=0}$ - разность температур нагретого тела и окружающей

среды при $\tau = 0$, $(\Delta T_i)_{\tau=0}$ - разность температур нагретого тела в момент начала измерений и температуры при котором излучения прекращается, τ_i , τ_t и τ_k - характерные времена охлаждения. Индексы **и**, **т** и **к** указывают на излучательного, кондуктивного и конвективного теплоотдачи. Для простоты обозначения заменили их на 1, 2, 3.

Значения характерное время охлаждения определяется экспериментально. Введем отношения времени охлаждения τ к τ_i как число $N = \tau/\tau_i$.

На рисунках 8 и 9 приведены зависимости $\frac{\Delta T_i}{(\Delta T_i)_{\tau=0}}$ и $\ln \frac{\Delta T_i}{(\Delta T_i)_{\tau=0}}$ от $N = \frac{\tau}{\tau_i}$ для излучательного, кондуктивного и конвективного теплоотдачи образца из алюминия марки А5N сложной формы.

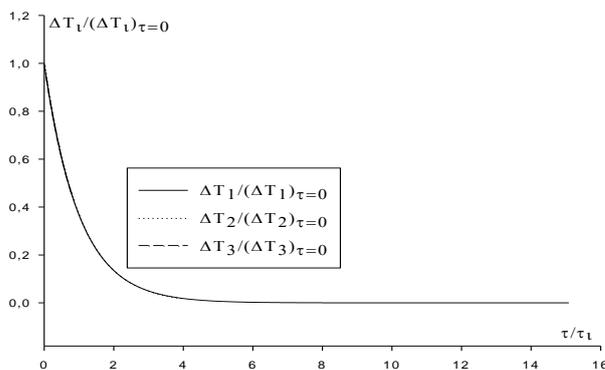


Рис. 8. Зависимость $\frac{\Delta T_i}{(\Delta T_i)_{\tau=0}}$ от $N = \frac{\tau}{\tau_i}$ для излучательного, кондуктивного и конвективного теплоотдачи

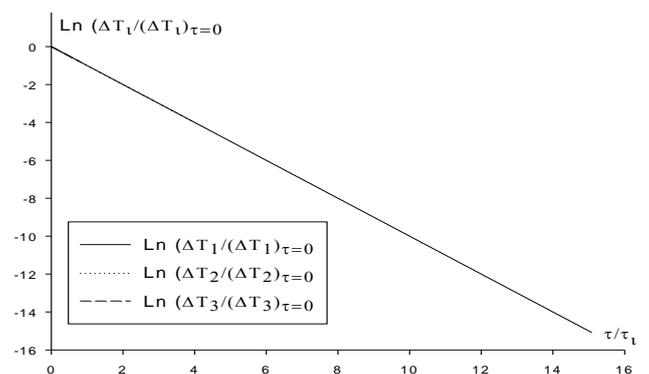


Рис. 9. Зависимость $\ln \frac{\Delta T_i}{(\Delta T_i)_{\tau=0}}$ от N для излучательного, кондуктивного и конвективного теплоотдачи

Как видно из рисунков 8 и 9 экспериментальные данные для охлаждения излучением, теплопроводности и конвекции лежат на одной линии. Если из эксперимента определены характерное время охлаждения и начальная температура тела, то можно определить его температуру в любой момент времени или время, когда достигается нужная температура.

Характерной длиной в задачах теплоотдачи становится тепловая характеристическая длина, то есть отношение между объемом тела и площадью поверхности тела: $\frac{V}{S} = l$. Для цилиндра постоянной высоты $h = \text{const}$ $l = \frac{d}{4(1 + \frac{d}{2h})}$.

В главе IV приведены результаты исследования влияния размеры металлических образцов на их теплофизические свойства. В §4.1. рассмотрены влияние величины высоты цилиндрических образцов из меди марки МЗ на кинетику их охлаждения и процессы теплоотдачи. Так как состояния поверхности образцов одинаковы, предполагали, что коэффициент теплоотдачи остается постоянным. В этом случае рассматриваемая система является хорошей моделью для изучения влияния размера образцов на процессы охлаждения. Объектами исследования являлись цилиндрические образцы из меди марки МЗ диаметром 1.0 см, высотой 5.3 см и 9.0 см. Экспериментально полученные временные зависимости температуры образцов описываются уравнением (16).

Для алюминиевых образцов верхний предел температуры составлял 620°C. В них наблюдается кондуктивно-конвективный (вместе) и лучистая теплоотдача. Расширение области температурных исследований позволило нам впервые наблюдать в отдельности все составляющие теплоотдачи. На рис. 9 приведены зависимости разности температур образцов и окружающей среды ΔT , охлаждения за счет лучеиспускания ΔT_1 , теплопроводности ΔT_2 и конвекции ΔT_3 для цилиндрического образца высотой 9.0 см. На рис. 11 приведены зависимости скорости охлаждения от времени для высоты 5.3 см. Как видно из рисунков 10 и 11, процесс охлаждения за счет излучения протекает быстрее, чем в при теплопроводности и конвекция.

В таблице 2. приведены значения постоянных в уравнении (16).

Таблица 2.

Значения постоянных в уравнении (16).

| h, см | $(\Delta T_1)_{\tau=0}, K$ | τ_1, c | $(\Delta T_2)_{\tau=0}, K$ | τ_2, c | $(\Delta T_3)_{\tau=0}, K$ | τ_3, c | V/S, см |
|-------|----------------------------|-------------|----------------------------|-------------|----------------------------|-------------|---------|
| 5.3 | 317 | 28 | 355 | 189 | 237 | 367 | 0,21 |
| 9.0 | 345 | 30 | 367 | 202 | 256 | 394 | 0,225 |

Обработка кривых зависимости характерных времён охлаждения от отношения объема цилиндра с помощью программы Sigma Plot 10 показала, что в пределах погрешности определения оно выражается уравнением

$$\tau_i = a \frac{V}{S},$$

где $a = 133$ с/см для τ_1 , 900 с/см для τ_2 и 1750 с/см для τ_3 .

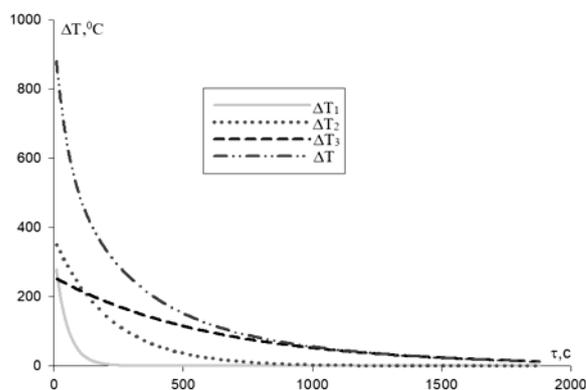


Рис. 10. Временная зависимость изменения температуры образца высотой 9.0 см от времени.

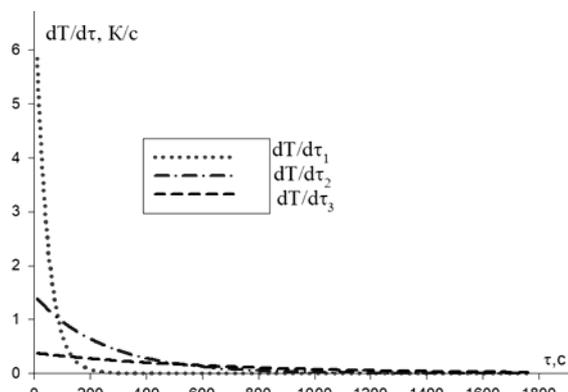


Рис. 11. Зависимость скоростей охлаждения от времени для образца высотой 5.3 см.

Зависимость теплоемкости меди от температуры выражается формулой

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

где $x = (T - 300)/100$. Используя вычисленные значения температурной зависимости теплоемкости меди по формуле (17) и экспериментально полученные нами зависимости скорости охлаждения от времени, для каждого процесса вычислили соответствующие коэффициенты теплоотдачи. На рисунке 12 приведена температурные зависимости коэффициентов теплоотдачи, а на рисунках 13-15 приведены сравнения для двух значений высоты цилиндра.

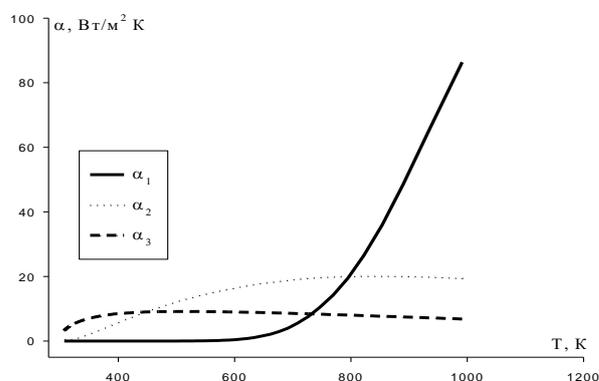


Рис. 12. Температурная зависимость коэффициентов теплоотдачи для меди марки МЗ высотой 5,3 см.

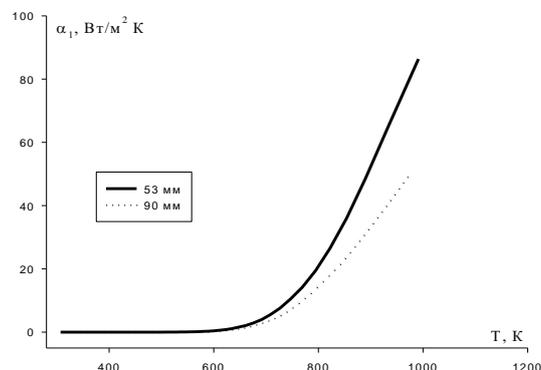


Рис. 13. Температурная зависимость коэффициентов излучательной теплоотдачи α_1 .

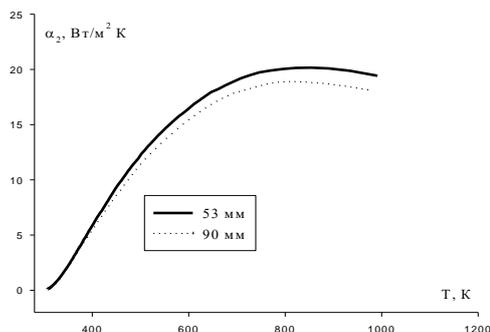


Рис. 14. Сравнение температурных зависимостей коэффициентов кондуктивной теплоотдачи.

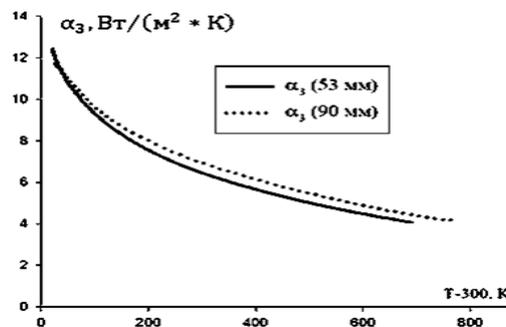


Рис. 15. Температурная зависимость коэффициентов конвективной теплоотдачи

Как видно из рисунков 13-15, коэффициенты теплоотдачи в пределах погрешности эксперимента слабо зависят от длины цилиндра, а зависят от материала и состояния поверхности образца.

В §4.2 рассмотрена влияние высоты цилиндрических образцов из латуни Л63 на кинетику их охлаждения и коэффициентов теплоотдачи.

Марки латуни определяли из значения плотности исследуемого образца.

Плотность образцов $\rho = 8268,41 \text{ кг/м}^3$, плотность меди

$\rho_1 = 8950 \text{ кг/м}^3$ и плотность цинка $\rho_2 = 7140 \text{ кг/м}^3$.

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

Объекты исследования являлись цилиндрические образцы из латуни марки Л63 диаметром 1,5 см и высотой 1,3 см, 2,5 см, 4,1 см, 8,7 см и 13,3 см.

В качестве примера на рис. 16 приведены зависимости температуры образца высотой 13,3 см от времени охлаждения.

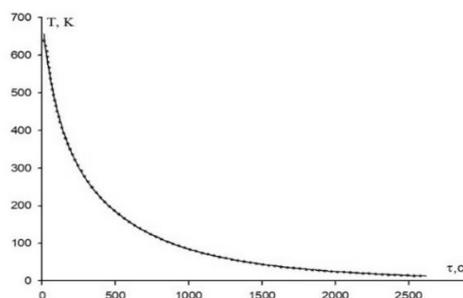


Рис. 16. Зависимость температуры образца из латуни от времени охлаждения

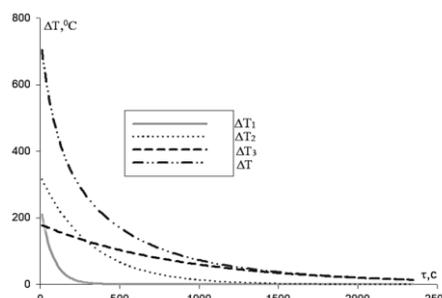


Рис. 17. Зависимость изменения температуры образца высотой 13,3 см от времени охлаждения

На рисунке 17 приведены зависимости разности температур образцов и окружающей среды ΔT , охлаждения за счет лучеиспускания ΔT_1 , теплопроводности ΔT_2 и конвекции ΔT_3 для образца высотой 13,3 см.

В таблице 3 приведены найденные значения постоянных в уравнении (16) от времени для образцов из латуни марки Л63 диаметра 1,5 см и разных высот.

Таблица 3.

Значения постоянных в уравнении (16).

| h, см | V/S, см | $\Delta T_1, K$ | τ_1, c | $\Delta T_2, K$ | τ_2, c | $\Delta T_3, K$ | τ_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 зависимости характерных времён охлаждения от V/S с помощью программы Sigma Plot 10 показала, что в пределах погрешности определения оно выражается уравнением $\tau_i = ax$,

где $x=V/S$, $a=213,3$ с/см для τ_1 , $886,7$ с/см для τ_2 и 2550 с/см для τ_3 .

Используя, температурная зависимость теплоемкости меди и цинка по правилу Неймана-Коппа получили следующую формулу для зависимости теплоемкости латуна марки Л63 от температуры

$$C(T - 300) = 390,50 + 17,04x - 1,32x^2 + 0,42x^3. \quad (18)$$

Согласно справочным данным удельная теплоемкость латуна марки Л63 при 293 К равно 385 Дж / (кг К). По формуле (21) при 300 К – 390.5 Дж / (кг К). Эти результаты показывают, что использование правила Неймана-Коппа в данном случае для латуни оправданно. По формулам (3) и (4) вычислили коэффициенты теплоотдачи для латуни марки L63. На рисунках 18,19 приведены температурные зависимости коэффициентов теплоотдачи для разной высоты.

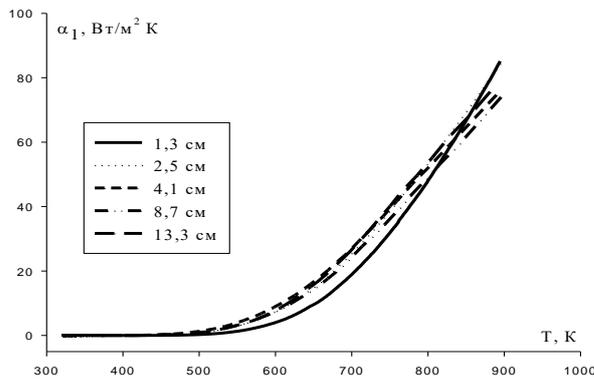


Рис. 18. Зависимость коэффициента излучательной теплоотдачи от температуры для образцов разной длины

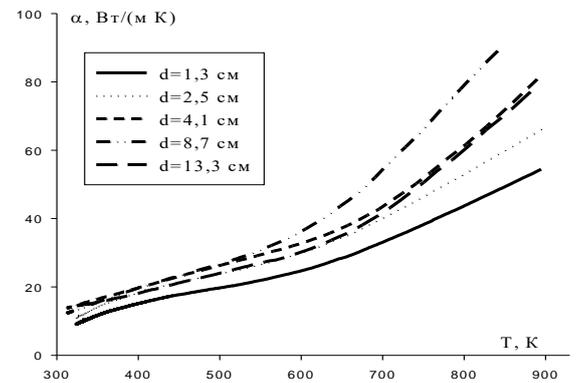


Рис. 19. Зависимость коэффициента общей теплоотдачи от температуры для образцов разной длины

В §4.6. приведены результаты экспериментального исследования кинетики охлаждения и процессов теплоотдачи образцов из стали марки 45 формы цилиндра диаметрами 15, 20, 25, 30 и 37 мм и высотой 95 мм в интервале температуры от 1023 К до 308 К.

Исследования показали, что на кривой охлаждения в области около 675 °С наблюдается перегиб, связанный с выделением тепла. Для анализа этих перегибов и переходов использовали математический аппарат встроенный в Origin Pro программы. Сначала выделили базовую линию. В качестве примера на рисунке 20 приведена зависимость температуры образца диаметра 15 мм из стали 45 от времени охлаждения. Обработка графиков с помощью программы Origin Pro 17 показала, что лучше всего базовая линия описывается уравнением (16). В качестве примера на рисунке 21 приведена кривые охлаждения за счет излучения ΔT_1 и конвекции ΔT_2 для образца диаметром 2 см.

В таблице 4. приведены найденные значения постоянных в уравнении (16).

Таблица 4.

Значения параметров входящие в уравнение (16)

| d, мм | $\Delta T_1, K$ | τ_1, c | $\Delta T_2, K$ | τ_2, c | V, $10^{-6} m^3$ | S, $10^{-3} m^2$ | $V/S \cdot 10^{-3} m$ |
|-------|-----------------|-------------|-----------------|-------------|------------------|------------------|-----------------------|
| 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 |

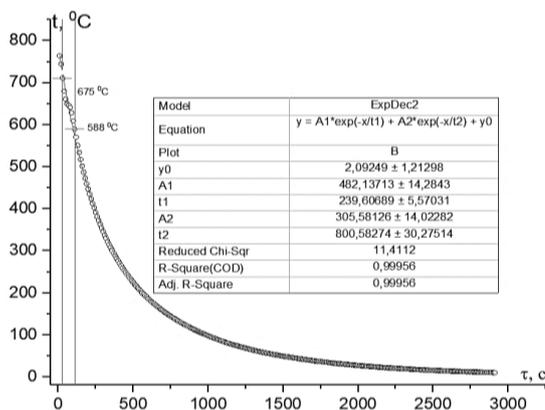


Рис. 20. Зависимость температуры образца диаметром 15 мм от времени излучательного охлаждения: кружочки эксперимент, сплошная линия - базовая линия.

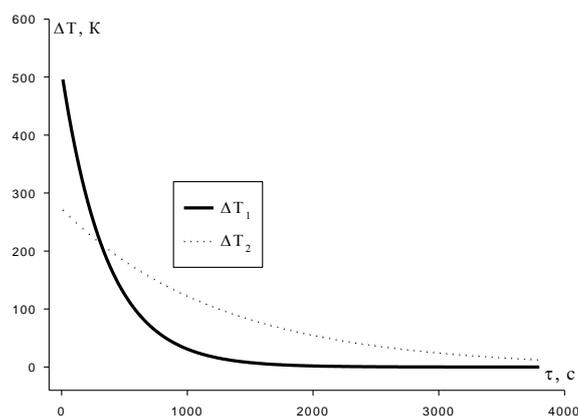


Рис.21. Кривые охлаждения за счет излучательного ΔT_1 и конвективного охлаждения: теплоотдачи ΔT_2 для цилиндрических образцов диаметром 2.0 см.

На рисунке 22 приведена зависимость характерных времён охлаждения от V/S . Как видно из рисунка с увеличением отношения объема цилиндра к его площади поверхности характерные времена охлаждения растут.

На рисунке 23 в качестве примера приведена зависимость скорости охлаждения от температуры для образца диаметром 15 мм из стали марки 45.

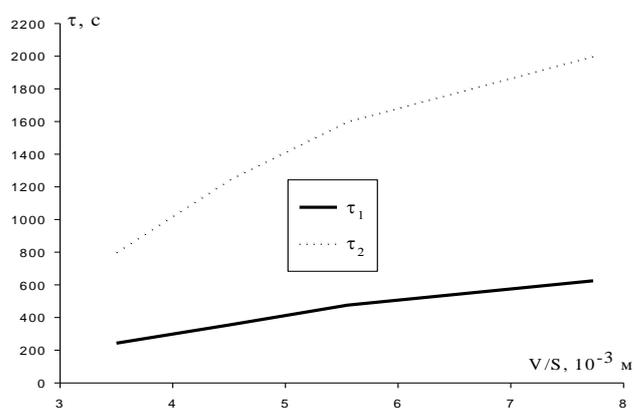


Рис. 22. Зависимости характерных времён охлаждения от V/S для образцов разного диаметра

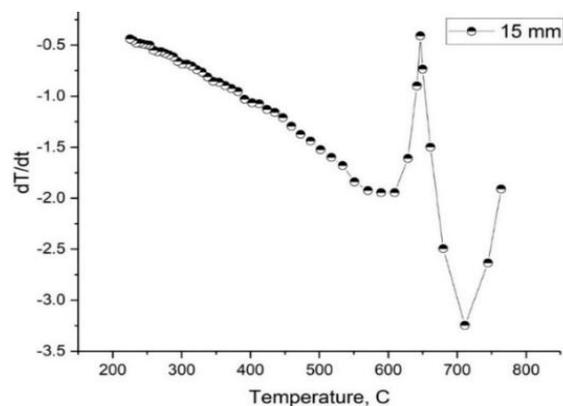


Рис. 23. Зависимость скорость охлаждения от температуры для образца диаметром 15 мм

С помощью программы Sigma Plot 10 обрабатывая экспериментальных данных по зависимости удельной теплоемкости стали 45 от температуры до области фазового перехода получили следующую формулу

$$C(T - 300) = 456,67 + 21x. \quad (22)$$

По формулам (3) и (4) вычислили коэффициенты теплоотдачи. На рисунке 24 в качестве примера приведены температурная зависимость коэффициентов излучательной α_1 и конвективной α_2 теплоотдачи для образца $d = 1,5$ см.

Температурная зависимость удельной теплоемкости чувствительна к фазовым переходам первого рода. В таблице 5 приведены температурная зависимость удельной теплоемкости стали 45.

Таблица 5.

Температурная зависимость удельной теплоемкости стали марки 45

| T, K | 373 | 473 | 573 | 673 | 773 | 873 | 973 | 1073 | 1173 |
|--------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|
| C, Дж/(кг К) | 473 | 494 | 515 | 536 | 583 | 578 | 611 | 720 | 708 |

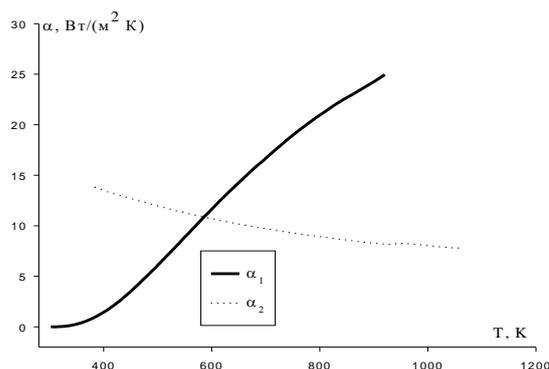


Рис. 24. Температурная зависимость α_1 и α_2 образца диаметром 1,5 см

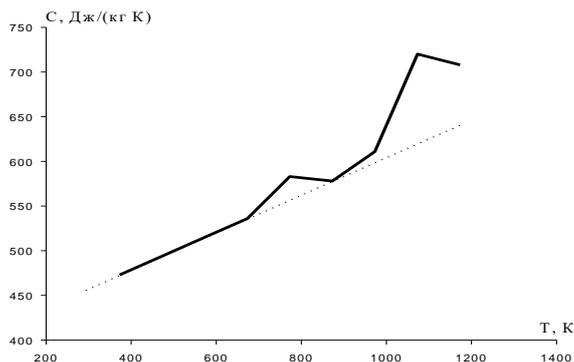


Рис. 25. Зависимость экспериментальных значений теплоемкости стали 45 и вычисленных от температуры.

На рисунке 25 приведены экспериментальные и вычисленные с помощью уравнения $C = 394,67 + 0,21 T$ температурной зависимости удельной теплоемкости стали 45, где в области температуры от 373 К до 1173 К наблюдается две области фазового перехода первого рода. Как видно из рисунка 25 только в области фазового перехода кривые отличаются. На зависимости температуры образца от времени охлаждения происходит перегиб, что свидетельствует о фазовом переходе первого рода в стали 45. 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.

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 отношение скорости кондуктивного переноса тепла к скорости аккумуляции энергии в материале. 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 $\gamma \leftrightarrow \alpha$.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. **Содатдинов Ш.С.**, Низомов З., Саидзода Р.Х., Шарипов Дж.Г. Влияние высоты цилиндрических образцов из латуни Л63 на кинетику их охлаждения. - Вестник Таджикского национального университета. Серия естественных наук.- 2023. - №1. - С.170-184. ISSN 2413-452X
2. Низомов З., **Содатдинов Ш.С.** Однородность температурное поле в образце из алюминия марки А5N сложной формы. - Вестник национального университета. Серия естественных наук. 2025. Вып.3.- С. 119-127. ISSN 2413-452X

3. Мирон И.О., **Содатдинов Ш.С.**, Акромов М.Б. Рентгеноспектральный анализ образцов доэвтектических сплавов алюминия системы Al-Si-Me. - Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. - 2022. - Вып. № 4 (60). - С. 76-80. ISSN 2520-2227
4. Z. Nizomov, **Sh. Sodatdinov**, R.Kh. Saidzoda, D. Nematov Influence of the Height Value of Cylindrical Specimens of Copper Grade M3 on the Kinetics of Their Cooling and Heat Transfer Processes // Engineering Science & Technology 2024-04-25 | Journal article | Author DOI: [10.37256/est.5220244118](https://doi.org/10.37256/est.5220244118) Part of ISSN: [2717-5243](https://doi.org/10.37256/est.5220244118)
5. Nizomov Z., **Sodatdinov S.**, Saidzoda R., Nematov D. Analysis of Thermal Isotropy of Parallelepiped Shape of Bronze Samples for Mechanical Engineering Applications. - Journal of Modern Industry and Manufacturing, 2024; 3-9. <https://doi.org/10.53964/jmim.2024009>
6. **Содатдинов Ш.С.** Влияние высоты цилиндрических образцов из меди марки М3 на кинетику их охлаждения. - Вестник филиала МГУ им. М.В. Ломоносова в г. Душанбе, серия естественных наук. 2022. - Т.1, №3(25). - С.72-79. ISSN 2709-6238.
7. Малый патент №ТJ 1648 (Республика Таджикистан). Установка для определения теплофизических свойств металлических материалов / З. Низомов, Ш.С. Содатдинов, И.Т. Турахасанов, Дж. Г. Шарифи, И.О. Мирзода, М.М. Комилов. - Приоритет изобретения от 02.07.25.

Публикации в материалах научных конференций

8. Turakhasanov I.T., Nizomov Z., **Sodatdinov Sh.S.** Mirzoev F.M. Effect of the size of AV 98 aluminum cylindrical specimens of the cooling kinetics. - "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.
9. **Sodatdinov SH.S.**, Nizomov Z., Gulov B.N., Toshkhodzhaev KH.A. Thermal isotropy of parallelepiped bronze specimens.- International Scientific-practical journal. Endless light in science, 2022.-pp.79-87. DOI -10.24412/2709-1201-2022-79-87.

10. Низомов З., **Содатдинов Ш.С.**, Шарипов Дж.Г. Влияние высоты цилиндра на кинетику охлаждения латуни Л63. Матер. VIII Межд. конф. «Современные проблемы физики». Душанбе, 2022. - С. 203-206.
11. Низомов З., **Содатдинов Ш.С.**, Саидзода Р.Х. Зависимость кинетики охлаждения цилиндрических образцов из меди и процессы теплоотдачи от их высоты. - Матер. Межд. науч. конф. «Современные проблемы физики конденсированного состояния». - Душанбе: Изд-во ТНУ, 2023. - С. 98-102.
12. **Содатдинов Ш.С.**, Низомов З., Саидзода Р.Х. Тепловая однородность образцов из бронзы формы параллелепипеда. - Матер. Межд. НПК «Современное состояние взаимодействия науки с производством и инновационное развитие экономики». - Душанбе: «ТОРУС», 2022. - С. 109-116.
13. **Содатдинов Ш.С.**, Низомов З., Гулов Б.Н. Исследование зависимости кинетики охлаждения образцов из бронзы от пространственных осей. - Матер. Межд. конф. «Роль физики в развитие науки, просвещения и инноваций». - Душанбе: Дониш, 2022. - С.151-154.
14. Низомов З., **Содатдинов Ш.С.**, Тошходжаев Х.А. Тепловая изотропность образцов из бронз формы параллелепипеда. - Матер. Межд. НПК на тему “Проблемы и перспективы развития физических наук”. - Худжанд: Дабир, 2025. - С. 24-31.
15. Низомов З., **Содатдинов Ш.С.**, Шарифи Дж.Г. (Шарипов Дж.Г.) Выяснение температуры фазовых переходов в образцах из стали 45. - Матер. Респуб. научно-теоретической конференции преподавателей, сотрудников НИИ ТНУ. – Душанбе: «Типография ТНУ», 2024. – С. 4-7.
16. Низомов З., **Содатдинов Ш.С.**, Шарифи Дж.Г. Кинетика охлаждения цилиндрических образцов разного диаметра из стали марки 45. - Там же. -С.66-70.
17. Низомов З., **Содатдинов Ш.С.**, Комилов М.М., Шарифи Дж.Г. Исследование фазового перехода в образцах из стали 45 различного диаметра методом охлаждения. – Матер. Респуб. НПК “Современные проблемы фундаментальной и прикладной физики”. - Худжанд: Дабир, 2025. – С. 29-34.