

**НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ТАДЖИКСКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА**

На правах рукописи

УДК: 538.9

ТУРАХАСАНОВ ИСФАНДИЕР ТУРАХАСАНОВИЧ

**ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА И ФОРМЫ ОБРАЗЦОВ АЛЮМИНИЯ
РАЗЛИЧНЫХ МАРОК НА КИНЕТИКУ ИХ ОХЛАЖДЕНИЯ
И КОЭФФИЦИЕНТЫ ТЕПЛОТДАЧИ**

ДИССЕРТАЦИЯ

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

**Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Саидзода Р. Х.**

Душанбе-2024

СОДЕРЖАНИЕ	Стр.
ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА I. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР. ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА И ФОРМЫ ОБРАЗЦОВ НА ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ. ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ТЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	10
1.1. Влияние примесей на физические свойства алюминия	10
1.2. Влияние размеры образцов на механические свойства металлов	14
1.3. Влияния размера и формы образцов на процессы теплоотдачи	17
1.4. Выводы и постановка задач	26
ГЛАВА II. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ПРИГОТОВЛЕНИЯ ОБРАЗЦОВ	28
2.1. Экспериментальная установка для исследования кинетики охлаждения	28
2.2. Элементный состав образцов и вычисления их теплоемкости по правилу Неймана –Коопа.....	30
2.3. Методика приготовления образцов	33
ГЛАВА III. ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ ИЗ АЛЮМИНИЯ РАЗНЫХ МАРОК НА ИХ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА	35
3.1. Исследование кинетики охлаждения цилиндрических образцов разных диаметров из алюминия марок А0, А5, А6, АВ98 и А5N.....	35
3.2. Исследования коэффициентов излучательной и конвективной теплоотдачи цилиндрических образцов разного диаметра.....	44
ГЛАВА IV. ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА СФЕРИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ АЛЮМИНИЯ РАЗНЫХ МАРОК НА ИХ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА	60
4.1. Исследование кинетики охлаждения сферических образцов алюминия разных марок	60

4.2. Исследование температурной зависимости коэффициентов теплоотдачи сферических образцов	65
4.3. Сравнение температурной зависимости коэффициентов теплоотда- чи цилиндрических и сферических образцов	71
4.4. Обсуждение результатов	78
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ	108
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	110
ПРИЛОЖЕНИЯ	126

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Исследование влияния размеров и конфигурации металлических элементов на процесс их теплообмена с окружающей средой имеет большое значение для понимания особенностей поведения металлов в крупных конструкциях. С этой целью исследователи проводят эксперименты с небольшими образцами в лабораторных условиях. Подобные работы ведутся учёными из разных стран.

Способность алюминия к накоплению тепла сильно варьируется в зависимости от температуры и превосходит аналогичные характеристики других металлов. Благодаря этому свойству алюминий широко используется в промышленности и теплотехнике, что делает его практически незаменимым материалом в ряде случаев.

В настоящее время нет единой теории, которая могла бы полностью объяснить, как размер и форма материала влияют на его теплофизические свойства. В этой ситуации особое значение приобретает экспериментальное исследование процесса охлаждения и зависимости коэффициента теплоотдачи алюминия разных марок от размеров и формы образца. Эти исследования, несомненно, помогут более широкому использованию отечественного алюминия в различных отраслях народного хозяйства Таджикистана и за его пределами.

К моменту начала данной работы в открытых научных источниках нами не было обнаружено сколь-нибудь значительных данных о систематических экспериментах по исследованию влияния формы и размера алюминиевых образцов на их теплофизические свойства. Это ещё раз подчёркивает актуальность выбранной темы исследования.

Концептуально метод охлаждения базируется на законах сохранения энергии и внешней теплопроводности Ньютона-Рихмана. Поскольку градиент температуры внутри объектов исследования практически равен нулю, то вместо дифференциального уравнения теплопроводности Фурье нами использовано балансовое уравнение тепла. В рамках работы были использованы следующие методологические подходы: анализ, синтез, эксперимент, сравнение и обобщение.

ние. Для обработки и интерпретации экспериментального материала применялись методы статистической обработки данных.

Степень изученности проблемы. В работах выдающегося учёного-теплофизика Г. М. Кондратьева и его последователей были подробно изучены нестационарные методы исследования теплоотдачи и способы определения тепловых характеристик материалов. Большой вклад в изучение теплообмена при свободной конвекции внесли Л. Лоренц, В. Бекман, В. С. Жуковский, М. А. Михеев, Л.С. Эйгенсон и др.

В лаборатории физики конденсированных сред им. профессора Б.Н. Нарзуллаева НИИ Таджикского национального университета уже на протяжении ряда лет проводятся исследования теплофизических характеристик металлов и сплавов в широком диапазоне температур с использованием метода охлаждения на образцах цилиндрической и сферической форм различных размеров.

Работа выполнена в соответствии с планами госбюджетных НИР лаборатории физики конденсированных сред им. профессора Б.Н.Нарзуллаева НИИ Таджикского национального университета.

Предметом исследования являются цилиндрические и сферические образцы из алюминия марок А0 (99,0%), А5 (99,5%), А6 (99,6%), АВ98 (98%) и особой чистоты А5N (99,999%) разных размеров.

Цель работы заключалась в опытным определении закономерностей кинетики охлаждения и поведения коэффициентов теплоотдачи образцов алюминия разных марок в зависимости от их формы, размеров и температуры.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

-разработка и сборка экспериментальной установки по регистрации временной зависимости температуры нагретых цилиндрических и сферических образцов из алюминия разного диаметра при естественном воздушном охлаждении с компьютерной обработкой результатов;

-исследование процесса охлаждения цилиндрических и сферических об-

разцов из алюминия марок А0, А5, А6, АВ98 и А5N разного размера в интервале температур 293÷873 К;

-установление закономерностей влияния размера и формы образцов алюминия различных марок на кинетику их охлаждения;

-оценка ролей излучения и конвекции в процессе теплоотдачи в образцах алюминия различных марок;

-сравнительный анализ скоростей охлаждения и коэффициентов теплоотдачи цилиндрических и сферических образцов алюминия;

Научная новизна исследования состоит в том, что впервые:

-изучены процессы охлаждения цилиндрических и сферических образцов алюминия марок А0, А5, А6, АВ 98, А5N разных диаметров;

-проведена численная оценка их характерных времен радиационно-конвективного теплообмена с окружающей средой;

-установлено, что охлаждение путём излучения происходит быстрее, чем конвективным путём, а зависимости характерных времен охлаждения от отношения объёма к площади поверхности образцов нелинейные;

-определены температурные зависимости коэффициентов излучательно-го и конвективного теплообменов цилиндрических и сферических образцов алюминия;

-показано, что коэффициент излучательной теплоотдачи с ростом температуры всё время растёт, в то время как коэффициент конвективной теплоотдачи с температурой сначала растёт, а далее медленно уменьшается;

-обнаружено, что с ростом диаметра образцов коэффициент теплоотдачи алюминия независимо от формы уменьшается, в то же время скорость охлаждения и коэффициент теплоотдачи сферических образцов больше таковых для цилиндрических образцов той же массы.

Теоретическая и практическая значимость результатов заключается в том, что:

- результаты исследования имеют большое значение для понимания процессов охлаждения металлических изделий;

-установленные закономерности изменения скорости охлаждения и коэффициентов теплоотдачи в зависимости от формы и размера образцов представляют интерес для специалистов по энергетике, машиностроению и теплофизике;

-масштабная и форменная зависимости теплофизических свойств алюминия могут стать основанием для модернизации макроскопической теории теплоотдачи металлов;

-данные по температурным зависимостям коэффициентов конвективной и излучательной теплоотдач могут стать существенным дополнением к базе справочных сведений о теплофизических параметрах алюминия.

Выносимые на защиту положения:

-закономерности влияния размера и формы образцов на их охлаждение;

-временные зависимости избыточной температуры термически тонких тел (экспоненциальное падение) для различных отношений площади поверхности теплообмена с окружающей средой к их объемам;

-масштабная и форменная зависимости кинетики охлаждения (характерные времена охлаждения с ростом диаметра образца увеличиваются, их величина за счет излучения меньше, чем за счет конвекции; вклад излучения заметен при высоких температурах- скорость охлаждения за счет излучения больше, чем за счет конвекции);

- масштабная, форменная и температурная зависимости коэффициентов излучательной и конвективной теплоотдач образцов в интервале температур $293 \div 873$ К (для данного объема образца коэффициент конвективной теплоотдачи обратно пропорционален площади теплоотдающей поверхности, а коэффициент излучательной теплоотдачи пропорционален третьей степени температуры поверхности тела);

-качественное соответствие экспериментальных температурных зависимостей коэффициентов лучистого и конвективного теплоотдач с теоретическими, вычисленными по теории подобия для термически тонких тел.

Достоверность и обоснованность 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, аналитическом обзоре литературы, постановке задач исследования, непосредственном проведении экспериментов, анализе и подготовке результатов к публикации и самостоятельном написании диссертации.

Публикации. По итогам работы опубликовано всего 18 научных статей, из которых 6- в изданиях из Перечня ВАК РФ, 2- в изданиях из международной базы данных (Scopus) и 10- в материалах республиканских и международных конференций.

Апробация работы. Основные результаты исследования доложены на: международной научно-практической конференции «Проблемы промышленной интеграции в Центральной Азии» (Душанбе, 2022); VIII Международной конференции «Современные проблемы физики» (Душанбе, 2022); международной научно-практической конференции «Современное состояние взаимодействия науки с производством и инновационное развитие экономики» (Душанбе, 2022); международной научно-практической конференции «Новые достижения в области естественных наук и информационных технологий» (Душанбе, 2023); международной научной конференции «Современные проблемы физики конденсированного состояния» (Душанбе, 2023).

Структура и объем диссертации. Диссертация изложена на 128 страницах компьютерного текста, включает 76 рисунков и 25 таблиц, состоит из введения, 4 глав, выводов и списка литературы из 146 наименований.

Ключевые слова: алюминий, цилиндр, сфера, нагрев, охлаждение, температура, теплоотдача, конвекция, излучение, размер, форма.

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 кратко описаны современное состояние проблемы влияния формы и размеров образцов на их механические и теплофизические свойства, методы расчета радиационно-конвективного теплообмена. На основании проведенного анализа определены направления исследования и сформулирована постановка задачи.

Во второй главе представлено подробное описание экспериментальной установки, предназначенной для изучения процесса охлаждения твёрдых тел с использованием метода «охлаждения». Также в этом разделе представлены методы обработки полученных данных и анализа погрешностей результатов. Все образцы и эталоны были изготовлены в лаборатории ГУП ТАЛКо. Там же был проведён анализ химического состава образцов с использованием спектрометра Spectrolab.

Третья и четвертая главы посвящены изучению влияния формы и размеров цилиндрических и сферических образцов из алюминия разных марок на кинетику их охлаждения и процессы теплоотдачи в широком температурном интервале. Результаты представлены графически и в виде таблиц. С целью установления их достоверности проведено сопоставление с вычисленными значениями коэффициентов теплоотдачи.

В Заключении сформулированы выводы по результатам работы.

ГЛАВА I. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР. ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА И ФОРМА ОБРАЗЦОВ НА ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ. ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ТЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1. Влияние примесей на физические свойства алюминия

Алюминий активно используется в различных сферах производства благодаря своей лёгкости и одновременно высокой прочности, а также способности проводить электричество и тепло [1-9]. В работах [10–33] собраны данные о физических свойствах алюминия. В частности, в справочнике [14] и работах [24–29] можно найти информацию о химическом составе образцов.

Для понимания того, как температура влияет на теплоёмкость металлов, Эйнштейн разработал квантовую теорию теплоёмкости [34–38]. В этой теории атомы в кристаллической решётке представлены как гармонические осцилляторы, которые колеблются с одинаковой частотой.

Э. Грюнейзен [34–38], изучая упругие свойства металлов, пришёл к выводу, что соотношение между коэффициентом теплового расширения металла и его удельной теплоёмкостью не зависит от температуры.

Сазерленд и Э. Маделунг [34-36] установили связь между сжимаемостью кристалла и частотами колебаний его атомов.

Дебай [34–38] кристаллическую структуру рассматривает как система взаимодействующих атомов с совокупностью гармонических колебаний с различными частотами. Согласно теории Дебая, молярная теплоёмкость при постоянном объёме определяется по формуле [34–38]:

$$C_V = 9N_A k \left(\frac{T}{\theta_D} \right)^3 \int_0^{x_m} \frac{e^x x^4 dx}{(e^x - 1)^2},$$

где $x_m = h\nu_{max}/kT = \theta_D/T$, ν_{max} - максимальная частота колебаний атомов, а θ_D - температура Дебая, когда активируются все возможные виды колебаний. При температурах выше θ_D , только амплитуда колебаний будет увеличиваться.

При этом теплоемкость конкретного вещества определяет температура Дебая:

$$\theta_D = \frac{h\nu_{max}}{k}.$$

θ_D связано с физическими характеристиками твердого тела следующим соотношением:

$$\theta_D = 137 \sqrt{\frac{T_{пл}}{AV^{2/3}}},$$

где $T_{пл}$ - температура плавления данного тела, A - атомная масса и V - атомный объем элемента.

В материалах со сложной структурой спектр колебаний становится очень сложным и теория Дебая неприменима.

В исследовании, проведенном Низомовым [39] и другими авторами было обнаружено, что основной вклад вносит теплоемкость при постоянном объеме, рассчитанная с использованием теории Дебая. Также было установлено, что экспериментально определенная теплоемкость включает в себя теплоемкость при постоянном объеме по Дебаю, электронную теплоемкость и вклад от термического расширения.

В трудах [27, 40-42] представлены результаты анализа имеющихся экспериментальные данные о температурных зависимостях теплоемкости редкоземельных металлов (РЗМ), щелочноземельных металлов (ЩЗМ) и других металлов с использованием программного обеспечения Sigma Plot 10. Выявлено, что эти зависимости хорошо описываются кубическими уравнениями.

Физические характеристики алюминия сильно зависят от его чистоты [25-29, 43-45]. Примеси с высокой растворимостью в твердом состоянии практически не влияют на механические свойства. Примеси с низкой растворимостью могут образовывать фазы или эвтектики. Например, железо является малорастворимой металлической примесью в алюминии и образует с ним эвтектику. Присутствие железа снижает электропроводность, пластичность и коррозионную стойкость алюминия, но повышает его прочность.

В табл. 1.1 приведена краткая информация о содержании кремния и железа в некоторых марках алюминия [29].

Таблица 1.1

Содержание кремния и железа в определённых сортах алюминия.

Марка	Al, %	Si, %	Fe, %
A995	99,995	0,0015	0,0015
A6	99,6	0,1800	0,2500
A5	99,5	0,2500	0,3000
A0	99,0	0,95	В сумме до 1,0 %

Кремний значительно повышает прочность сплава, формируя с алюминием эвтектику. При температуре 850 К растворимость кремния в алюминии достигает 1,65%, а при 300 К — снижается до 0,05%.

Коэффициент линейного расширения алюминия с повышением температуры увеличивается. В интервале 293-373 К равно $23,86 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, а в интервале 293-773 К - $27,68 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

С ростом чистоты алюминия его плотность уменьшается. Например, при 293 К плотность алюминия 99,25 % составляет 2727 кг/м^3 , а для чистоты 99,9998% - $2698,1 \text{ кг/м}^3$ [29].

В работе [44] дан обзор работ последних лет по теплопроводности металлов и методам ее измерения. С повышением чистоты алюминия его теплопроводность увеличивается. Для технического алюминия марок А5 и А7 теплопроводность при температуре 473 К составляет 209 и 222 Вт/(м·К) соответственно. Присутствие Cu, Mg и Mn в алюминии снижают его теплопроводность.

Температура плавления алюминия растет по мере повышения его чистоты: для 99,2% - 930,0 К и для 99,996 % - 933,2 К.

Проводимость электрического тока алюминия, который содержит 99,99 % чистого вещества, при температуре 293 К составляет 63,7 % от проводимости меди. Для алюминия с содержанием 99,999 % этот показатель равен 65,9 %. Наибольшее отрицательное влияние оказывают примеси Mg, Cr, Mn и Ti [45]

Физические характеристики алюминия определяются в основном такими параметрами, как степень его чистоты, вид обработки, температура испытаний и другие факторы. Чем выше степень чистоты алюминия, тем более пластичным он становится, при этом его прочность и твёрдость снижаются. Модуль упругости алюминия при температуре 293 К для образцов с чистотой 99,25% составляет 69,65 ГПа, а для образцов с чистотой 99,98% — 65,71 ГПа.

В процессе перехода из жидкого состояния в твёрдое, алюминий на воздухе покрывается тонкой оксидной плёнкой. Со временем её толщина может достигать порядка одного микрона. Эта плёнка обладает высокой прочностью и химической инертностью и объясняет его высокую антикоррозионную свойству. В особо чистом алюминии оксидная плёнка прочно сцепляется с основным металлом. Однако в местах расположения примесей это сцепление уменьшается, что приводит к появлению точечной коррозии на поверхности металла. Примеси железа оказывают наибольшее влияние на коррозионную стойкость технического алюминия [46-50].

В работе [25] представлены результаты детального изучения теплофизических характеристик алюминия различных марок и уровней чистоты. Исследования проводились методом «охлаждения» в широком диапазоне температур. Были определены коэффициенты излучения и конвекции, а также оценён их вклад в процесс охлаждения образцов алюминия. Все образцы имели форму цилиндра диаметром 16 мм и высотой 30 мм.

В работах [51–56] приведены результаты экспериментов, которые рассматривают влияния нанокристаллического состояния на механические и теплофизические характеристики металлов.

В работах [57–59] утверждается, что у наноразмерных объектов теплоёмкость должна быть выше, чем у соответствующей объёмной фазы, но не в разы, как это было обнаружено в некоторых экспериментах.

В работах [57–59, 61-63] рассмотрена проблема аномально высоких значений теплоёмкости металлических нанокластеров. На основе анализа результатов моделирования и экспериментальных данных сделан вывод, что увеличе-

ние теплоёмкости в компактных наноматериалах не связано с повышенной теплоёмкостью отдельных кластеров.

В работах [57, 58] проведено сравнение теплоемкости нанокластеров алюминия с экспериментальными значениями теплоемкостей для алюминия марки А5N, полученными в работе [27]. Сравнение показало разницу примерно в 12 %. Поэтому, для наших объектов исследования можно считать, что их теплоемкость не зависит от объема и формы образца.

1.2. Влияние размеры образцов на механические свойства металлов

В научных трудах [64–78] широко исследуется вопрос о том, как размеры и конфигурация образцов влияют на механические свойства металлов и сплавов.

В ходе исследований, проведённых авторами [65-68], были изучены свойства меди и латуней Л80 и Л63. В результате были выявлены две закономерности в зависимости прочности этих материалов от размера образцов. Во-первых, была обнаружена линейная связь между величиной среднего значения предельных напряжений и величиной абсолютного рабочего объёма образцов.

Второй аспект связан с оптимальным значением рабочего объёма образца, для которого, независимо от его размеров, достигается единое значение предела прочности. Подобный характер зависимости наблюдается для меди и латуни марки Л80 и Л63 при всех области температур. В случае латуней, по сравнению с чистой медью, наблюдается сильный масштабный эффект [69]. Это означает, что для латуней более выражено влияние длины, что приводит к увеличению разницы в показателях прочности образцов одинакового объёма.

Не менее ценные сведения предоставляют масштабные корреляции между деформационно-прочностными характеристиками металлов, такими как отношение длины к диаметру и кратность. Согласно данным, полученным для меди [70], для образцов с одинаковой кратностью можно получить целый спектр значений предела прочности. Увеличение или уменьшение кратности приводит к более стабильному значению предела прочности, которое ограниче-

но сверху значением 255 МПа. Для образцов разной длины это значение прочности достигается при разной кратности, что свидетельствует о влиянии размеров образцов на их механические свойства.

Относительное удлинение — это показатель, который чувствителен к исходным размерам образца и зависит от его толщины. Чем толще образец, тем больше его относительное удлинение, причём это характерно как для обычных пластичных материалов, так и для сверхпластичных.

В процессе увеличения объёма меди и сплавов латуни Л80 и Л63 можно наблюдать разделение прямых линий. Это происходит при достижении определённого оптимального значения объёма, которое ограничивает размер образца. Увеличение относительного удлинения при увеличении диаметра образцов одинакового объёма отражает интенсивность локальной деформации и степень использования пластических свойств материала. Аналогичным образом размеры образцов влияют на величину сопротивления деформации для пластичных материалов, таких как медь. С увеличением кратности образцов медь деформируется при меньших напряжениях [71].

В исследовании [72] было обнаружено, что характеристики пластичности, прочности на разрыв и тип разрушения медных образцов сильно зависят от их размеров.

Экспериментальные данные демонстрируют заметное влияние размера поперечного сечения образца на предел прочности. Для образцов с диаметром 0,1 мм, предел прочности достигает максимума в 255 МПа и остаётся практически неизменным при увеличении длины.

В исследовании [74] сделаны выводы, согласно которым для пластичных материалов существует неоднозначное воздействие величины диаметра и длины образцов на показатели прочности и пластичности. При малых значениях объёма образцов, значение прочности стремится к конкретному значению. С увеличением температуры проявление масштабного эффекта становится заметным. Размеры образцов из пластичных металлов оказывают наибольшее влия-

ние на показатели пластичности. Увеличение диаметра от 4 до 10 мм практически не влияет на равномерное удлинение.

В научных работах [76–78] показано, что показатели пластичности более чувствительны к изменению размеров тела, чем прочностные характеристики.

В результате анализа экспериментальных данных, представленных в литературе, в работе [78] были сделаны следующие заключения:

а) у пластичных металлов, таких как медь и её сплавы с цинком, масштабный фактор связан с развитием локальной пластической деформации, которая приводит к изменению механических свойств материала;

б) у латуней с ростом концентрации цинка увеличивается влияние размера образцов на предел прочности.

в) чем прочнее сплав, тем выше масштабная зависимость предела прочности.

В настоящее время существует множество данных о свойствах материалов, но до сих пор нет единого подхода к пониманию причин, которые определяют влияние размеров детали на её прочность и способность к деформации. Очевидно, что это влияние зависит не только от физических свойств материала, но и от особенностей механического воздействия на объект [77].

Если при одинаковых условиях нагружения материалы с разными размерами сохраняют геометрическое подобие, то их способность противостоять деформации и разрушению будет зависеть от размера. Этот феномен известен как масштабный эффект или масштабный фактор.

Характеристики материала, который воплощён в реальное изделие могут существенно отличаться от тех, что определяются путём испытаний стандартных образцов в стандартных условиях. Эти различия могут быть вызваны особенностями конструкции. Различия в размерах образца и детали могут привести к разным уровням запаса упругой энергии, различным состояниям поверхностей и временным зависимостям свойств материала в процессе эксплуатации. Изменение формы и размеров детали из одного и того же материала может значительно повлиять на её термостойкость. Сильное влияние конструктивной

формы позволяет сделать вывод, что этот фактор оказывает большее влияние, чем изменение физико-химических свойств материала [75-78].

1.3. Влияния размера и формы образцов на процессы теплоотдачи

Теплофизические характеристики материалов и изделий необходимо учитывать, как при проектировании и создании различных объектов, так и при их последующей эксплуатации. Интерес к данной проблеме практически не ослабевает последнее столетие.

Исследование свободной конвекции посвящено множество теоретических и экспериментальных работ [79-98]. Основной целью при расчёте свободноконвективного потока газа на твёрдой поверхности является определение коэффициента конвективного теплообмена. Этот коэффициент характеризует интенсивность теплообмена на рассматриваемой поверхности и зависит от температуры, определяющий размер, физические свойства газа и другие факторы.

В работах [79–83] подробно описана теория конвективного теплообмена.

В работах [89–98] изучено, как теплофизические свойства газа влияют на интенсивность теплообмена возле твёрдой поверхности. В работе [95] численно исследован теплообмен в вертикальном канале при неравномерном нагреве с учётом зависимости теплофизических свойств воздуха от температуры. В этих работах изучалась система дифференциальных уравнений, описывающих процессы, происходящие в частных случаях. Эти уравнения основаны на законах сохранения энергии, импульса и массы. Для каждого конкретного случая получена зависимость числа Нуссельта от определяющих параметров.

Теплоперенос может осуществляться различными по физической природе путями: теплопроводностью, конвекцией и излучением.

Теплопроводность - путь передачи энергии по механизму изменения колебательных состояний атомов (молекул).

Конвекция – это процесс передачи тепловой энергии через движение жидкости или газа, окружающего тело.

При высоких температурах в процессе естественного воздушного охлаждения образцов важную роль играет теплоотдача излучением. Для расчёта коэффициента теплоотдачи излучением используется закон Стефана-Больцмана [99-103].

При расчёте свободноконвективного теплообмена часто возникает задача определения режима движения воздуха, который характеризуется числом Рэлея. Для определения числа Рэлея необходимо выбрать теплофизические свойства из справочных источников для заданной определяющей температуры.

Согласно теории подобия, свободно конвективный теплообмен описывается формулой [87]:

$$Nu = f(Ra)$$

Конвективный коэффициент теплообмена можно рассчитать по формуле:

$$\alpha_k = Nu \lambda / l, \quad (1.1)$$

где Nu - число Нуссельта, λ – коэффициент теплопроводности теплоносителя, l – определяющий размер; $Ra = Gr Pr$ – число Рэлея; $Gr = g\beta \Delta T l^3 / \nu^2$ – 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; ΔT – перепад температуры; c_p – теплоемкость газа при постоянном давлении; ν – кинематическая вязкость газа; μ – динамическая вязкость газа; $a = \frac{\lambda}{c_p \rho}$ – температуропроводность; T – определяющая температура.

В научных работах есть множество аналитических и практических формул для вычисления коэффициента конвективного теплообмена [87-98].

Физические свойства газов при атмосферном давлении достаточно хорошо изучены и зависят только от температуры. Эти данные можно найти в литературе [98, 104–107]. В число Рэлея входит комплекс физических свойств, который зависит от температуры. В работе [98] приведена комплекс $\frac{Gr}{l^3 \Delta T}$ в зависимости от температуры в виде таблицы.

В таблице 1.1 приведены теплофизические свойства воздуха при атмосферном давлении [95].

В таблице 1.1 представлены температурная зависимость физических свойства воздуха при атмосферном давлении [95].

Таблица 1.1

Физические свойства воздуха при атмосферном давлении [95]

T, К	$\rho, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$C_p, \frac{\text{Дж}}{\text{кг К}}$	$\mu, 10^{-5}$ Па с	$\nu, 10^{-5}$ $\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$	$\lambda, 10^{-1}$ $\frac{\text{Вт}}{\text{м К}}$	$\alpha, 10^{-5}$ $\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$	Pr	$\beta,$ 10^{-3}К^{-1}	$\frac{Gr}{l^3\Delta t}, 10^6$ $\text{м}^{-3}\text{К}^{-1}$
300	1,1774	1006	1,963	1,568	2,624	2,216	0,708	3,33	132,9
350	0,9980	1009	2,075	2,076	3,003	2,983	0,697	2,86	65,10
400	0,8826	1014	2,286	2,590	3,365	3,760	0,689	2,50	36,56
450	0,7533	1021	2,484	2,886	3,707	4,222	0,683	2,22	26,15
500	0,7048	1030	2,671	3,790	4,038	5,564	0,680	2,00	13,66
550	0,6423	1039	2,848	4,434	4,360	6,532	0,680	1,82	9,081
600	0,5879	1055	3,018	5,134	4,659	7,512	0,680	1,67	6,215
650	0,5430	1064	3,177	5,851	4,953	8,578	0,682	1,54	4,413
700	0,5030	1075	3,332	6,625	5,230	9,672	0,684	1,43	3,196
750	0,4709	1086	3,481	7,391	5,509	10,77	0,686	1,33	2,388
800	0,4405	1098	3,625	8,229	5,779	11,95	0,689	1,25	1,810
850	0,4149	1110	3,765	9,075	6,028	13,10	0,692	1,18	1,406
900	0,3925	1121	3,899	9,930	6,279	14,27	0,696	1,11	1,104

В работе [86] предполагая, что рассматриваемый газ является идеальным, найдена зависимость числа Рэлея от температуры. Число Рэлея представляется в виде [90]

$$Ra = Pr \frac{g\beta\Delta T l^3}{\nu^2}. \quad (1.2)$$

На основе определения числа Прандтля и коэффициента теплового расширения соотношение (1.2) преобразовано к виду

$$Ra = g \frac{\Delta T}{T} l^3 \frac{C_p \rho^2}{\lambda \mu} . \quad (1.3)$$

Как видно из формулы (1.3), число Рэлея зависит от ускорения свободного падения g , температурного фактора $\frac{\Delta T}{T}$, определяющего размера l и физических свойств воздуха.

Для дальнейшего анализа соотношение (1.3) преобразовано к виду:

$$f_1(T) = \frac{Ra}{\Delta T l^3} = g \frac{1}{T} \frac{C_p \rho^2}{\lambda \mu} . \quad (1.4)$$

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]:

$$\lambda = f_e \mu C_p / \gamma \quad \text{и} \quad \mu = 0,5 v_{ap} \Lambda \rho , \quad (1.5)$$

где f_e – коэффициент Эйкена; C_p – теплоемкость газа при постоянном давлении; v_{ap} – средняя арифметическая скорость движения и Λ – 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]:

$$v_{ap} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} \quad \text{и} \quad \Lambda = \frac{kT}{\sqrt{2} \pi \sigma^2 P \left(1 + \frac{C_S}{T}\right)} , \quad (1.6)$$

где k – постоянная Больцмана; m – масса молекулы газа; σ – эффективный диаметр молекулы газа; C_S – постоянная Сазерленда; P – нормальное атмосферное давление.

Подставляя выражения (1.5)–(1.6) в соотношение (1.3), путем простых преобразований получено [86]:

$$Ra = \frac{g \gamma \pi^3 m \sigma^4 \Delta T \left(1 + \frac{C_S}{T}\right)^2}{f_e k^3 T^4} l^3 P^2 .$$

Введя обозначение:

$$\Omega_P = \frac{g \gamma \pi^3 m \sigma^4}{f_e k^3} P^2 , \quad (1.7)$$

выражение для числа Рэлея можно записать в виде [86]:

$$Ra = \Omega_p \frac{\Delta T \left(1 + \frac{C_S}{T}\right)^2}{T^4} l^3 \quad (1.8)$$

Из формулы (1.8) видно, что число Рэлея зависит от перепада температуры, определяющей температуры и размера образца. Для воздуха $m=4,81 \cdot 10^{-26}$ кг, $\sigma = 3,13 \cdot 10^{-10}$ м, $\gamma = 1,4$, $C_S = 112$ К, $f_e = 1,9$, $\Omega_p = 4,04 \cdot 10^{17} \frac{\text{К}^3}{\text{м}^3}$.

Для сравнения соотношений (1.8) и (1.2) приводим выражение (1.8) в виде, аналогичном (1.4):

$$f_2(T) = \frac{Ra}{\Delta T l^3} = \Omega_p \frac{\left(1 + \frac{C_S}{T}\right)^2}{T^4}. \quad (1.9)$$

В четвёртой главе мы сопоставим экспериментальные и теоретические значения коэффициента конвективного теплообмена, применяя формулы (1.4) и (1.9) для расчёта числа Рэлея.

Практически важной задачей нестационарной теплопроводности является задача о нагреве или охлаждении тел в среде с постоянной температурой. Критерии Био и Фурье являются критериями теплового подобия.

Число Био представляет собой отношение скорости кондуктивного переноса тепла к скорости аккумуляции энергии в материале

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

где α — коэффициент теплоотдачи от поверхности тела к окружающей среде, λ — коэффициент теплопроводности материала тела.

Число Фурье (Fo) — характеризует соотношение между скоростью изменения тепловых условий в окружающей среде и скоростью перестройки поля температуры внутри рассматриваемой системы (тела), который зависит от размеров тела и коэффициента его теплопроводности:

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

где a — коэффициент теплопроводности, τ — характерное время изменения внешних условий, l — характерный размер тела.

Число Био используется, для определения имеет ли маленькое тело однородную температуру или нет. Для оценки число Био был использован коэффициент суммарной теплоотдачи излучением и конвекцией алюминия в окружающую среду с температурой 293 К [88] (таблица 1.2).

Таблица 1.2. Коэффициент суммарной теплоотдачи алюминия в окружающую среду посредством излучения и конвекции при температуре окружающей среды

$$T_c=293 \text{ К [88]}$$

Температура поверхности, К	Коэффициент теплоотдачи Вт/(м ² К)	Температура поверхности, К	Коэффициент теплоотдачи Вт/(м ² К)
298	8,816	413	16,820
303	9,628	433	17,980
313	10,556	453	19,256
323	11,368	473	20,416
333	12,064	523	23,548
343	12,760	573	26,448
353	13,340	623	30,972
363	14,036	673	35,496
373	14,616	723	40,252
393	15,776	773	45,820

Для температуры 773 К $\alpha = 45,82 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$, коэффициент теплопроводности алюминия $\lambda \approx 200 \frac{\text{Вт}}{\text{м К}}$ и $V/S = 0,306 \text{ см}$ для цилиндра $d=1,5 \text{ см}$ и $h=3,368 \text{ см}$; $Bi=0,0007$. Для выбранных нами объектов исследования, число Био мало ($Bi \ll 0,1$).

В этом случае образец можно считать «тонким с точки зрения теплообмена», а распределение температуры внутри него считать равномерным. В любой момент времени температура внутри такого образца успевает выровняться благодаря интенсивному переносу тепла за счёт теплопроводности. Таким образом, температура зависит только от времени, но не от координат. Поскольку

градиент температуры внутри образца практически равен нулю, вместо дифференциального уравнения теплопроводности Фурье мы будем использовать уравнение теплового баланса.

Количество энергии δQ , которое теряет предварительно нагретое тело массой m при снижении температуры на dT градусов, составляет [19].

$$\delta Q = C\rho VdT. \quad (1.10)$$

В этом уравнении ρ , V и C — это плотность, объём и удельная теплоёмкость вещества соответственно.

Количество теплоты, которое теряется через поверхность в течение промежутка времени $d\tau$, прямо пропорционально этому времени, площади поверхности теплообмена с окружающей средой S и разности температур образца T и окружающей среды, T_c .

$$\delta Q_s = -\alpha(T - T_c)Sd\tau, \quad (1.11)$$

где α - коэффициент общей теплоотдачи.

Уменьшение энергии, аккумулированной в теле, должно быть равно тепловому потоку, отводимому от его поверхности конвекцией $\delta Q = \delta Q_s$.

$$C\rho VdT = -\alpha S(T - T_c)d\tau. \quad (1.12)$$

В этом случае изменение избыточной температуры тела описывается дифференциальным уравнением:

$$C\rho V \frac{d(T-T_0)}{d\tau} = -\alpha S(T - T_0) . \quad (1.13)$$

Разделяя переменные в уравнении (1.13), получим:

$$\frac{d(T-T_0)}{T-T_0} = -\frac{\alpha S}{C\rho V} d\tau = -\frac{S \lambda \alpha}{V \lambda C\rho} d\tau = -\frac{\alpha V S^2 \lambda}{\lambda S V^2 C\rho} d\tau = -Bi \frac{aS^2}{V^2} d\tau, \quad (1.14)$$

где λ – коэффициент теплопроводности окружающей среды.

Обозначим $k = \frac{V}{lS}$, где l -характерный размер тела.

$$\frac{d(T-T_0)}{T-T_0} = -\frac{1}{k} Bi \frac{a}{l^2} d\tau. \quad (1.15)$$

Интегрируя уравнение (1.15), получим:

$$\int_{(T-T_0)_{\tau=0}}^{T-T_0} \frac{d(T-T_0)}{T-T_0} = - \int_0^{\tau} \frac{1}{k} Bi \frac{a}{l^2} d\tau.$$

$$\ln \frac{T-T_0}{(T-T_0)_{\tau=0}} = - \frac{1}{k} Bi Fo \quad (1.16)$$

$$T - T_0 = (T - T_0)_{\tau=0} \exp\left(-\frac{1}{k} Bi Fo\right).$$

Введем избыточную температуру $T - T_0 = \Delta T$ и получим

$$\Delta T = (\Delta T)_{\tau=0} \exp\left(-\frac{1}{k} Bi Fo\right). \quad (1.17)$$

Таким образом, при малых значениях числа Bi , уравнение подобия описывается выражением (1.17).

Характерной длиной в задачах теплоотдачи становится тепловая характеристическая длина, то есть отношение между объемом тела и площадью охлаждаемой поверхностью тела:

$$\frac{V}{S} = l \quad \text{и } k=1.$$

Для цилиндра и шара оценим значения $l = \frac{V}{S}$.

Для цилиндра $V = \pi r^2 h$ и площадь поверхности теплообмена с окружающей средой $S = 2\pi r^2 + 2\pi r h = 2\pi r(r + h)$.

$$l = \frac{\pi r^2 h}{2\pi r(r+h)} = \frac{rh}{2(r+h)}.$$

В нашем случае высота цилиндра постоянная $h = \text{const}$

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

Для бесконечного цилиндра $h \gg d$ и $l = \frac{d}{4}$.

Для шара $V = \frac{4}{3}\pi r^3$ и площадь поверхности теплообмена с окружающей средой $S = 4\pi r^2$

$$l = \frac{\frac{4}{3}\pi r^3}{4\pi r^2} = \frac{r}{3} = \frac{d}{6}.$$

Для пластины $V = abc$ и площадь поверхности теплообмена $S = 2ab + 2c(a + b)$. Для тонкой пластины $c \ll a, c \ll b$ и $S = 2ab$.

$$l = \frac{abc}{2ab} = \frac{c}{2}.$$

Как видно из полученных формулы характерный линейный размер отличается для тел различной формы.

Уравнение подобие (1.17) принимает более простой вид

$$\Delta T = (\Delta T)_{\tau=0} \exp(-Bi Fo). \quad (1.18)$$

Экспериментальное исследование охлаждения металлических образцов показывают, что временная зависимость температуры хорошо описывается уравнением [24-28]

$$\Delta T(\tau) = ae^{-b\tau} + ce^{-d\tau}, \quad (1.19)$$

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

Количество теплоты, уходящее за счет конвективного теплоотдачи равно

$$Cm dT_k = -\alpha_k S (T - T_0) d\tau, \quad (1.20)$$

а за счет теплового излучения равно

$$Cm dT_{\text{и}} = -\alpha_{\text{и}} S T d\tau. \quad (1.21)$$

Решение уравнений (1.20) и (1.21) будет следующие выражения

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

$(\Delta T_k)_{\tau=0}$ - 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, $\tau_{\text{и}}$ и τ_k - характерные времена охлаждения для процессов теплоотдачи лучеиспусканием и конвекцией. Процессы теплоотдача излучением и конвекции не зависят друг от друга. Излучения зависит от температуры и степени черноты образца, а конвекция зависит от физические свойства окружающей среды (воздуха).

Общая охлаждения равно сумме охлаждения за счет конвекции и излучения

$$\Delta T = \Delta T_k + \Delta T_{\text{и}}.$$

С учетом излучательной и конвективной теплоотдачи уравнение подобие принимает следующий вид:

$$\Delta T = (\Delta T_k)_{\tau=0} \exp(-\tau/\tau_k) + (\Delta T_{\text{и}})_{\tau=0} \exp(-\tau/\tau_{\text{и}}) \quad (1.22)$$

Во всех выше приведенных уравнениях индексы **к** и **и** указывают на конвективного и излучательного теплоотдачи.

В уравнения (1.13) объем и площадь образца являются его геометрическими характеристиками. Поэтому кинетика охлаждения и процессы теплоотдачи зависят от размера и формы образца.

1.4. Выводы и постановка задач

Из представленных данных следует, что физические и механические свойства алюминия существенно меняются в зависимости от вида и количества примесей, которые негативно влияют на большинство его свойств. Основными примесями, которые образуются в процессе производства алюминия, являются железо и кремний. Они значительно снижают его электропроводность, теплопроводность, пластичность и устойчивость к коррозии.

Коэффициент теплоотдачи является важным параметром при проектировании и использовании теплообменных устройств.

В процессе теплообмена между алюминием и воздухом тепло передается через границу твердого тела и воздуха. Сначала тепло передается через термодиффузию — это перенос молекулами воздуха тепла на участок со средним температурой. Затем тепло переносится через конвекцию, которая возникает в окружающей среде - воздухе.

Коэффициент теплоотдачи, как и любой другой параметр, зависит от многих факторов, среди которых форма и состояние поверхности алюминия играют значительную роль и его можно определить экспериментально. Причем эти факторы также взаимосвязаны между собой. Знание этого коэффициента позволяет более эффективно проектировать системы теплообмена, которые используют алюминиевые конструкции. Состояние поверхности алюминия тоже имеет значение. Суммируя вышесказанное, можно сделать вывод, что форма, размер и состояние поверхности алюминия существенно влияют на коэффициенты теплоотдачи. Температура тела и воздуха, которая его окружает, также влияет на коэффициент теплоотдачи.

Один из методов измерения коэффициента теплоотдачи является метод охлаждения тела. Он основывается на охлаждении тела за счет передачи тепла окружающей среде. Замеряя временную зависимость температуры тела и окружающей среды, можно также определить коэффициент теплоотдачи.

Теоретическое исследование этой проблемы чрезвычайно затруднено из-за наличия многочисленных взаимосвязанных процессов, которые протекают при охлаждении деталей в реальных условиях. Отсюда возникает необходимость исследования рассматриваемой проблемы экспериментальным путем. Тела простой конфигурации, такие как цилиндр, сфера, куб, часто используются в качестве отдельных элементов сложных устройств, поэтому исследование кинетики охлаждения и оценки коэффициентов теплоотдачи этих тел представляет как научный, так и прикладной интерес.

Анализ научных источников демонстрирует, что вопрос о взаимосвязи между теплофизическими свойствами материалов и их формой и размерами остаётся малоизученным. Это в равной степени относится и к алюминию, и к его сплавам. В связи с этим становится актуальным исследование того, как размер и форма образцов из алюминия разных марок влияют на скорость охлаждения и процессы теплопередачи.

ГЛАВА II. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ПРИГОТОВЛЕНИЯ ОБРАЗЦОВ

2.1. Экспериментальная установка для исследования кинетики охлаждения

Методы, которые позволяют измерять теплофизические свойства в условиях постепенного нагрева или охлаждения, часто называют динамическими. Они дают возможность определить, как теплофизические свойства образца изменяются в зависимости от температуры [113-124]. Однако обеспечить постепенное изменение температуры образца в процессе нагрева очень сложно из-за множества внешних факторов. Кроме того, существующие методы измерения теплофизических характеристик нестационарные, что приводит к большому шагу изменения температуры и искажает истинную картину температурного поведения исследуемого параметра.

Наиболее подходящим методом для изучения теплофизических свойств твёрдых образцов является режим «охлаждения».

Исследование изменение температуры образцов в зависимости от времени охлаждения проводилось на специальном оборудовании, схема которого представлена на рисунке 2.1. Образец (2) представлял собой шар или цилиндр с просверлённым тонким каналом для термопары (3). Концы термопары были подключены к цифровому мультиметру UT71B с ценой деления для температуры $\pm 0,1$ °C (4). Мультиметр, в свою очередь, был соединён с компьютером (7), что позволяло сразу же фиксировать результаты измерений в виде таблицы.

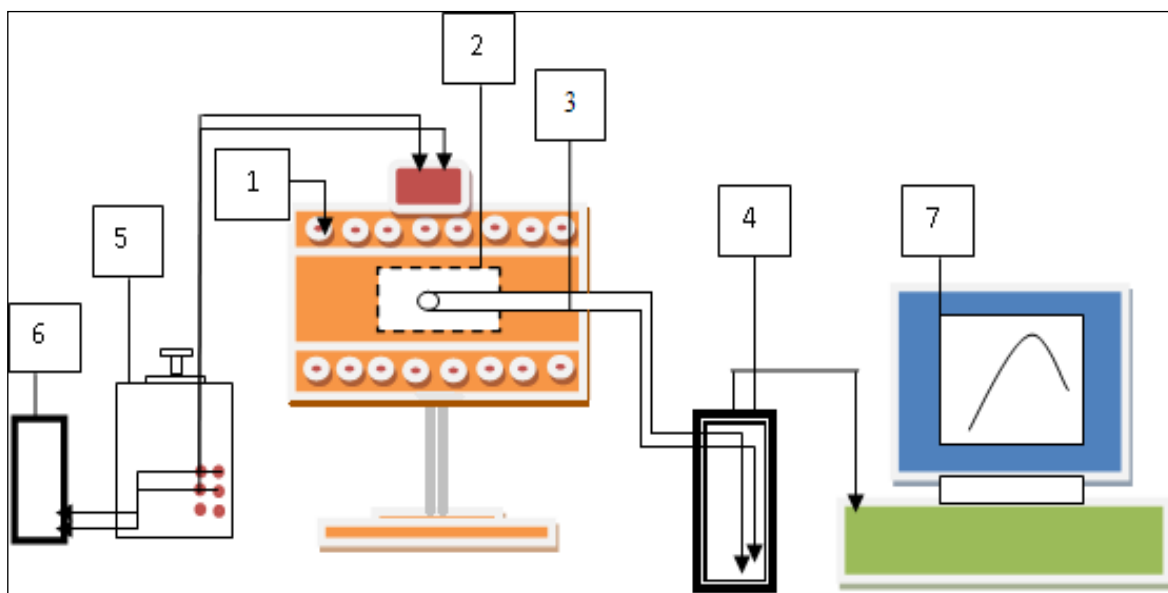


Рис. 2.1. Схема экспериментальной установки:

1- электропечь; 2- образец; 3- термопара; 4- Digital Multimeter UT71B;
5- ЛАТР; 6 - Digital Multimeter DI 9208; 7- компьютер.

Печь включалась через лабораторный автотрансформатор (ЛАТР) (5) установкой напряжения в 30 В (по показаниям измерителя Digital Multimeter DI 9208 L) (6). После достижения предварительно задаваемой максимальной температуры печи образец вдвигается в рабочую камеру и производится нагрев до температуры, чуть ниже температуры плавления алюминия. После достижения требуемой температуры (620 °С) образец быстро выдвигается из рабочей камеры и в момент достижения его температуры значения 600 °С включается автоматический отсчет времени остывания, одновременно фиксируется значение температуры окружающей среды. На компьютере каждые 10 секунд автоматически регистрировалась температура образца до тех пор, пока она не достигала значения 35–40 °С. Результаты измерений отображались на компьютере в виде таблицы, показывающей зависимость температуры от времени ($T = f(t)$).

Погрешность измерения температуры в диапазоне от 40 до 400 градусов Цельсия составляла не более 1%, а в диапазоне от 400 до 1000 градусов Цельсия — не более 2,5%.

Перед каждым циклом измерений мы проверяли работоспособность установки, используя эталонную кривую охлаждения меди.

В процессе изучения кинетики охлаждения объектов в диапазоне температур от 293 до 873 К применялся закон Ньютона-Рихмана [79], согласно которой скорость охлаждения определяется теплоёмкостью тела C и коэффициентом теплоотдачи α .

Температуру окружающей среды можно считать постоянной (T_0).

В исследованиях [24,129-131] установлено, что показатели теплообмена у различных металлов не совпадают.

В процессе исследования мы сначала рассчитали теплоёмкость алюминия различных марок по закону Неймана-Коппа. Затем, опираясь на данные о скорости охлаждения для каждого случая теплообмена, мы определили коэффициенты теплоотдачи для разных температур.

2.2. Элементный состав образцов и вычисления их теплоемкости по правилу Неймана –Коппа

Химический состав образцов алюминия марок А0, А5, А6, АВ98 и А5N определялся на спектрометре «Spectrolab» в Спектральной лаборатории Государственно-унитарного предприятия Таджикской алюминиевой компании (ГУП ТАЛКО).

Обозначения марок отражают только сотые доли процентов содержания чистого металла, так как оно всегда выше 99%. Особо чистый алюминий 99,999% обозначается А999 или А5N. Технический алюминий А0, А5, А6, А7 используется для проводов, прокладок и приготовления сплавов. Сплав АВ98 (авиаль) на 98% состоит из алюминия и магния и на 2 % из других примесей. Авиалью называют алюминиевые деформируемые сплавы тройной системы Al-Mg-Si.

В таблице 2.1 приведен химический состав разных марок алюминия.

Химический состав алюминия разных марок

	<i>Si</i>	<i>Fe</i>	<i>Cu</i>	<i>Mn</i>	<i>Mg</i>	<i>Zn</i>	<i>Ti</i>	<i>V</i>	<i>Ga</i>	<i>Al</i>
A0	0,29	0,56	0,0004	0,004	0,004	0,01	0,01	0,01	0,01	99,11
A5	0,20	0,18	0,0003	0,004	0,003	0,009	0,008	0,02	0,01	99,59
A6	0,17	0,17	0,0004	0,004	0,003	0,009	0,009	0,01	0,01	99,64
AB98	0,43	1,43	0,001	0,006	0,007	0,01	0,01	0,02	0,01	98,09
A5N										99,999

Разные марки алюминия, в целом, подчиняются правилу Неймана и Коппа и их теплоемкость можно подсчитать на основании аддитивного сложения теплоемкостей составляющих [19].

Для того чтобы определить теплоёмкость алюминия различных марок в соответствии с правилом Неймана-Коппа, необходимо знать температурную зависимость его компонентов. В работе [41] с помощью программы Sigma Plot 10 обработаны литературные данные о теплоёмкости алюминия, железа, кремния, цинка, меди, магния, марганца и титана при разных температурах. В результате было получено уравнение, описывающее температурную зависимость удельной и молярной теплоёмкостей. Для удобства использования в инженерных расчётах, использовано зависимость теплоемкости от переменной $x = (T - 300) / 100$. После статистической обработки графика $C(T)$ от x с помощью программы Sigma Plot 10 получена следующая формула [41]:

$$C(T) = a'_1 + b'_1 x + c'_1 x^2 + d'_1 x^3, \quad (2.1)$$

где: $a'_1 = C(300)$ $b'_1 = b'_0 \cdot 10^2$, $c'_1 = c'_0 \cdot 10^4$, $d'_1 = d'_0 \cdot 10^6$.

В таблице 2.2 представлены коэффициенты в уравнении (2.1) для металлов. В последнем столбце приведены результаты регрессионного анализа, полученные с помощью программы Sigma Plot 10.

Значения коэффициентов в уравнения (2.1) [41]

Металл	a'_1	b'_1	c'_1	d'_1	R
Si	727,73	71,55	-11,00	0,724	1,0000
Fe	448,41	54,10	-7,000	1,300	1,0000
Cu	388,47	17,94	-2,000	0,220	1,0000
Mn	474,33	39,21	-3,000	0,121	1,0000
Mg	1028,69	50,10	-0,370	0,070	1,0000
Zn	393,96	15,52	-0,160	0,760	1,0000
Ti	531,29	21,68	2,000	-0,419	1,0000

Для определения теплоёмкости алюминия марок А0, А5, А6, АВ98 и А5N были применены уравнения, описывающие температурную зависимость теплоёмкости чистых металлов. В результате были получены следующие уравнения для расчёта теплоёмкости алюминия разных марок:

$$C_{A0}(T) = 726,2 + 0,76 (T - 300) - 8 \cdot 10^{-4} (T - 300)^2 + 6 \cdot 10^{-7} (T - 300)^3$$

$$C_{A5}(T) = 728,5 + 0,76 (T - 300) - 8 \cdot 10^{-4} (T - 300)^2 + 6 \cdot 10^{-7} (T - 300)^3$$

$$C_{A6}(T) = 728,6 + 0,76 (T - 300) - 8 \cdot 10^{-4} (T - 300)^2 + 6 \cdot 10^{-7} (T - 300)^3$$

$$C_{AB98}(T) = 721,3 + 0,77 (T - 300) - 8 \cdot 10^{-4} (T - 300)^2 + 6 \cdot 10^{-7} (T - 300)^3$$

$$C_{A5N}(T) = 730,2 + 0,76 (T - 300) - 8 \cdot 10^{-4} (T - 300)^2 + 6 \cdot 10^{-7} (T - 300)^3$$

Эти уравнения были использованы для вычисления коэффициентов теплоотдачи процессов конвективного и излучательного теплообмена исследуемых образцов.

2.3 Методика приготовления образцов

Для исследования из трех основных простых форм (пластина, цилиндр, шар) были выбраны цилиндрические и сферические образцы алюминия разных марок.

Исходные цилиндрические образцы имели диаметр 4 см и высоту 3,368 см. После измерения зависимости температуры образца от времени охлаждения из него на токарном станке модели Pinacho были изготовлены образцы диаметром 3,5 см. Далее все действия были повторены до диаметра образцов 1,5 см.

При приготовлении сферических образцов было соблюдено равенство объема с цилиндрическими образцами $V_c = V_{\text{ш}}$, т.е. $\frac{4}{3}\pi R^3 = \pi r^2 H$,

$$R = \sqrt[3]{\frac{3}{4}r^2 H}. \quad (2.2)$$

В табл. 2.3 приведены радиусы цилиндрических и вычисленные по формуле (2.2) радиусы сферических образцов.

Таблица 2.3

Радиус цилиндрических образцов, см	Радиус сферических образцов, см
1,5	1,765
3,0	2,82
4,0	3,35

Сферические образцы были изготовлены в лаборатории материаловедения Центра исследований инновационных технологий НАН Таджикистана. Для чего сначала из графита изготавливались сферические формы с диаметром полостей 1,765 см, 2,82 см и 3,35 см. Затем предварительно заготовленные цилиндрические образцы расплавлялись и заливались в формы. Массу исследуемых образцов определяли с помощью электронных весов марки GARIN Точный Вес JS3 с наибольшим пределом взвешивания 0,2 кг и точностью взвешивания 0,01 г.

Диаметр цилиндра	Масса, г				
	A0	A5	A6	AB98	A5N
4 см	112,56	106,31	114,57	109,7	109,28
3,5 см	86,09	84	87	85,65	86,1
3 см	63,32	59,8	64,45	61,71	61,47
2,5 см	44,25	42,25	43,2	43,32	43,97
2 см	29	26,7	28,4	28,5	28,8
1,5 см	16,5	15,8	15,9	16,7	16,4

Автор выражает огромную признательность сотруднику Центра исследований инновационных технологий НАН Таджикистана Мухамадризо Исмоилову за оказанную помощь при подготовке сферических образцов и ценную консультацию технического характера.

ГЛАВА III. ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ ИЗ АЛЮМИНИЯ РАЗНЫХ МАРОК НА ИХ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

3.1. Исследование кинетики охлаждения цилиндрических образцов разных диаметров из алюминия марок А0, А5, А6, АВ98 и А5N

Были изучены изменения температуры образцов из алюминия марок А0, А5, А6, АВ98 и А5N с диаметрами 1,5 см, 2,0 см, 2,5 см, 3,0 см, 3,5 см и 4,0 см для каждой марки алюминия. Всего было исследовано 30 образцов. На рисунках 3.1 и 3.2 в качестве примера показаны изменения температуры цилиндрических образцов алюминия марки А0 диаметром 1,5 см и марки А5N диаметром 4,0 см в зависимости от времени охлаждения.

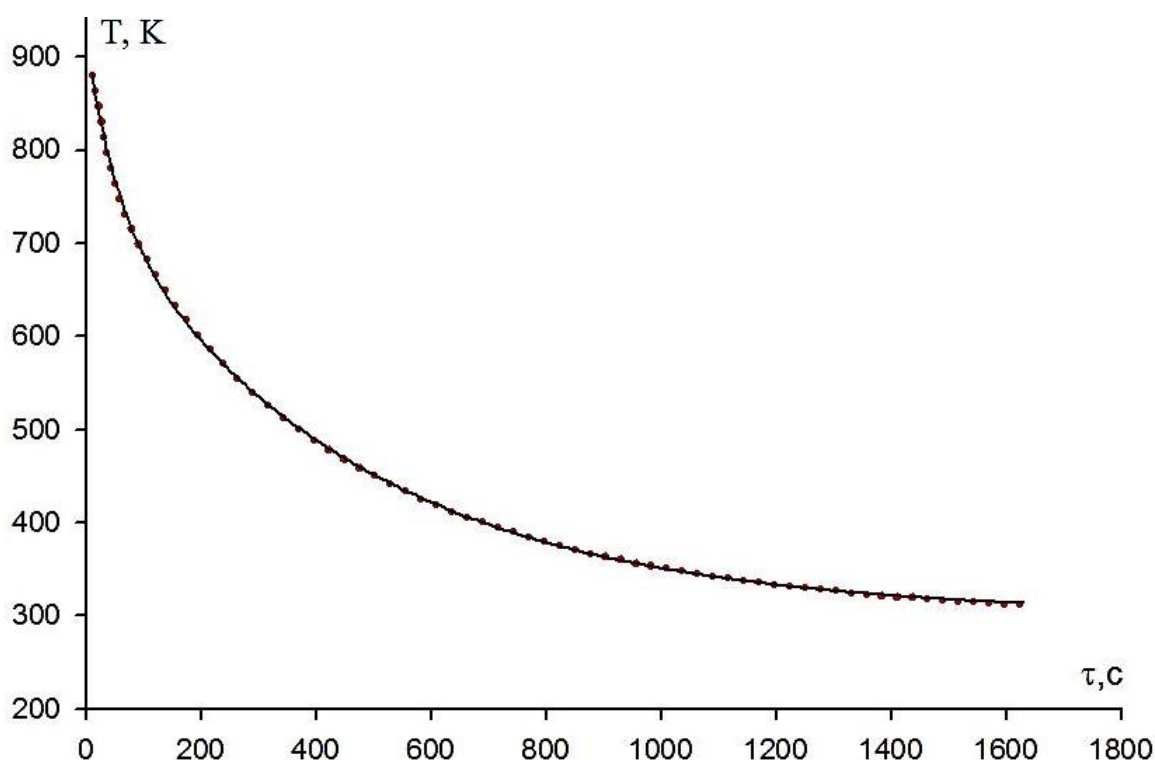


Рис. 3.1. Временная зависимость температуры цилиндрического алюминия марки А0 при естественном воздушном охлаждении $d = 1,5$ см.

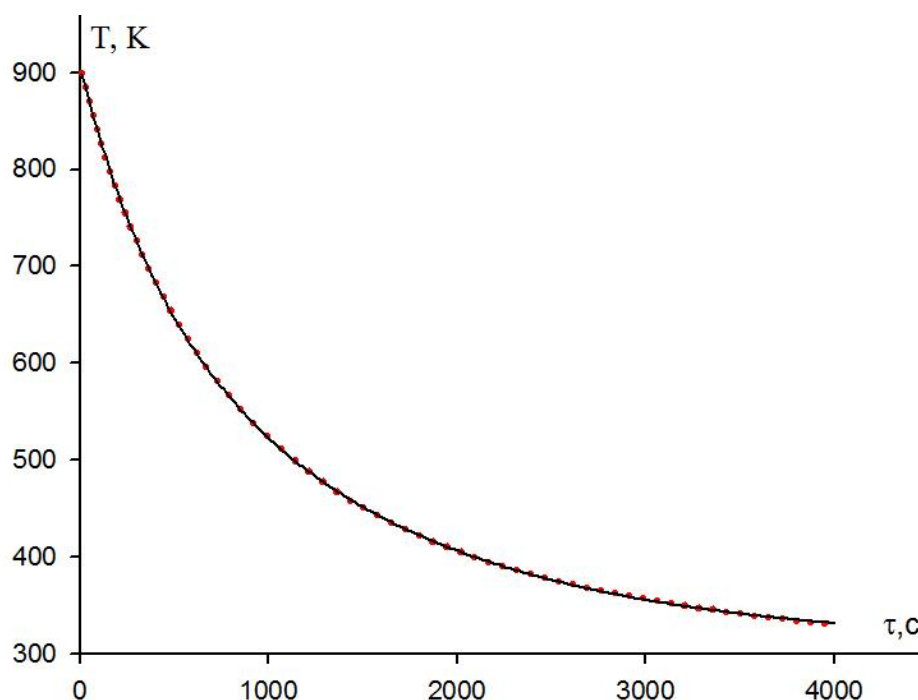


Рис. 3.2. Временная зависимость температуры цилиндрического алюминия марки А5 N при естественном воздушном охлаждении $d=4,0$ см.

После вычитания температуры окружающей среды из измеренных температур образцов были построены графики, отражающие изменение разницы между температурой образца и температурой окружающей среды в зависимости от времени охлаждения. Все вычисления были выполнены на компьютере с использованием программы Microsoft Office Excel. Графики были построены и обработаны с помощью программ Sigma Plot 10. Во всех случаях коэффициент регрессии был не ниже 99,8%. Это свидетельствует о высокой достоверности полученных данных.

В ходе эксперимента были получены временные зависимости изменения температуры образцов относительно окружающей среды. Эти зависимости с высокой точностью (коэффициент регрессии не менее 0,998) описываются уравнением следующего вида [132-138]:

$$\Delta T = (\Delta T)_{\tau=0}^n e^{-\frac{\tau}{\tau_n}} + (\Delta T)_{\tau=0}^k e^{-\frac{\tau}{\tau_k}}, \quad (3.1)$$

где T_0 - температура окружающей среды, $(\Delta T)_{\tau=0}^и$, $(\Delta T)_{\tau=0}^к$ - амплитуды приращения температуры в процессах излучательного и конвекционного охлаждения, $\tau_и$ и $\tau_к$ - характерные времена охлаждения для этих процессов.

Параметр $\tau_i = \frac{\rho CV}{\alpha_i S}$ представляет собой постоянную времени, которая характеризует степень реакции тела на изменение температуры. Коэффициенты теплоотдачи и теплоемкость образца зависят от температуры. Поэтому значение $\frac{\alpha S}{\rho CV}$ относится именно к температуре в 2,71 раз меньше $(\Delta T)_{\tau=0}$ и времени $\tau = \tau_i$.

Для цилиндрических образцов

$$\tau_к = \frac{C \rho}{\alpha_к} \frac{d}{4 \left(1 + \frac{d}{2h}\right)} \quad \text{и} \quad \tau_и = \frac{C \rho}{\alpha_и} \frac{d}{4 \left(1 + \frac{d}{2h}\right)}. \quad (3.2)$$

Для сферических образцов

$$\tau_к = \frac{C \rho d}{\alpha_к 6}, \quad \tau_и = \frac{C \rho d}{\alpha_и 6}. \quad (3.3)$$

Постоянная τ_i определяется как произведение объёма V на теплоёмкость тела C , а также обратно пропорциональна коэффициенту теплоотдачи соответствующего процесса охлаждения и площади S теплоотдающей поверхности с окружающей средой. Из формул (3.2) и (3.3) видно, что величина τ_i зависит от материала образца и типа теплоотдачи, что позволяет использовать её как характеристику охлаждения. Она также зависит от геометрических размеров образца.

$$\tau_i = \tau_i \left(\frac{V}{S} \right).$$

Сравнивая формулы (3.1) и (1.19), получим безразмерные величины

$$N_к = \frac{\tau}{\tau_к} = Bi^к Fo \quad \text{и} \quad N_и = \frac{\tau}{\tau_и} = Bi^и Fo \quad (3.4)$$

Если $\tau = N \tau_к$, тогда $\frac{\Delta T}{(\Delta T)_{\tau=0}} = \frac{1}{e^N}$. При $\tau = \tau_к$ число Био $Bi = \frac{1}{Fo}$

$\tau_к$ и $\tau_и$ - постоянные, численно равная времени, в течение которого разность температур уменьшается в 2.71 раз.

Таким образом, при малых значениях числа Bi , при свободном охлаждении уравнение подобия описывается выражением (3.1). Избыточная температура термического тонкого тела с течением времени уменьшается экспоненциально от начальной $(\Delta T)_{\tau=0}^И$, $(\Delta T)_{\tau=0}^К$ до нуля при $\tau \rightarrow \infty$, и тем быстрее, чем меньше τ_i .

Дифференцируя (3.1), для скорости охлаждения получаем

$$\frac{dT}{d\tau} = - \left(\frac{(\Delta T)_{\tau=0}^И}{\tau_И} e^{-\tau/\tau_И} + \frac{(\Delta T)_{\tau=0}^К}{\tau_К} e^{-\tau/\tau_К} \right), \quad (3.5)$$

где $\frac{(\Delta T)_{\tau=0}^И}{\tau_И}$ и $\frac{(\Delta T)_{\tau=0}^К}{\tau_К}$ соответственно, вклады излучения и конвекции в скорости охлаждения при $\tau = 0$.

Как видно из формул (3.2 и 3.3), характерные времена охлаждения зависят от отношения объема образца к его площади поверхности теплообмена с окружающей средой и коэффициента теплоотдачи соответствующего процесса охлаждения.

$$\frac{\tau}{\tau_i} = \frac{\alpha S \tau}{c \rho V} = \frac{\alpha S \tau}{c \rho V} \frac{\lambda V S}{\lambda V S} = Bi \frac{S^2 \lambda \tau}{V^2 c \rho} = Bi \frac{\alpha \tau S^2}{V^2} = Bi Fo. \quad (3.6)$$

На рисунках 3.3–3.6 представлены изменения общей разности температур образца и окружающей среды ΔT , а также изменения частных разностей этих температур, вызванные охлаждением излучением ΔT_1 и конвективным теплообменом ΔT_2 , для образцов алюминия марок А0, А5, А6, АВ98 и А5N, имеющих различный диаметр.

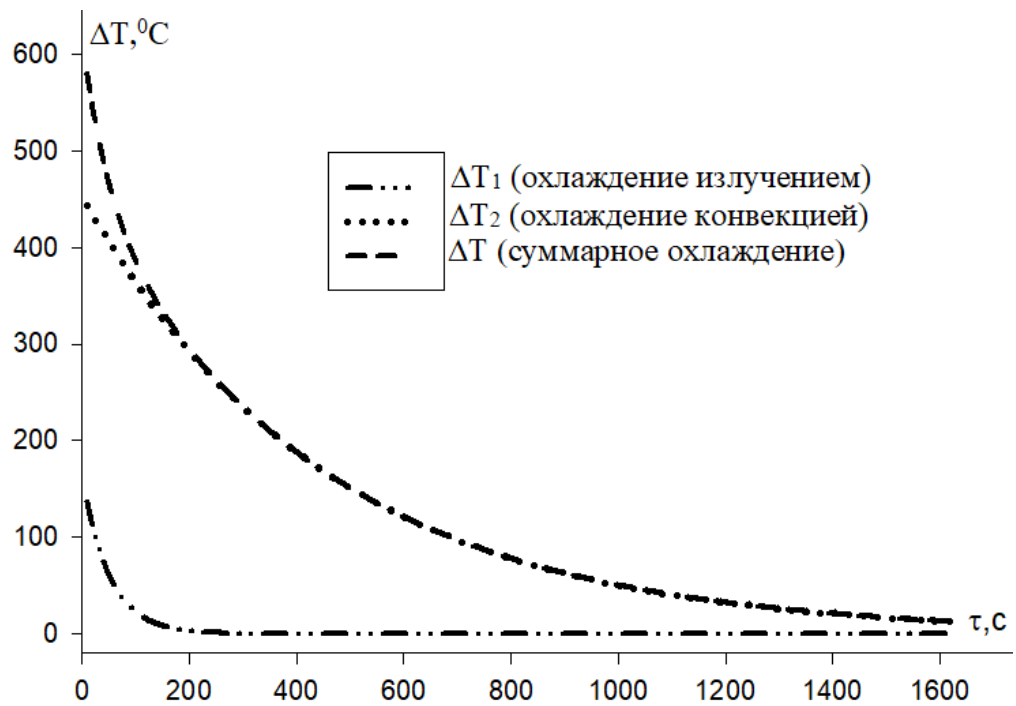


Рис. 3.3. Зависимости общей (ΔT) и частных (ΔT_1 и ΔT_2) разностей температур образца и окружающей среды от времени охлаждения для цилиндрического алюминия марки А0 $d = 1,5$ см.

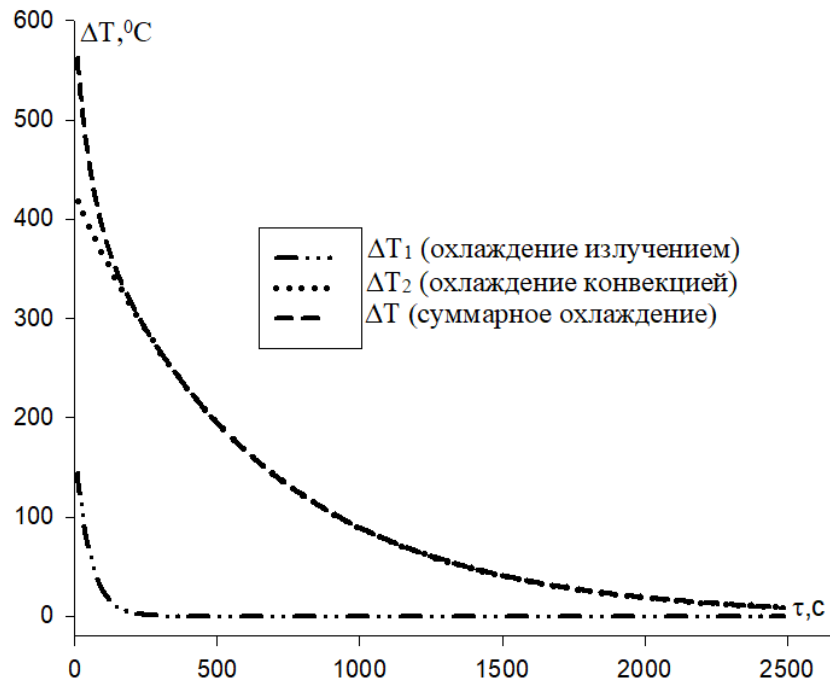


Рис. 3.4. Зависимости общей (ΔT) и частных (ΔT_1 и ΔT_2) разностей температур образца и окружающей среды от времени охлаждения для цилиндрического алюминия марки А5N $d = 2,0$ см.

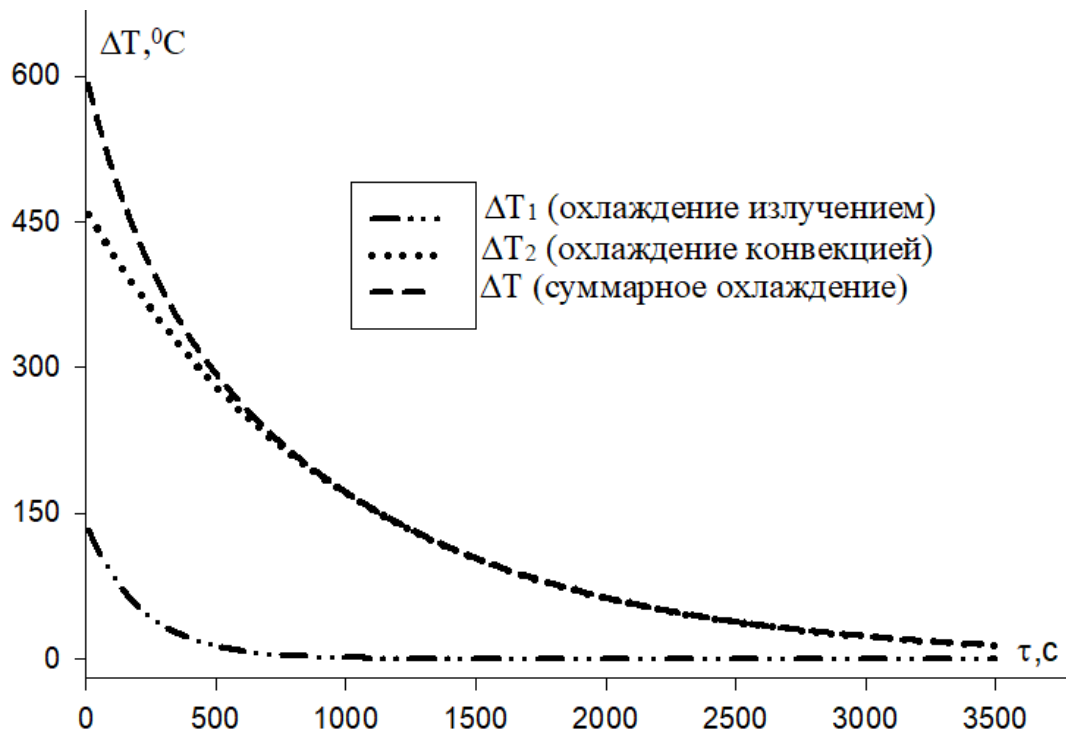


Рис. 3.5. Зависимости общей (ΔT) и частных (ΔT_1 и ΔT_2) разностей температур образца и окружающей среды от времени охлаждения для цилиндрического алюминия марки А5 $d = 3,5$ см.

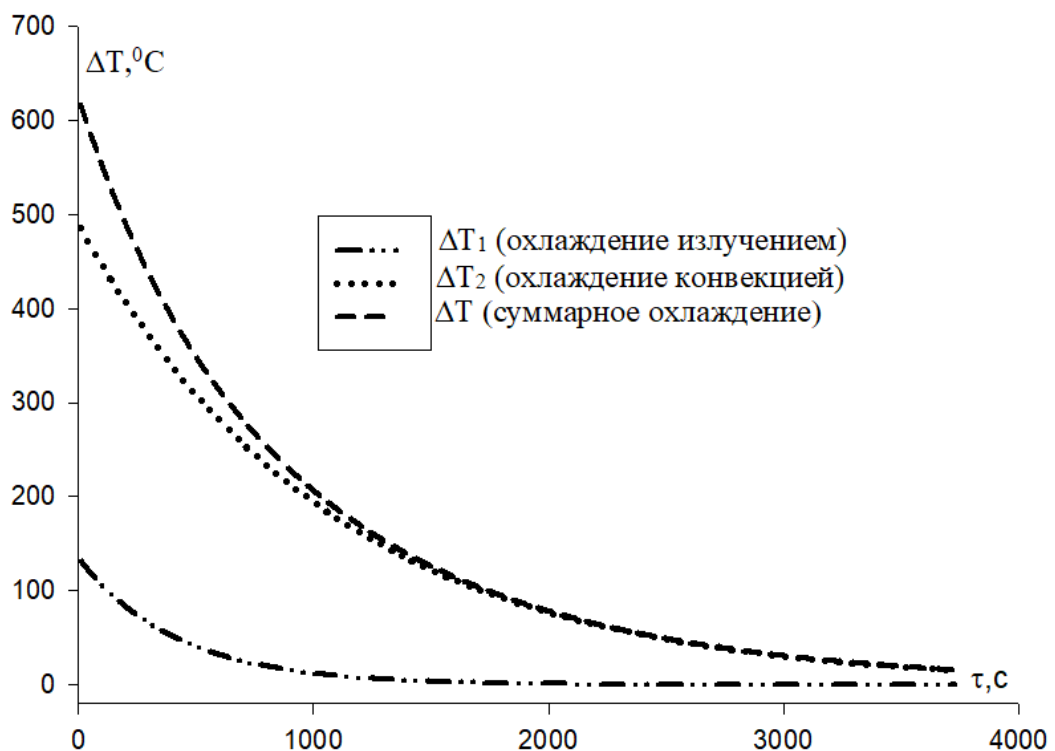


Рис. 3.6. Зависимости общей (ΔT) и частных (ΔT_1 и ΔT_2) разностей температур образца и окружающей среды от времени охлаждения для цилиндрического алюминия марки А0 $d = 4,0$ см.

Как можно заметить на представленных схемах, процесс охлаждения за счёт излучения происходит быстро, в то время как конвективный теплообмен протекает медленнее.

Рассмотренное выше условие $T_c = const$ определяет регулярный режим первого рода. Признак регуляризации режима первого рода состоит в том, что изменение температуры в каждой точке системы происходит по экспоненте, одинаковой для всех точек: $T - T_c = Ce^{-m\tau}$, где $C = const$, m - темп охлаждения, который для малых чисел Био ($Bi \ll 1$) определяется как:

$$m = -\frac{\partial \ln(T - T_c)}{\partial \tau} = \frac{\alpha S}{\rho CV} = \frac{1}{\tau_i}. \quad (3.7)$$

На рисунках 3.7 и 3.8 приведены зависимости темпа охлаждения от времени для цилиндрических образцов из алюминия марки А5N $d=1,5$ см и $4,0$ см соответственно.

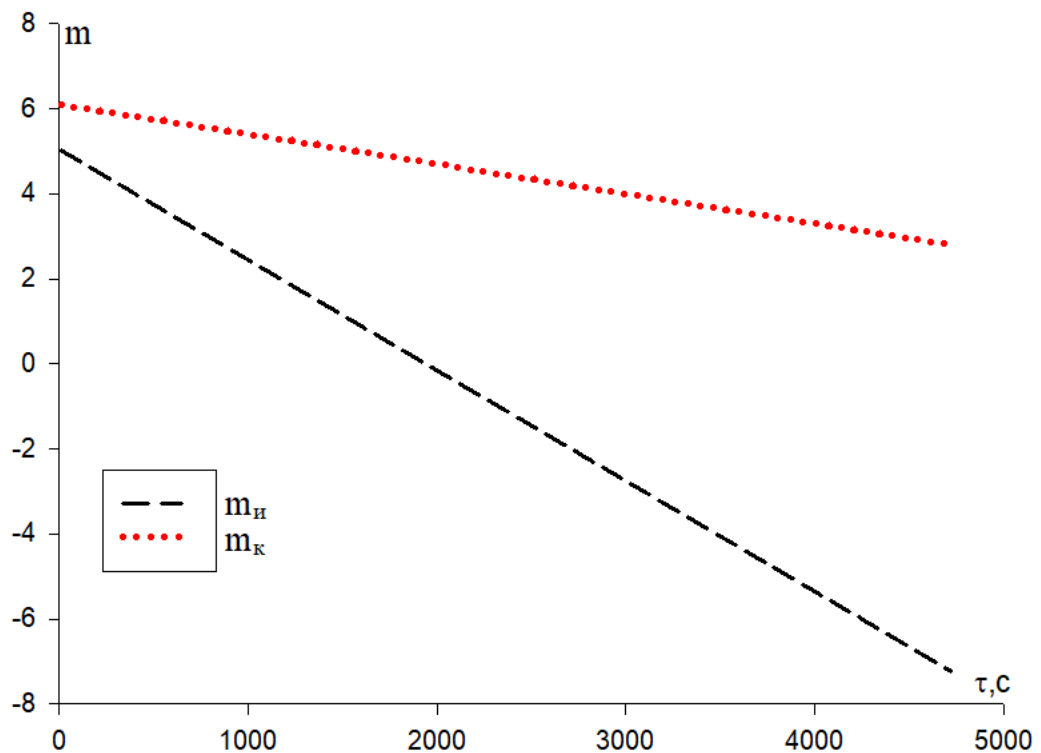


Рис. 3.7. Зависимость темпа охлаждения от времени для цилиндрических образцов из алюминия марки А5N диаметром $d=4,0$ см.

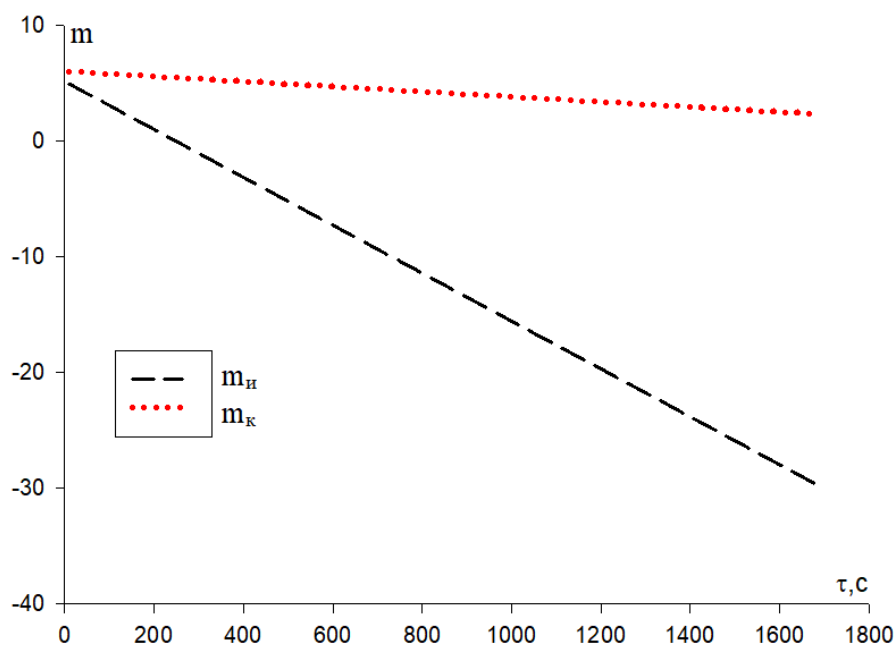


Рис. 3.8. Зависимость темпа охлаждения от времени для цилиндрических образцов из алюминия марки А5N диаметром $d=1,5$ см.

На рисунках 3.9 в качестве примера приведены зависимости скорости охлаждения образца из алюминия марки А5N $d=1,5$ см за счет лучеиспускания $(dT/d\tau)_1$ и конвективного $(dT/d\tau)_2$ теплообменов.

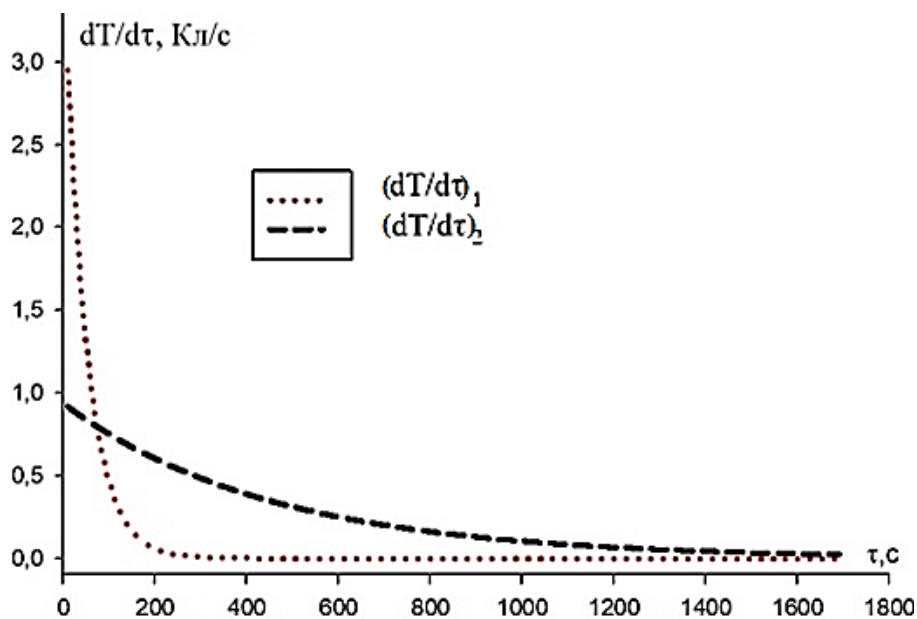


Рис. 3.9. Временные зависимости скоростей излучательного и конвективного охлаждений алюминия марки А5N. $d = 1,5$ см.

Из представленных графиков следует, что процесс охлаждения за счёт излучения быстро прекращается, и в дальнейшем температура образца снижается только благодаря конвективному теплообмену.

В таблице 3.1 представлены константы, которые используются в формуле, описывающей изменение температуры цилиндрических образцов и скорость их остывания в зависимости от времени.

Таблица 3.1

Значение констант в формуле, описывающей изменение температуры цилиндрических образцов и скорость их остывания в зависимости от времени.

Марка	d, см	$T_1 - T_0$, К	τ_1 , с	$T_2 - T_0$, К	τ_2 , с	$(T_1 - T_0)/\tau_1$, К/с	$(T_2 - T_0)/\tau_2$, К/с	t , °C
A0	1,5	167,5	50,00	453,4	454,54	3,35	1,00	16,00
	2,0	132,8	92,59	463,7	625,00	1,43	0,74	20,00
	2,5	118,3	116,28	475,3	769,23	1,02	0,62	24,00
	3,0	122,6	144,90	487,6	909,10	0,84	0,54	22,00
	3,5	134,1	216,53	489,2	1000,0	0,62	0,49	20,00
	4,0	135,0	416,67	490,1	1080,6	0,32	0,45	20,00
A5	1,5	137,9	51,54	462,8	400,00	2,67	1,16	16,00
	2,0	135,3	59,52	462,8	588,23	2,27	0,78	20,00
	2,5	152,0	94,34	450,0	760,33	1,61	0,59	24,00
	3,0	148,4	140,82	452,7	909,10	1,05	0,49	22,00
	3,5	140,0	210,55	462,5	1000,0	0,66	0,46	20,00
	4,0	168,2	384,6	440,4	1092,5	0,44	0,4	24,00
A6	1,5	201,1	44,76	403,2	480,23	4,5	0,84	26,00
	2,0	177,9	74,07	423,5	625,00	2,4	0,67	20,00
	2,5	153,9	110,97	447,7	769,23	1,38	0,58	24,00
	3,0	152,5	164,57	451,0	909,1	0,92	0,49	22,00
	3,5	148,1	250,44	459,3	1020,1	0,59	0,45	20,00

	4,0	154,3	434,78	455,4	1095,6	0,35	0,41	24,00
AV	1,5	164,0	39,84	440,6	454,54	4,12	0,97	16,00
	2,0	166,8	47,39	441,0	660,00	3,52	0,67	20,00
	2,5	163,3	67,57	441,1	820,33	2,42	0,54	24,00
	3,0	156,1	108,20	444,2	940,23	1,44	0,47	22,00
	3,5	155,0	180,64	445,0	1028,0	0,85	0,45	26,00
	4,0	155,0	333,33	445,5	1095,0	0,46	0,43	20,00
A5N	1,5	175,5	48,31	425,3	454,54	3,63	0,93	16,00
	2,0	175,0	51,81	425,1	640,00	3,37	0,66	20,00
	2,5	174,8	76,19	426,9	820,28	2,29	0,52	24,00
	3,0	160,5	116,09	439,7	960,1	1,38	0,46	22,00
	3,5	159,1	180,92	442,41	1111,1	0,88	0,39	26,00
	4,0	155,4	384,61	445,5	1428,6	0,40	0,31	20,00

3.2. Исследования коэффициентов излучательной и конвективной теплоотдачи цилиндрических образцов разного диаметра

Тепло уходит из образца либо конвекцией, либо излучением. Скорость конвекции зависит от температуры поверхности и физические свойства окружающей среды. Скорость охлаждения излучением зависит не только от материала, но и от структуры (в том числе от гладкости) и температуры поверхности. Коэффициент теплоотдачи зависит от величины потока носителя тепла, вида течения, формой поверхности твердого тела. Это комплексная величина, которую невозможно выразить единой формулой. Как правило, коэффициент теплопередачи определяется опытным путём.

Из данных табл. 3.1 видно, что с ростом диаметра образцов алюминия характерные времена охлаждения увеличиваются. Нелинейное увеличение характерных времен охлаждения с ростом величины V/S может быть связано с

уменьшением коэффициента теплоотдачи. Поэтому нами были вычислены коэффициенты общей, излучательной и конвективной теплоотдач.

На основе состава образцов мы применили метод Неймана-Коппа для определения их теплоёмкостей (см. раздел 2.3). Затем, опираясь на полученные значения и экспериментальные данные о скорости охлаждения, мы рассчитали общий коэффициент теплоотдачи $\alpha(T)$ по формуле [138]:

$$\alpha(T) = -\frac{c \rho V \left(\frac{dT}{d\tau}\right)}{S(T-T_0)}, \quad (3.8)$$

конвективный коэффициент теплоотдачи

$$\alpha_k(T) = -\frac{c \rho V \left(\frac{dT}{d\tau}\right)_k}{S(T-T_0)}, \quad (3.9)$$

и радиационный коэффициент теплоотдачи

$$\alpha_p(T) = -\frac{c \rho V \left(\frac{dT}{d\tau}\right)_p}{S(T-T_0)}, \quad (3.10)$$

где V и S – соответственно, объем и площадь поверхности образца, $\frac{dT}{d\tau}$, $\left(\frac{dT}{d\tau}\right)_k$ и $\left(\frac{dT}{d\tau}\right)_p$ – соответственно общий скорость охлаждения, скорость охлаждения за счет конвекции и излучений, T – его температура.

На рисунках 3.10–3.14 представлены графики, демонстрирующие, как общий коэффициент теплопередачи изменяется в зависимости от температуры ($T-300$).

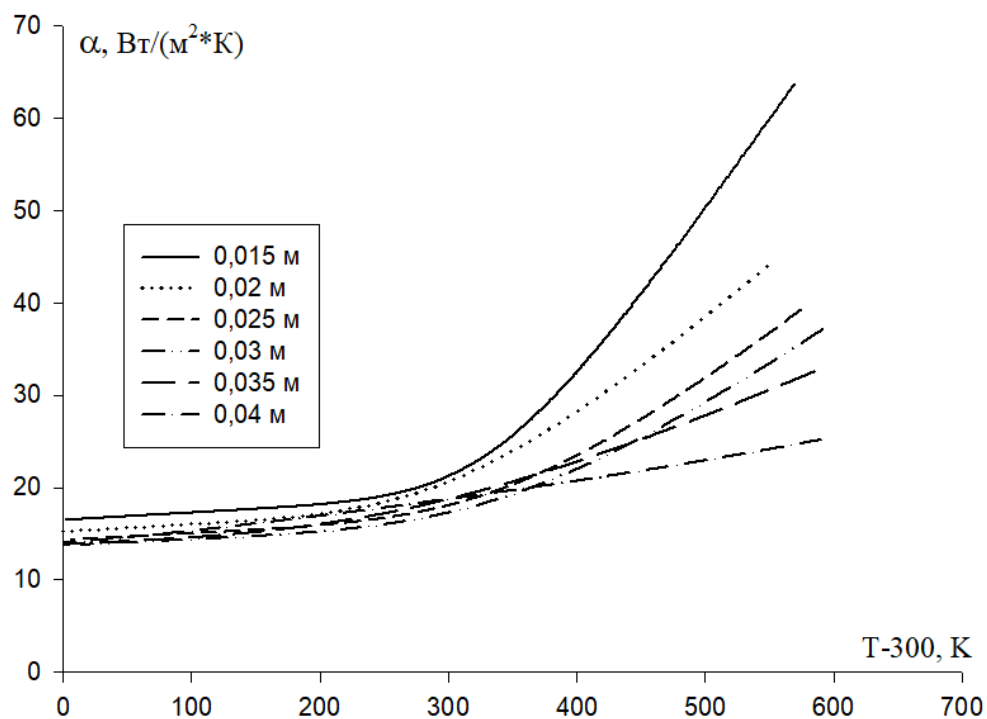


Рис. 3.10. Зависимость коэффициента теплоотдачи цилиндрического образца алюминия марки А0 разных диаметров от $T-300$.

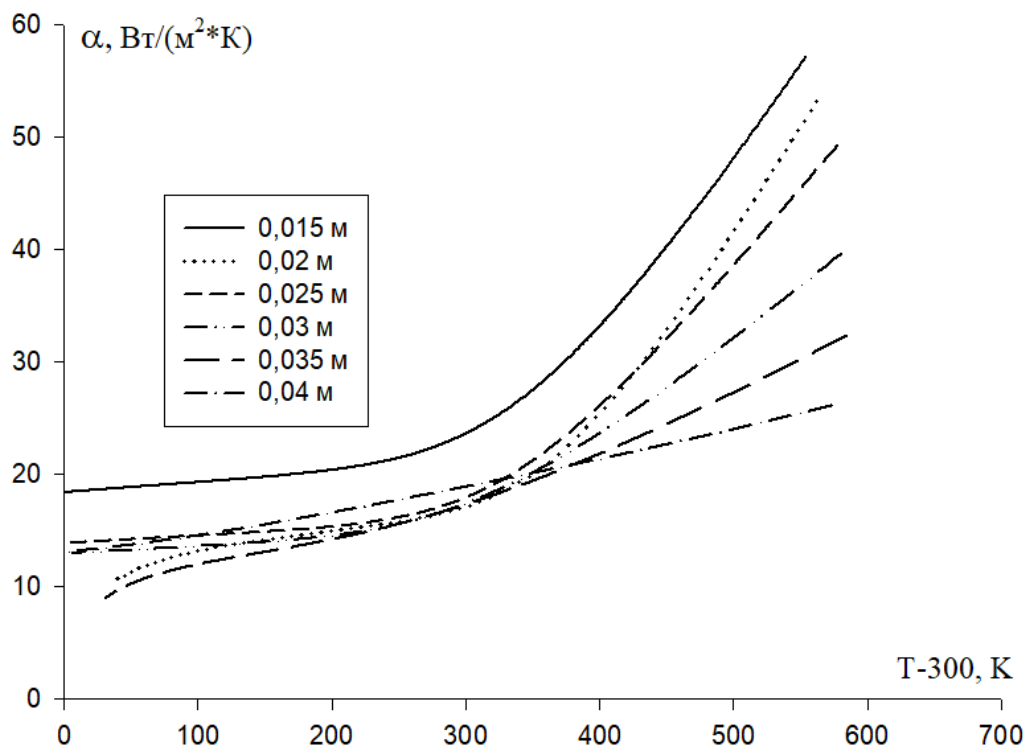


Рис.3.11. Зависимость коэффициента теплоотдачи цилиндрического образца алюминия марки А5 разных диаметров от $T-300$.

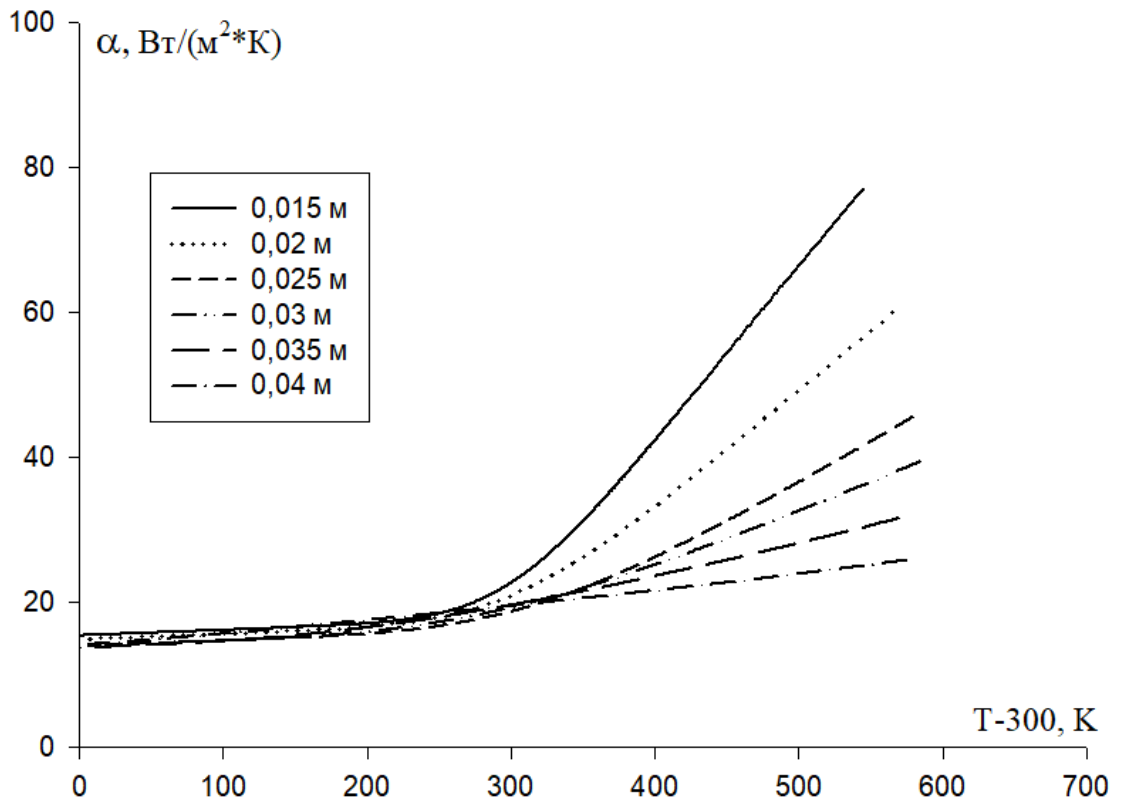


Рис. 3.12. Зависимость коэффициента теплоотдачи цилиндрического образца алюминия марки А6 разных диаметров от T_{-300} .

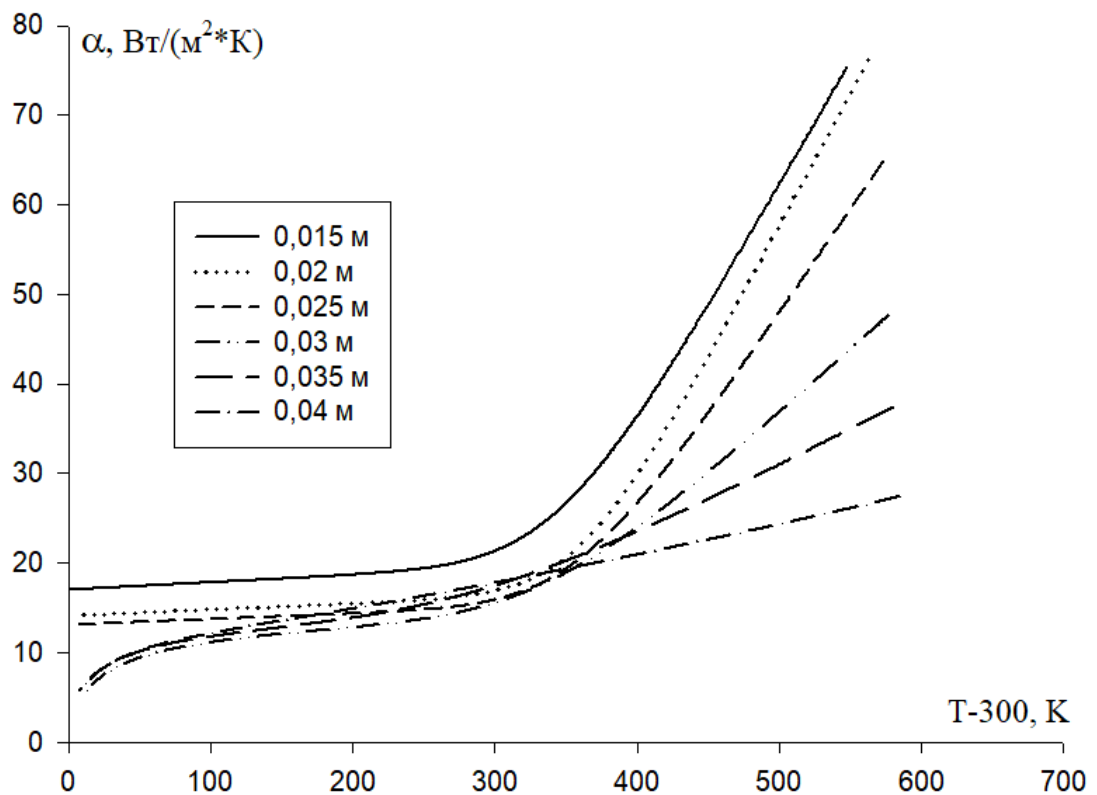


Рис.3.13. Зависимость коэффициента теплоотдачи цилиндрического образца алюминия марки АВ98 разных диаметров от T_{-300} .

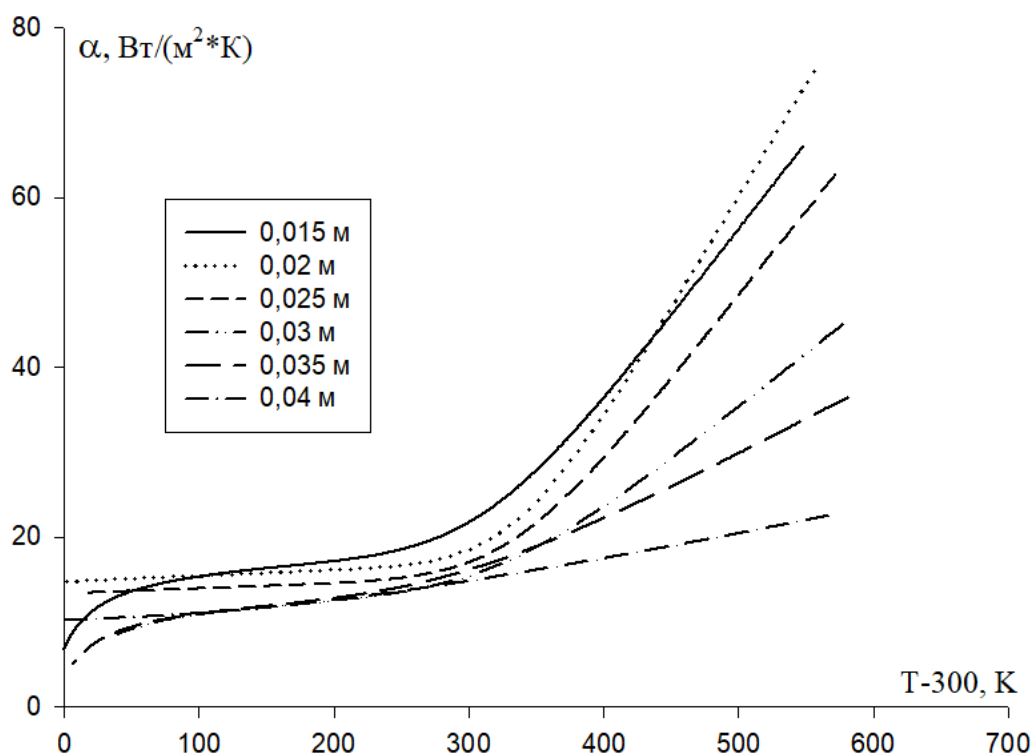


Рис.3.14. Зависимость коэффициента теплоотдачи цилиндрического образца алюминия марки А5N разных диаметров от $T-300$.

Как видно из приведенных рисунков, с повышением температуры коэффициент теплоотдачи увеличивается, а с ростом диаметра образцов уменьшается.

Обработка приведенных графиков с помощью программы Sigma Plot 10 позволила нам получить следующее уравнение температурной зависимости коэффициента теплоотдачи образцов в виде полинома:

$$\alpha(T) = \alpha(T = 300) + a (T - 300) + b (T - 300)^2 + c (T - 300)^3, \quad (3.11)$$

где a , b , c – постоянные величины для данного образца, $\alpha(T = 300)$ - значения коэффициента теплоотдачи при $T = 300$ К.

В табл. 3.2 приведены зависимости коэффициента теплоотдачи образцов из алюминия разного диаметра от $T-300$. В последней графе таблицы приведены коэффициенты регрессии.

Зависимость коэффициента теплоотдачи алюминия разных марок и диаметров от T-300

Марка	d, см	$\alpha(T = 300)$, Вт / (м ² К)	a, 10 ⁻³ Вт / (м ² К ²)	b, 10 ⁻⁵ Вт / (м ² К ³)	c, 10 ⁻⁷ Вт / (м ² К ⁴)	R
A0	1,5	16,51	10,5	-9,28	4,03	0,9976
	2,0	15,28	4,9	-0,70	1,80	0,9989
	2,5	14,36	6,8	-2,79	1,65	0,9992
	3,0	13,81	4,1	-0,84	1,20	0,9993
	3,5	13,85	2,1	4,35	0,15	0,9997
	4,0	13,97	12,0	1,37	-0,04	1,0000
A5	1,5	18,42	11,1	-7,27	3,34	0,9988
	2,0	9,83	53,9	-30,0	5,39	0,9983
	2,5	13,91	6,9	-5,02	2,63	0,9980
	3,0	13,14	-0,2	1,83	1,13	0,9986
	3,5	9,63	20,8	0,25	0,51	0,9994
	4,0	13,09	11,8	3,16	-0,23	0,9999
A6	1,5	15,54	4,6	-8,69	5,58	0,9948
	2,0	15,18	-0,07	-1,23	2,90	0,9967
	2,5	14,21	-0,04	0,90	1,56	0,9982
	3,0	14,18	-2,7	5,41	0,47	0,9990
	3,5	13,71	3,2	6,04	-0,18	0,9998
	4,0	14,11	14,3	1,42	-0,07	1,0000
AB98	1,5	16,79	27,2	-20,0	7,41	0,9971
	2,0	13,56	39,9	-30,0	8,55	0,9958
	2,5	12,79	25,6	-20,0	6,09	0,9965
	3,0	8,84	27,9	-10,0	3,14	0,9974
	3,5	9,96	12,3	2,70	0,63	0,9989
	4,0	8,80	34,4	-2,51	0,36	0,9998

A5N	1,5	13,54	18,0	-8,76	4,39	0,9966
	2,0	14,63	23,7	-20,00	7,30	0,9957
	2,5	13,34	12,0	-10,00	4,77	0,9959
	3,0	8,01	32,7	-10,00	2,95	0,9968
	3,5	9,47	8,8	2,77	0,69	0,9986
	4,0	10,24	3,3	4,81	-0,28	1,0000

На рисунках с 3.15 по 3.19 представлены графики, отображающие температурную зависимость коэффициента излучения для цилиндрических образцов алюминия различных марок и диаметров.

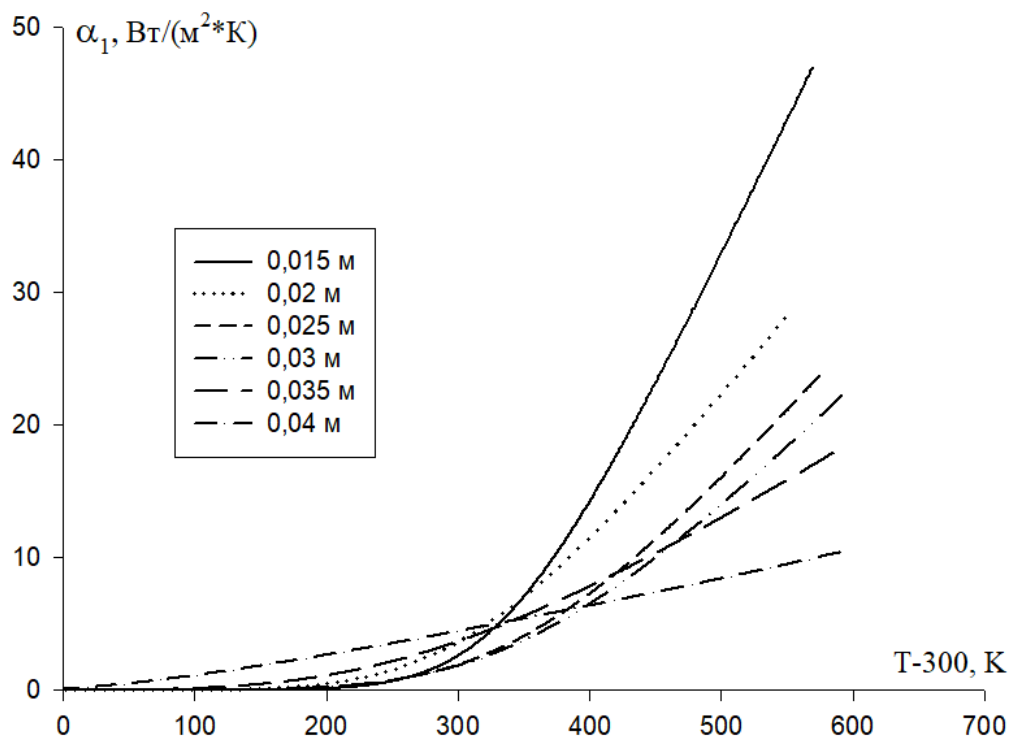


Рис. 3.15. Зависимость коэффициента излучательной теплоотдачи цилиндрического образца алюминия марки А0 разных диаметров от T-300.

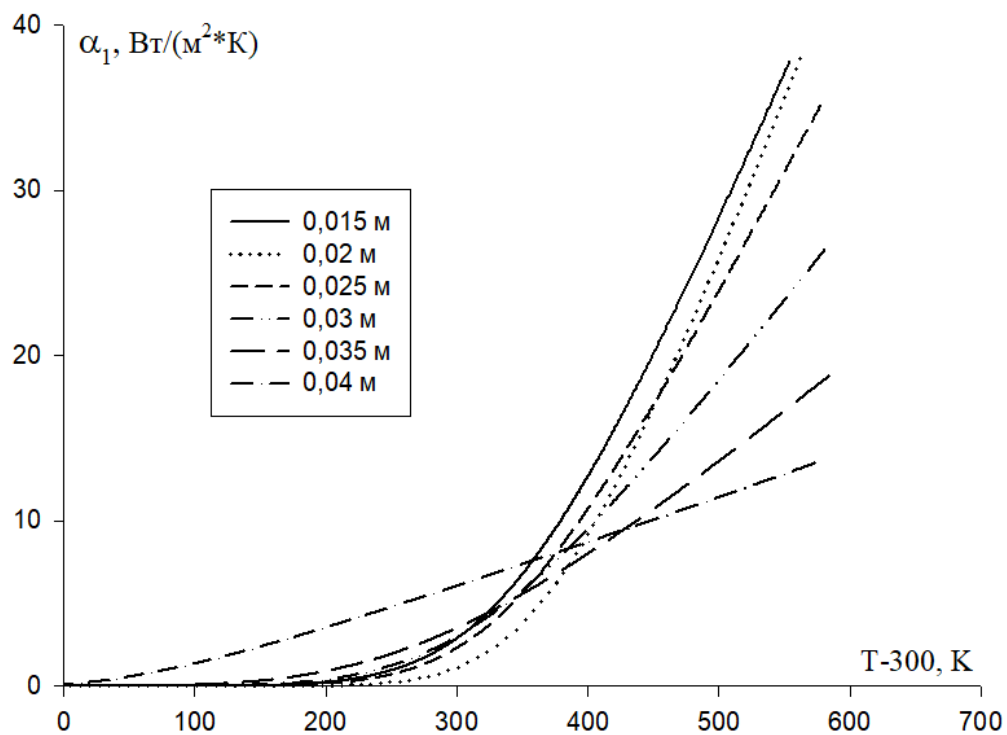


Рис. 3.16. Зависимость коэффициента излучательной теплоотдачи цилиндрического образца алюминия марки А5 разных диаметров от $T-300$.

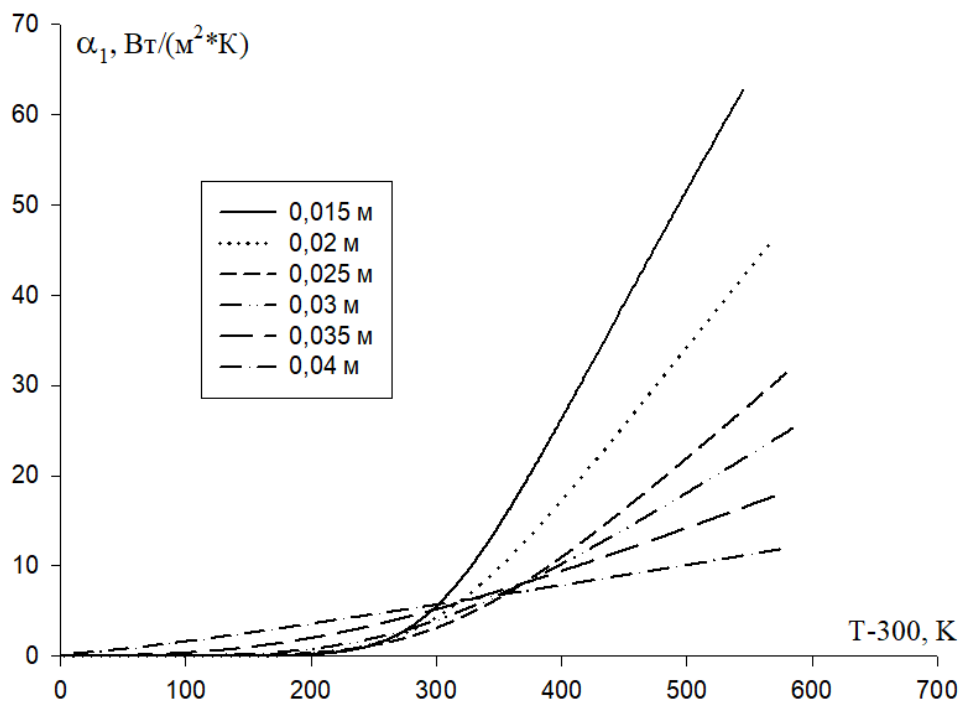


Рис. 3.17. Зависимость коэффициента излучательной теплоотдачи цилиндрического образца алюминия марки А6 разных диаметров от $T-300$.

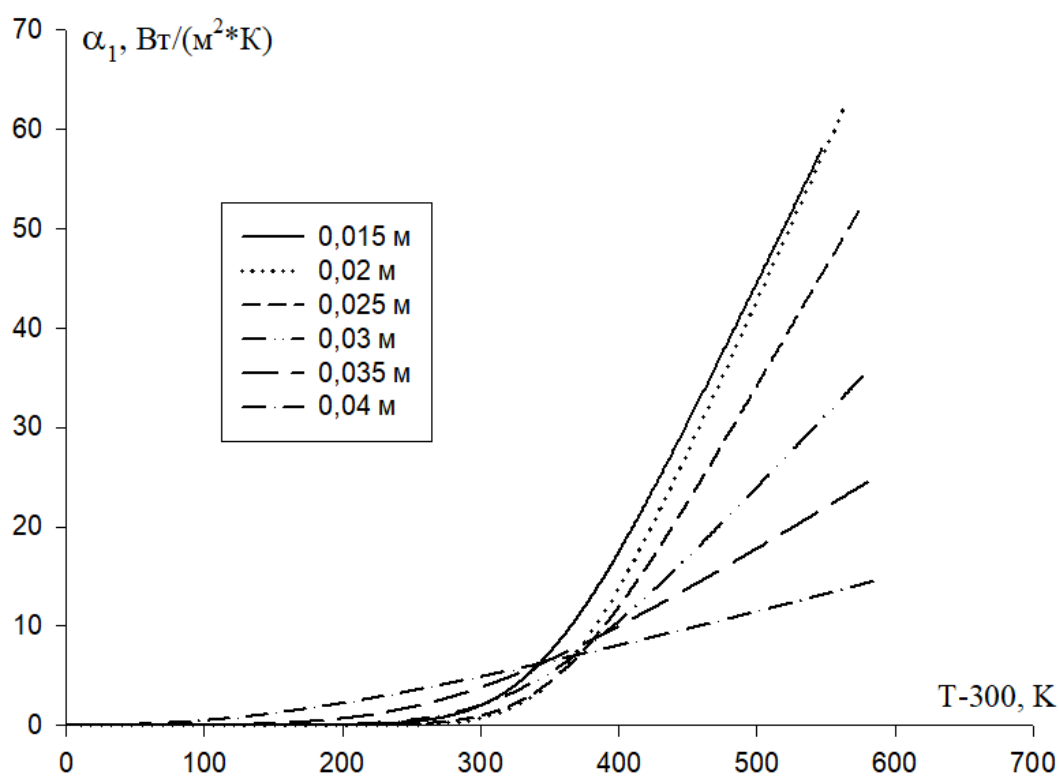


Рис. 3.18. Зависимость коэффициента излучательной теплоотдачи цилиндрического образца алюминия марки АВ98 разных диаметров от $T-300$.

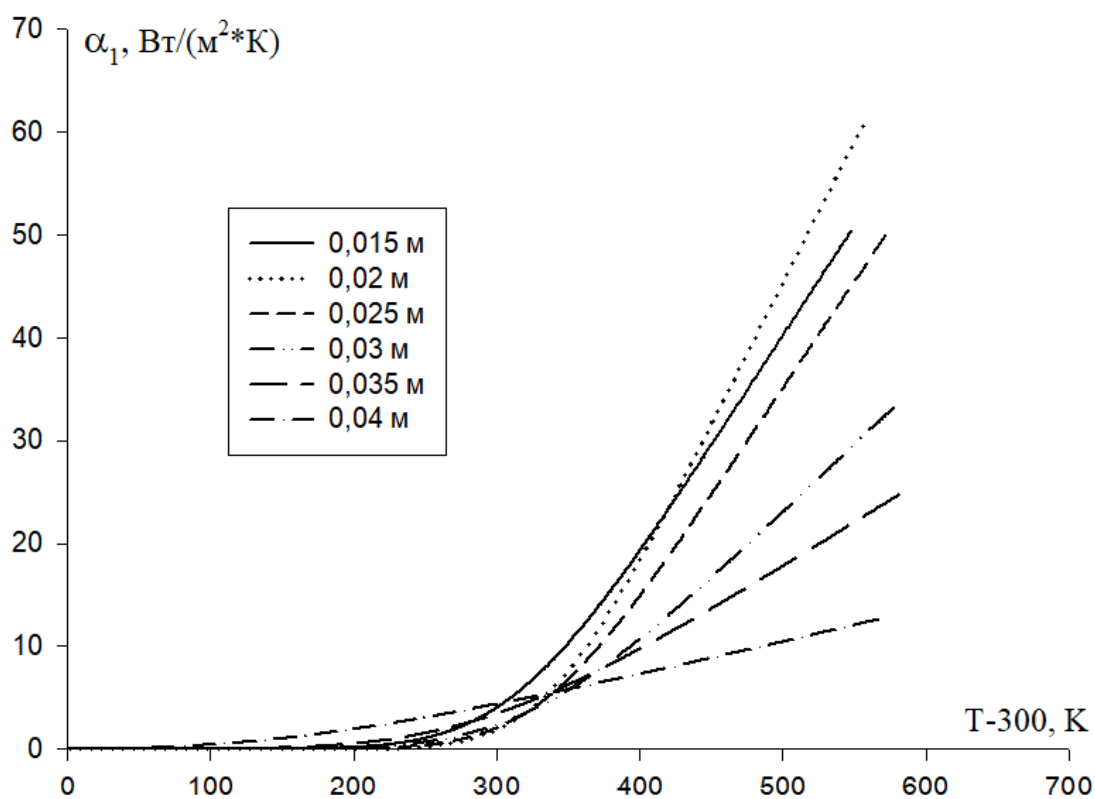


Рис. 3.19. Зависимость коэффициента излучательной теплоотдачи цилиндрического образца алюминия марки А5N разных диаметров от $T-300$.

Обработка данных графиков даёт следующее уравнение температурной зависимости для коэффициента излучательной теплоотдачи исследованных образцов:

$$\alpha_1(T) = \alpha_1(T = 300) + a_1 (T - 300) + b_1 (T - 300)^2 + c_1 (T - 300)^3, \quad (3.12)$$

где a_1, b_1, c_1 – постоянные величины для данного образца, $\alpha_1(T = 300)$ – значение коэффициента излучательной теплоотдачи при $T=300$ К.

В таблице 3.3 приведены значения постоянные, входящие в уравнение (3.12). В последнем столбе таблицы указаны коэффициенты регрессии.

Таблица 3.3

Значения постоянных в уравнении, описывающем, как изменяется коэффициент теплоотдачи излучением у цилиндрических образцов алюминия различных марок и размеров, в зависимости от температуры.

Марка	d, см	$\alpha(T = 300)$, Вт / (м ² К)	a, 10 ⁻³ Вт / (м ² К ²)	b, 10 ⁻⁶ Вт / (м ² К ³)	c, 10 ⁻⁸ Вт / (м ² К ⁴)	R
A0	1,5	0,061	2,4	-99,5	44,0	0,9968
	2,0	0,028	-3,5	-37,1	19,9	0,9983
	2,5	0,053	-0,6	-28,5	18,4	0,9987
	3,0	0,145	-3,4	-5,8	13,2	0,9988
	3,5	0,101	-6,9	62,1	0,5	0,9994
	4,0	0,086	8,1	29,3	-2,2	0,9999
A5	1,5	0,036	1,9	-78,0	36,9	0,9982
	2,0	0,010	14,9	-200,0	49,4	0,9978
	2,5	0,058	-0,2	-53,2	29,0	0,9972
	3,0	0,214	-8,1	25,6	12,3	0,9978
	3,5	0,212	-9,5	67,1	0,9	0,9992
	4,0	0,086	8,0	53,9	-4,9	0,9999
A6	1,5	0,259	23,0	-300,0	85,5	0,9971
	2,0	0,237	-8,7	-96,6	31,8	0,9957
	2,5	0,256	-8,4	14,6	17,1	0,9975
	3,0	0,266	-12,0	70,4	4,6	0,9984
	3,5	0,016	-5,0	84,7	-3,6	0,9997
	4,0	0,165	11,9	2,9	-2,7	0,9999
AB98	1,5	0,216	20,2	-300,0	80,0	0,9964
	2,0	0,606	35,1	-400,0	91,1	0,9949

	2,5	0,298	20,5	-200,0	65,4	0,9956
	3,0	0,107	0,3	-63,6	3,1	0,9969
	3,5	0,326	-12,7	69,7	4,8	0,9983
	4,0	0,011	-2,2	77,2	-5,4	1,0000
A5N	1,5	0,120	-0,001	-88,2	49,5	0,9959
	2,0	0,200	16,1	-200,0	54,8	0,9962
	2,5	0,018	6,1	-100,0	51,6	0,9950
	3,0	0,772	-12,6	4,0	21,3	0,9969
	3,5	0,283	-11,4	55,7	7,0	0,9978
	4,0	0,022	-2,3	69,9	-4,7	0,9999

На графике 3.20 для наглядности представлены зависимости коэффициента излучательной теплоотдачи образца алюминия марки А6 диаметром 4,0 см от температуры T . Точками обозначены значения, рассчитанные по формуле (3.10), а сплошная линия соответствует уравнению (3.12).

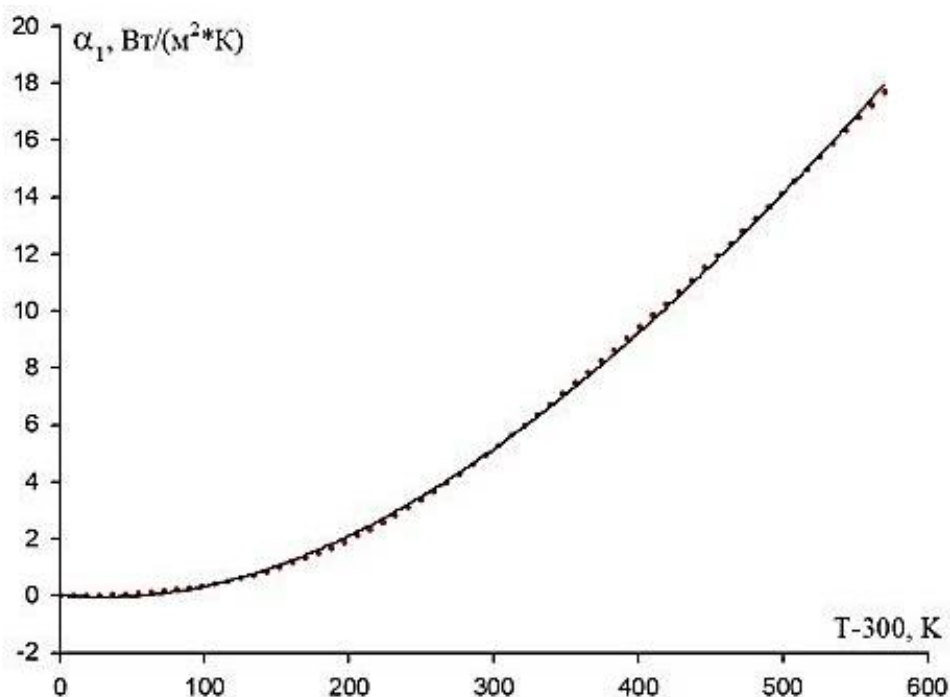


Рис. 3.20. Зависимость коэффициента излучательной теплоотдачи образца алюминия марки А6 диаметром 4,0 см от $T-300$.

На рисунках 3.21-3.25 приведены зависимости коэффициента конвективной теплоотдачи цилиндрических образцов алюминия разных марок и диаметров от $T-300$.

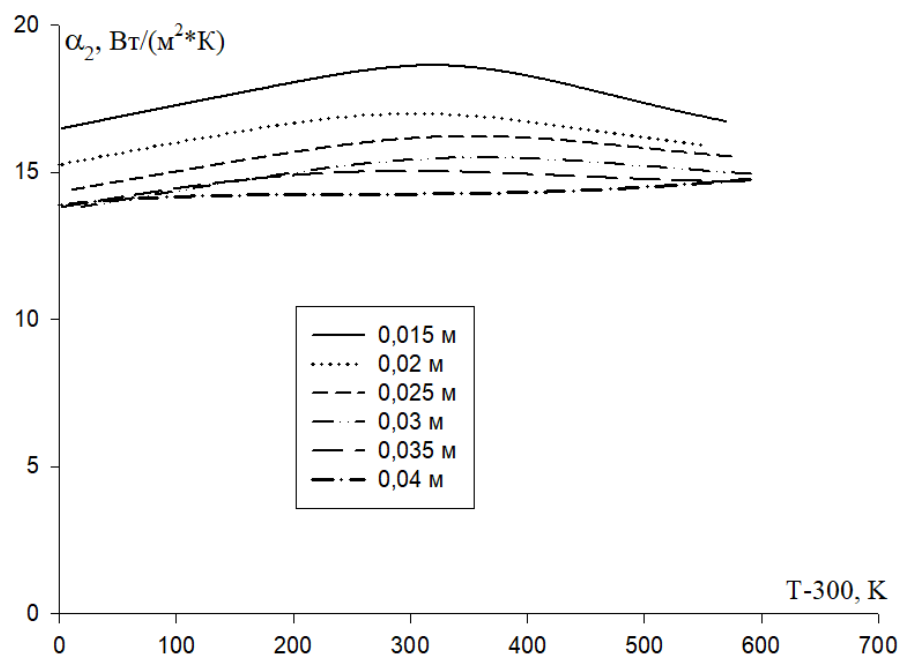


Рис. 3.21. Зависимость коэффициента конвективной теплоотдачи цилиндрического образца алюминия марки А0 разных диаметров от $T-300$.

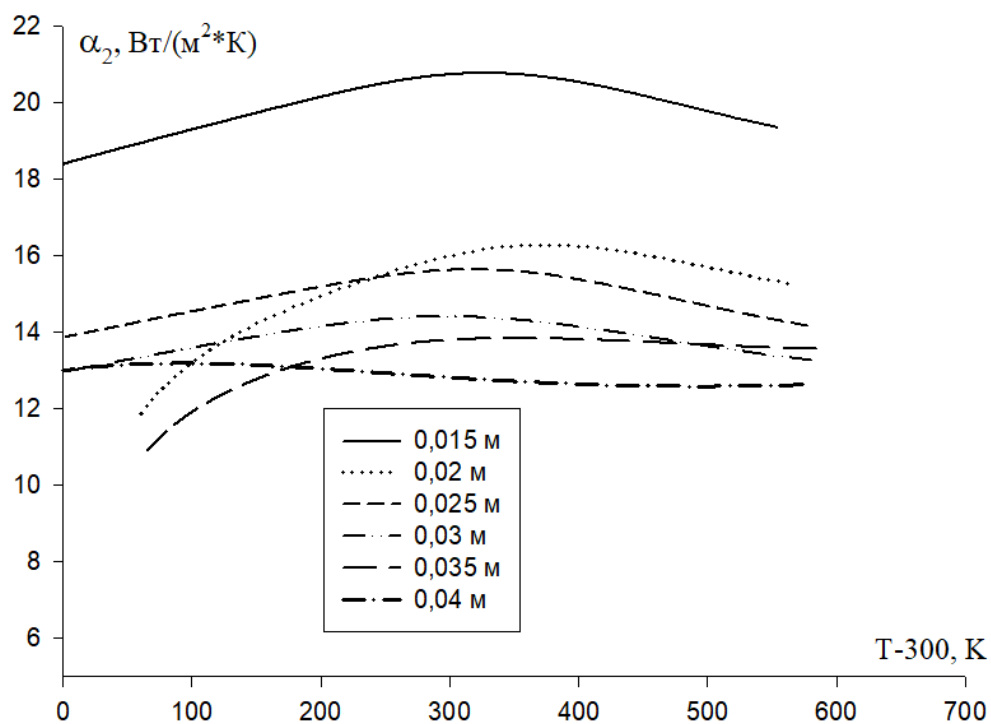


Рис. 3.22. Зависимость коэффициента конвективной теплоотдачи цилиндрического образца алюминия марки А5 разных диаметров от $T-300$.

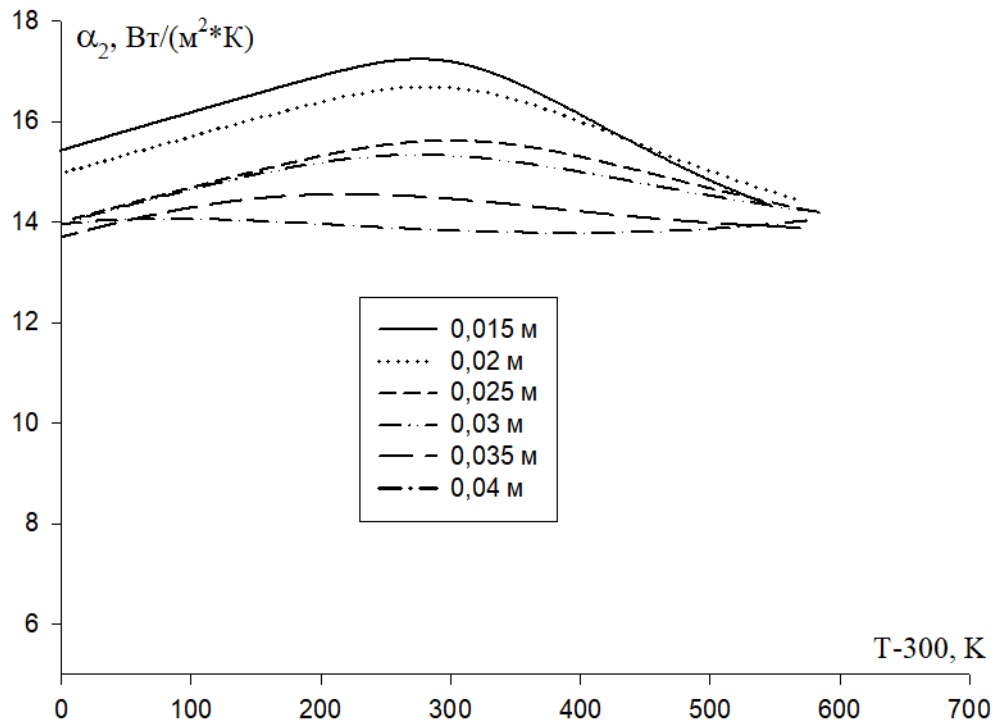


Рис. 3.23. Зависимость коэффициента конвективной теплоотдачи цилиндрического образца алюминия марки А6 разных диаметров от T-300.

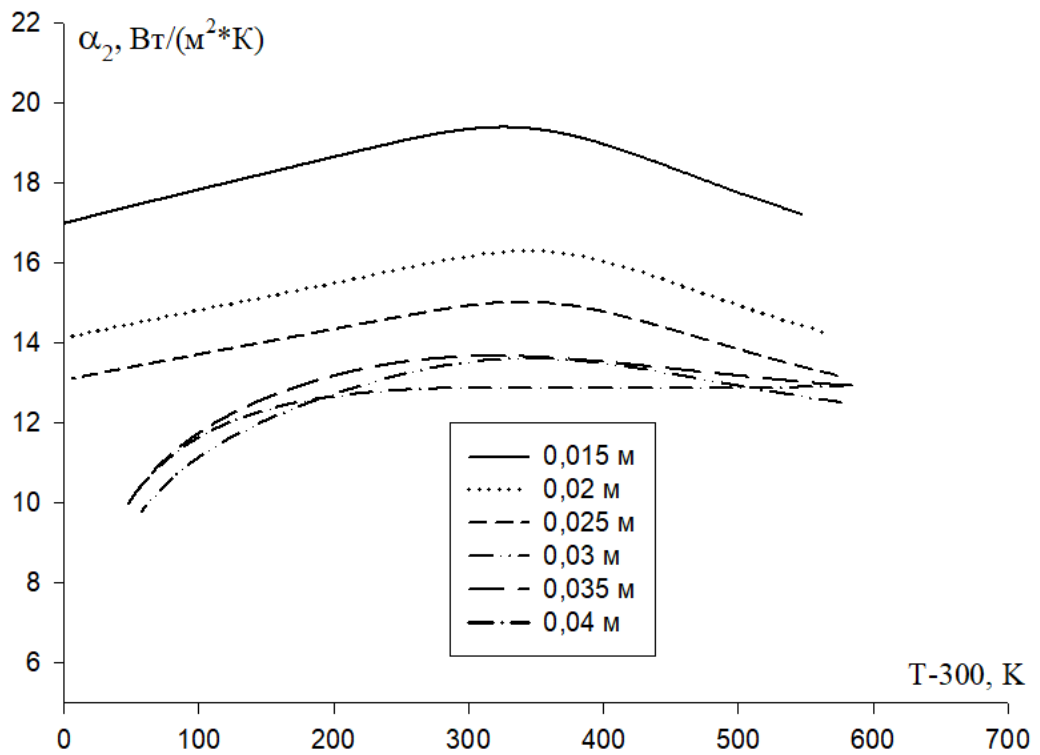


Рис. 3.24. Зависимость коэффициента конвективной теплоотдачи цилиндрического образца алюминия марки АВ98 разных диаметров от T-300.

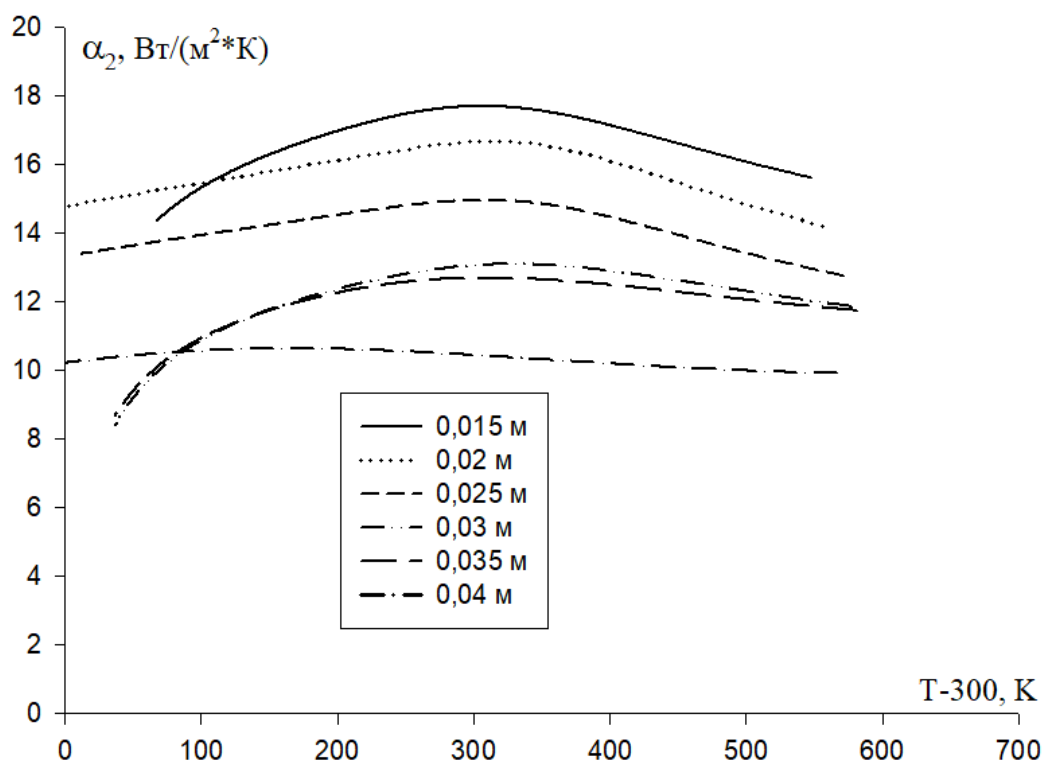


Рис. 3.25. Зависимость коэффициента конвективной теплоотдачи цилиндрического образца алюминия марки А5N разных диаметров от T-300.

Как видно из приведенных рисунков, коэффициент конвективной теплоотдачи цилиндрического образца из алюминия разных марок с увеличением его диаметра уменьшается.

После обработки графиков нами получено следующее уравнение температурной зависимости коэффициента конвективной теплоотдачи:

$$\alpha_2(T) = \alpha_2(T = 300) + a_2 (T - 300) + b_2 (T - 300)^2 + c_2 (T - 300)^3, \quad (3.13)$$

где a_2 , b_2 , c_2 – постоянные величины для данного образца и $\alpha_2(T = 300)$ – значение коэффициента конвективной теплоотдачи при T=300 К.

В таблице 3.4 представлены постоянные величины, входящие в уравнение (3.10). В последнем столбце таблицы указаны коэффициенты регрессии.

Таблица 3.4

Значения постоянных в уравнении, описывающем температурную зависимость коэффициента конвективной теплопередачи цилиндрических образцов алюминия различных марок и размеров.

Марка	d, см	$\alpha(T = 300)$ Вт / (м ² К)	a, 10 ⁻³ Вт / (м ² К ²)	b, 10 ⁻⁶ Вт / (м ² К ³)	c, 10 ⁻⁸ Вт / (м ² К ⁴)	R
A0	1,5	16,45	8,2	6,71	-3,74	0,9963
	2,0	15,25	8,4	-3,28	-1,93	0,9982
	2,5	14,31	7,4	0,62	-1,82	0,9990
	3,0	13,66	7,5	-2,61	-1,19	0,9987
	3,5	13,77	8,5	-17,01	0,81	0,9984
	4,0	14,02	4,1	-14,74	1,78	0,9982
A5	1,5	18,39	9,1	5,37	-3,54	0,9984
	2,5	13,85	7,1	3,07	-2,68	0,9970
	3,0	12,92	7,9	-7,27	-1,05	0,9958
	3,5	7,36	59,4	-200,0	15,61	0,9891
	4,0	13,00	3,8	-22,30	2,58	0,9933
A6	1,5	13,82	5,8	14,00	-4,32	0,9982
	2,0	14,94	8,7	-2,67	-2,77	0,9918
	2,5	13,96	8,3	-5,68	-1,54	0,9952
	3,0	13,92	9,3	-16,31	0,09	0,9951
	3,5	13,69	8,2	-24,27	1,80	0,9980
	4,0	13,94	2,4	-15,29	2,00	0,9751
AB98	1,5	17,01	7,0	18,97	-5,86	0,9972
	2,0	14,17	4,7	22,37	-5,59	0,9967
	2,5	13,09	5,0	16,27	-4,51	0,9969
	3,0	5,91	69,0	-200,0	17,86	0,9856
	3,5	7,28	58,4	-200,0	14,85	0,9811
	4,0	8,95	34,7	-96,40	8,47	0,9937
A5N	1,5	11,62	46,1	-100,0	6,55	0,9976
	2,0	0,42	42,8	-59,23	2,01	0,9998
	2,5	13,32	5,9	8,87	-3,91	0,9923
	3,0	7,24	45,3	-100,0	8,16	0,9962
	3,5	7,36	45,9	-100,0	10,15	0,9949
	4,0	10,22	5,6	-21,80	1,94	0,9990

Из полученных данных следует, что с повышением температуры коэффициент теплоотдачи излучением растёт, а коэффициент теплоотдачи конвекцией сначала увеличивается, достигает максимума, а затем постепенно снижается. При высоких температурах излучение играет значительную роль в общем процессе теплообмена.

ГЛАВА IV. ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА СФЕРИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ АЛЮМИНИЯ РАЗНЫХ МАРОК НА ИХ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

4.1. Исследование кинетики охлаждения сферических образцов алюминия разных марок

В ходе эксперимента, который проводился с использованием метода охлаждения, была изучена скорость снижения температуры у сферических образцов из алюминия марок А0, А5, А6, АВ98 и А5N. Образцы имели диаметры 1,765 см, 2,82 см и 3,35 см. Исследование проводилось в широком диапазоне температур от 300 до 827. На рисунке 4.1 представлен график, который демонстрирует, как менялась температура сферического образца диаметром 1,765 см из алюминия марки А0 в процессе охлаждения.

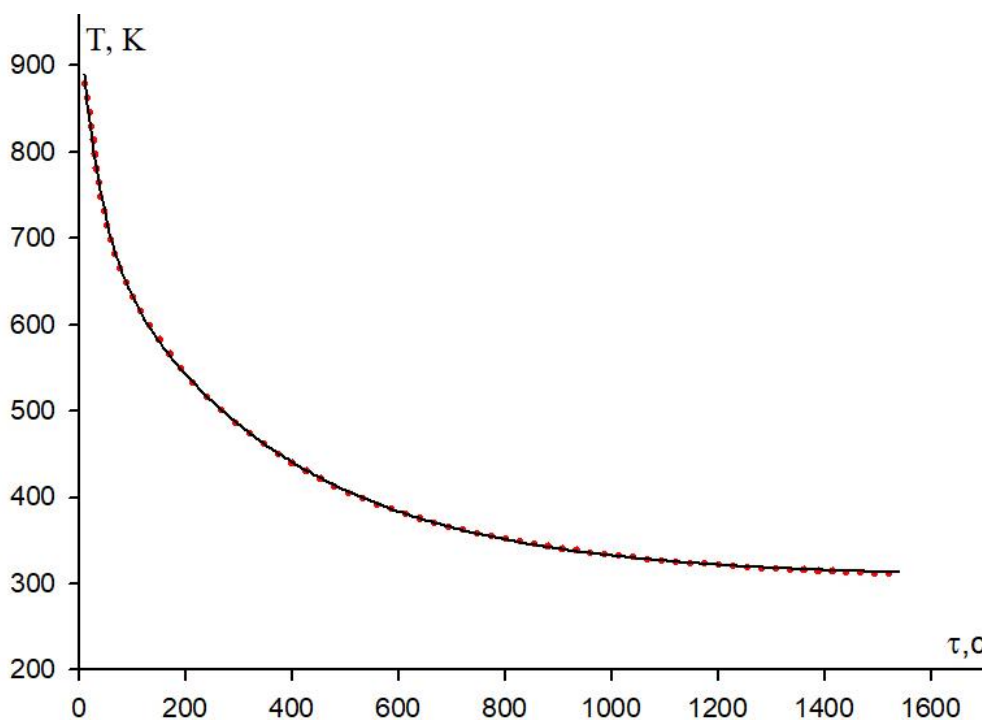


Рис. 4.1. Изменение температуры во времени для сферического образца алюминия марки А0 диаметром 1,765 см.

Подобно цилиндрическим образцам, из измеренной температуры образца вычиталась температура окружающей среды, обозначенная как ΔT . Затем строились графики, отражающие изменение разности температур образца и окружающей среды в зависимости от времени: $\Delta T = f(\tau)$. Обработка результатов измерений также осуществлялась на компьютере с использованием Microsoft Office Excel. Графики были построены и обработаны с применением программ Sigma Plot 10 и Microcal Origin 6.0.

Для сферических образцов экспериментально полученные временные зависимости разности температур образцов и окружающей среды также с высокой точностью описываются уравнением (3.1). Экспоненциальная зависимость $\Delta T(\tau)$ в формуле (3.1) указывает на то, что теплота передаётся в окружающую среду одновременно двумя независимыми механизмами.

На графиках 4.2–4.4 представлены данные о разнице температур образцов и окружающей среды ΔT для охлаждения за счёт излучения ΔT_1 и конвективного теплообмена ΔT_2 для сферических образцов из алюминия марок А0, А5, А6, АВ98 и А5N с различными диаметрами. В таблице 4.1 указаны значения констант, входящих в уравнениях (3.1) и (3.4).

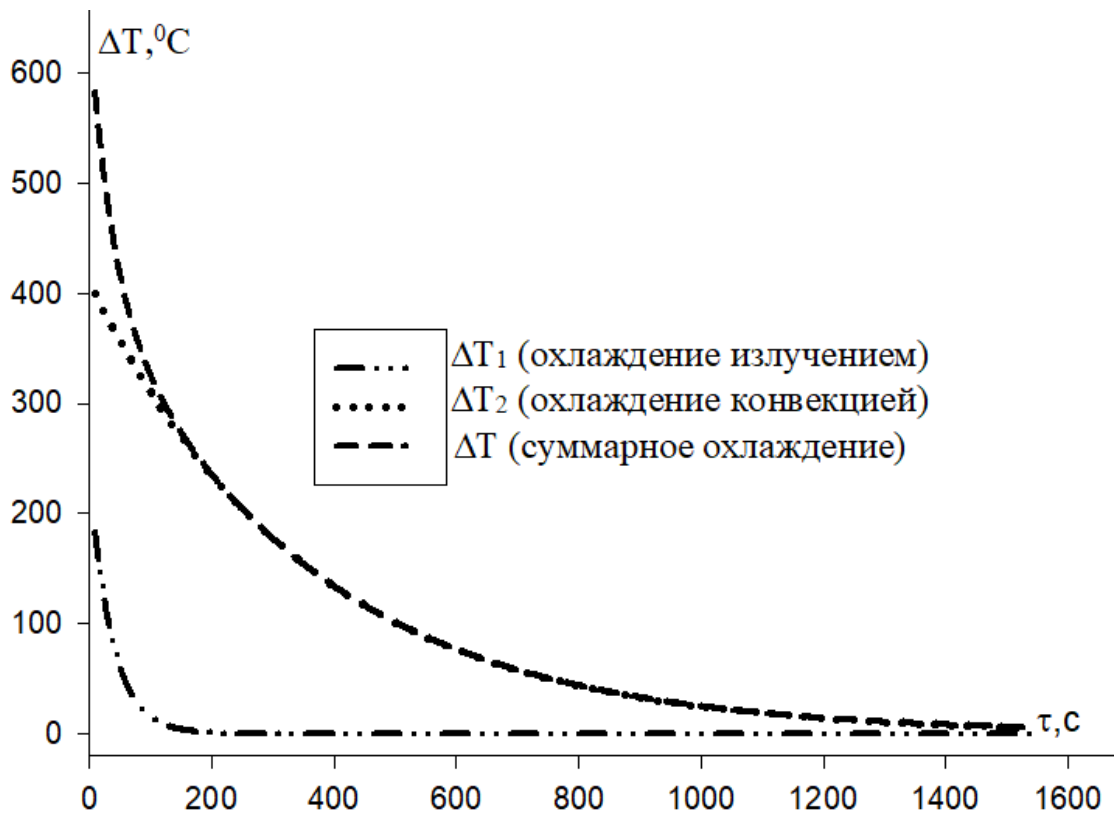


Рис.4.2. Временные зависимости разностей температур образца и среды для сферического алюминия марки А0. Диаметр = 1,765 см.

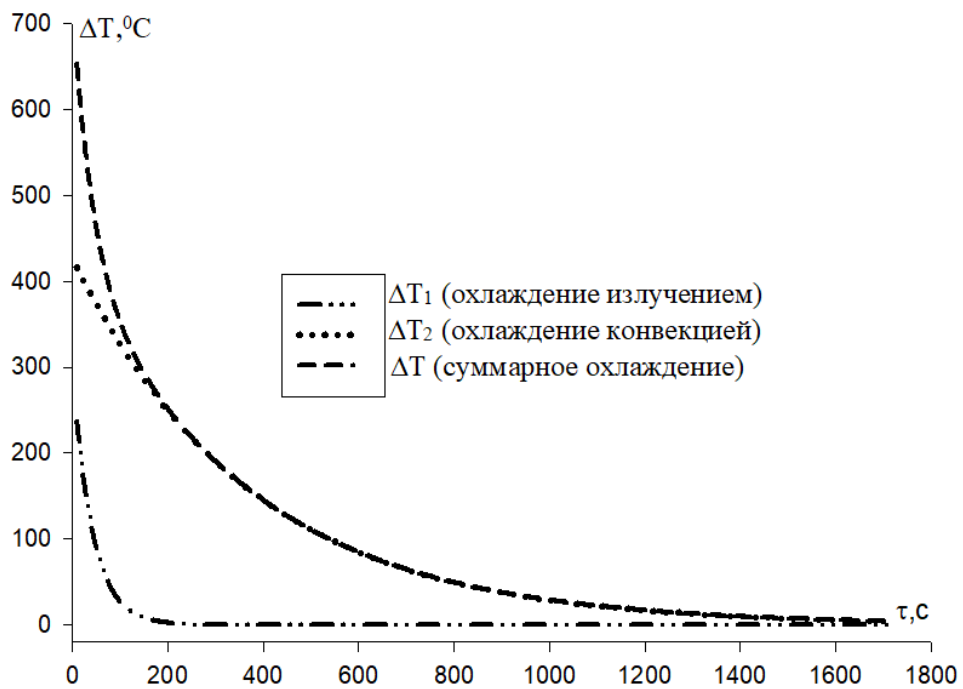


Рис.4.3. Зависимость разности температуры сферического образца из алюминия марки АВ98 диаметром 1,765 см и окружающей среды от времени охлаждения

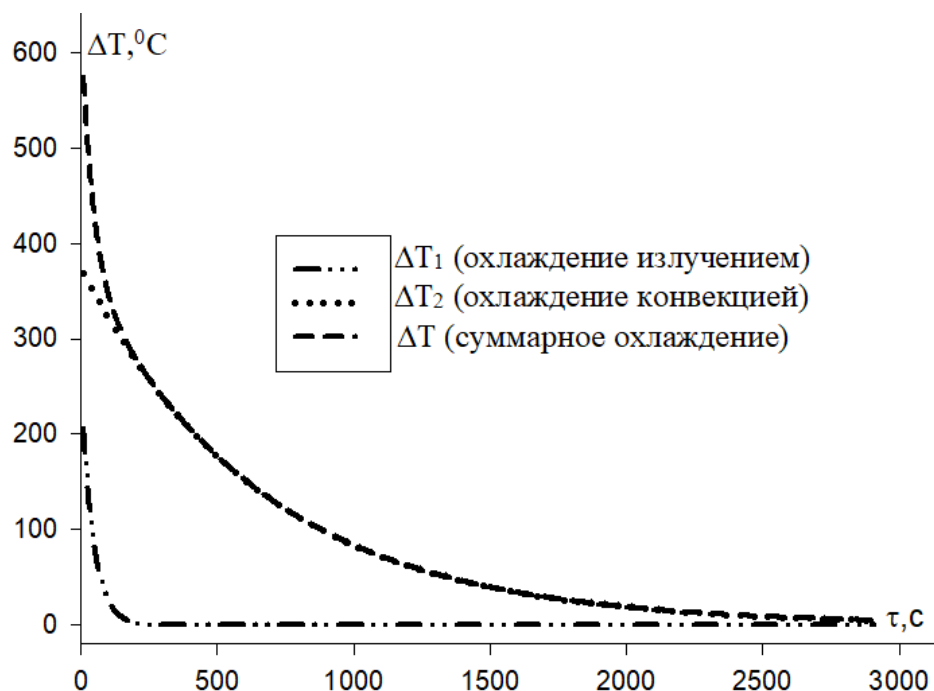


Рис.4.4. Зависимость разности температуры сферического образца из алюминия марки А5N диаметром 2,82 см и окружающей среды от времени охлаждения

На рис. 4.5 – 4.6 в качестве примера приведены зависимости скорости охлаждения образца за счет лучеиспускания $\frac{dT}{d\tau_1}$ и конвективного $\frac{dT}{d\tau_2}$ теплообмена для некоторых исследованных сферических образцов из алюминия разных марок и диаметров.

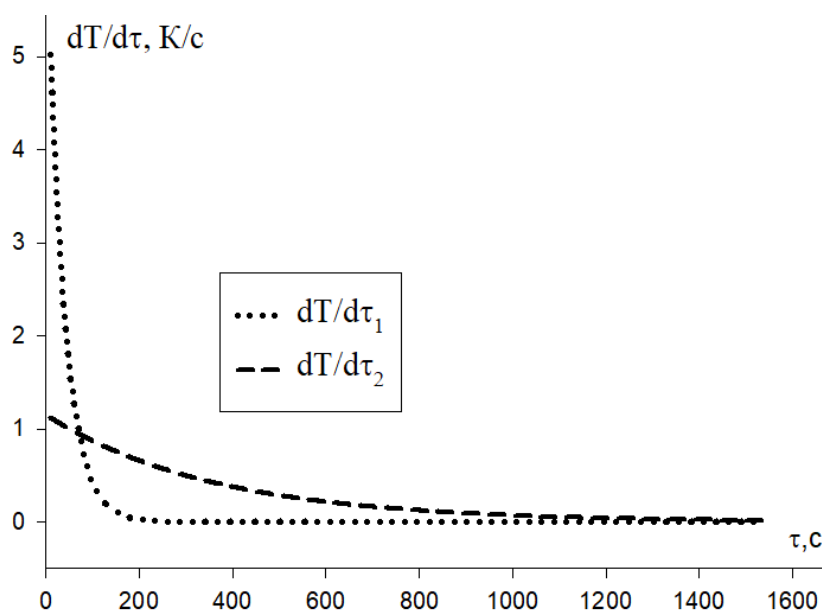


Рис.4.5. Зависимость скорости охлаждения от времени для сферического образца из алюминия марки А0 диаметром 1,765 см.

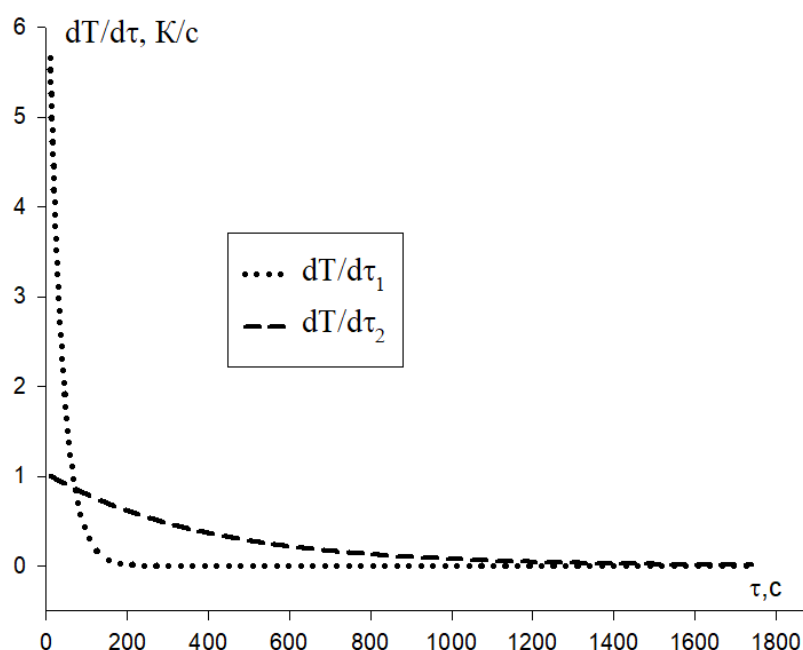


Рис. 4.6. График, демонстрирующий, как изменяется скорость охлаждения в зависимости от времени для образца из алюминия марки А5N в форме шара диаметром 1,765 см.

В таблице 4.1 представлены значения постоянных, входящие в уравнениях (3.1) и (3.5).

Таблица 4.1

Значения постоянных входящие в уравнениях зависимостей температуры и скорости охлаждения образца от времени

Мар-ка	d, см	$T_1 - T_0$, К	τ_1 , с	$T_2 - T_0$, К	τ_2 , с	$(T_1 - T_0)/\tau_1$, К/с	$(T_2 - T_0)/\tau_2$, К/с	T_0 , К
А0	1,765	241,05	36,50	410,62	357,14	6,604	1,149	307,74
	2,82	152,63	54,00	465,16	714,28	2,826	0,651	310,10
	3,35	227,73	67,11	413,88	1000,0	3,393	0,414	303,94
А5	1,765	265,84	36,76	406,85	344,82	7,232	1,180	304,76
	2,82	178,77	49,00	443,69	714,28	3,648	0,621	308,38
	3,35	161,91	56,81	443,52	909,09	2,850	0,488	312,43
А6	1,765	265,11	31,74	402,77	370,37	8,353	1,087	305,90
	2,82	228,19	51,00	401,59	714,28	4,474	0,560	310,48

	3,35	179,89	67,11	413,81	909,09	2,681	0,455	312,90
AB98	1,765	302,28	41,49	427,52	370,37	7,286	1,154	306,98
	2,82	170,74	50,50	423,35	666,66	3,381	0,635	313,08
	3,35	181,92	55,86	413,39	1000,0	3,257	0,413	310,48
A5N	1,765	251,23	32,68	397,35	384,61	7,688	1,033	307,51
	2,82	259,31	43,30	374,13	666,66	5,989	0,561	312,08

4.2. Исследование температурной зависимости коэффициентов теплоотдачи сферических образцов

На рис. 4.7-4.9 в качестве примера приведены зависимости общего коэффициента теплоотдачи сферических образцов алюминия разных марок от величины $T-300$.

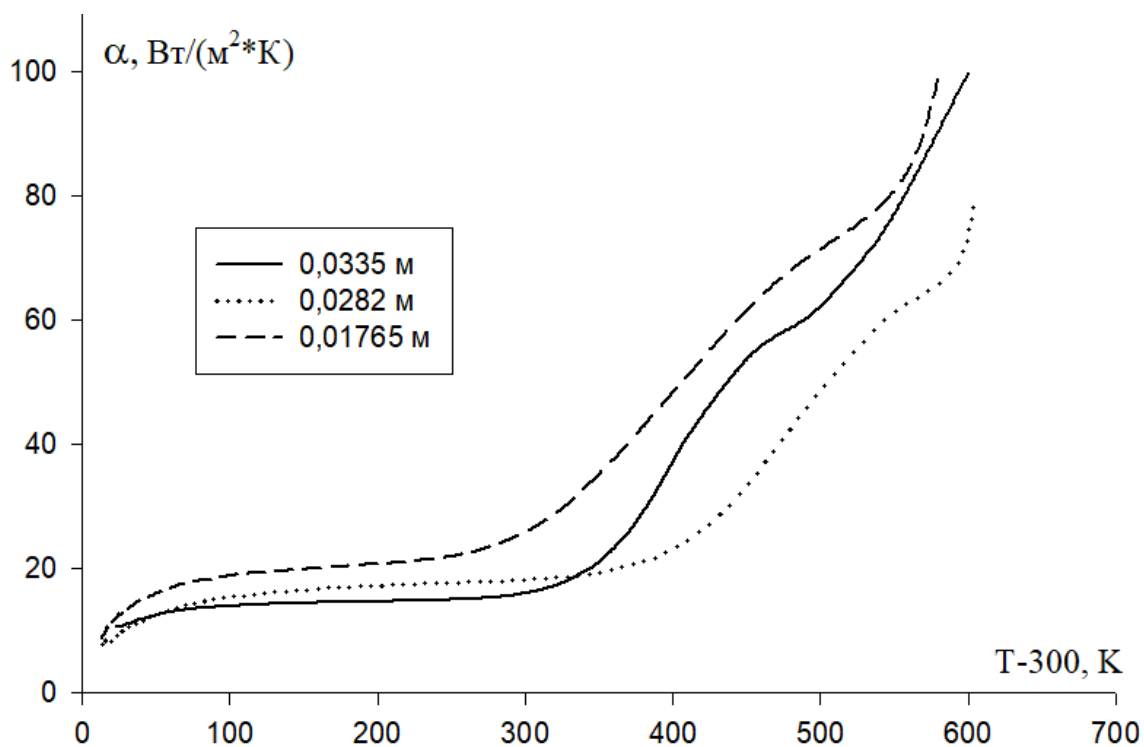


Рис. 4.7. Зависимость коэффициента теплоотдачи сферического образца алюминия марки А0 разных диаметров от величины $T-300$.

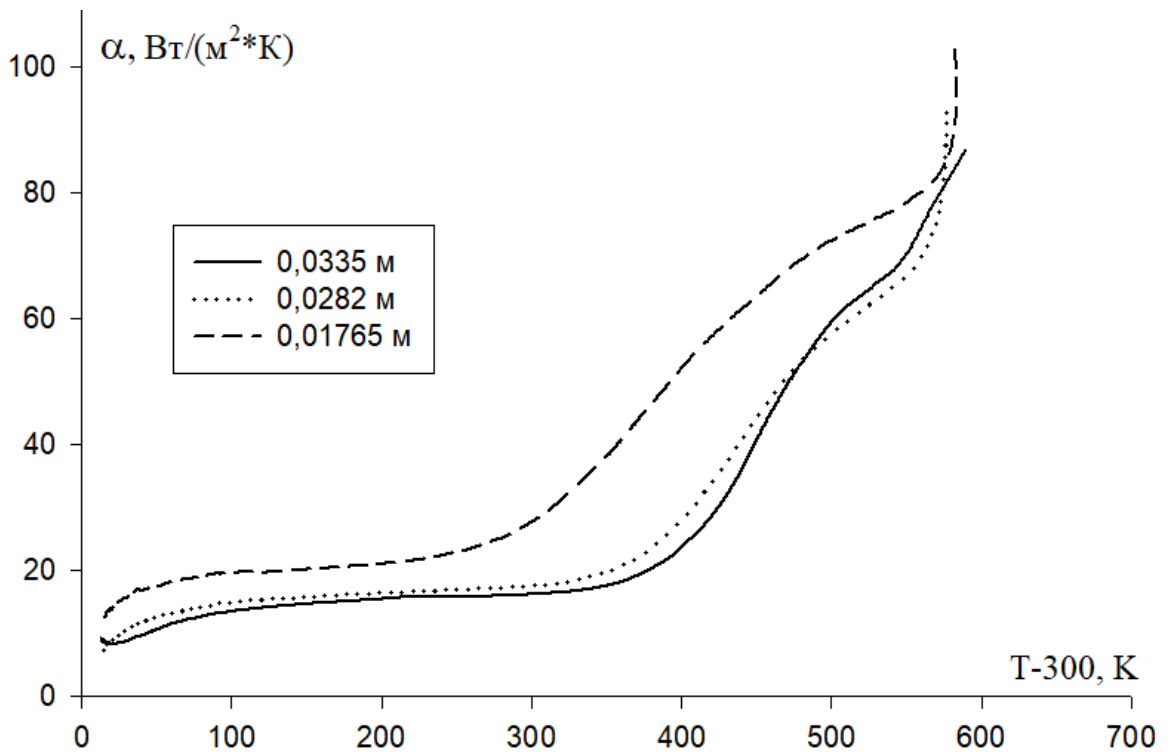


Рис. 4.8. Зависимость коэффициента теплоотдачи сферического образца алюминия марки А5 разных диаметров от величины $T-300$

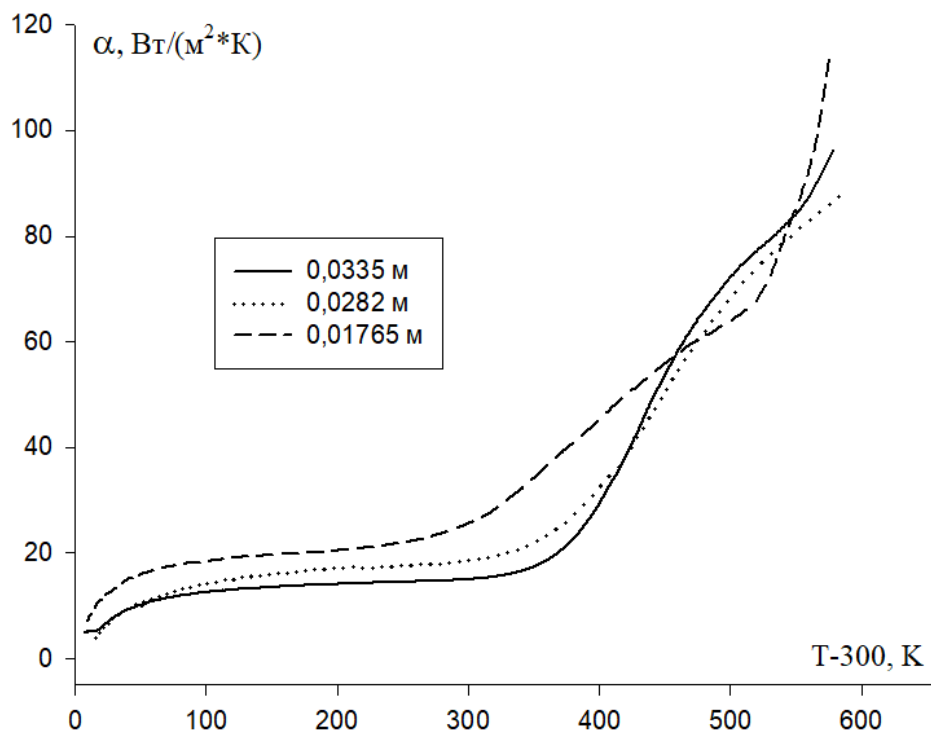


Рис. 4.9. Зависимость коэффициента теплоотдачи сферического образца алюминия марки АВ98 разных диаметров от величины $T-300$.

Как видно из приведенных рисунков, закономерности изменения коэффициентов теплоотдачи для сферических и цилиндрических образцов похожи, т.е. с ростом диаметра сферы коэффициент теплоотдачи уменьшается.

На рисунках 4.10- 4.13 приведены зависимости коэффициента излучательной теплоотдачи сферических образцов алюминия разных марок и диаметров от величины $T-300$.

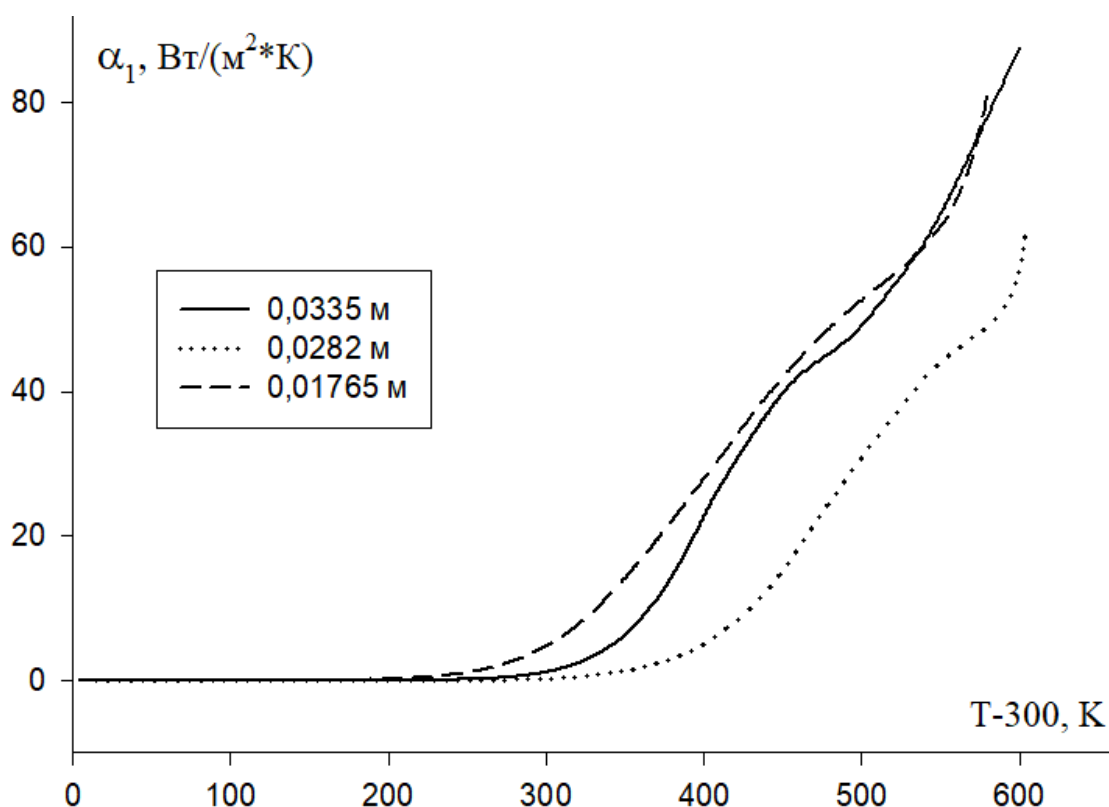


Рис. 4.10. Зависимость коэффициента излучательной теплоотдачи сферического алюминия марки А0 разных диаметров от величины $T-300$.

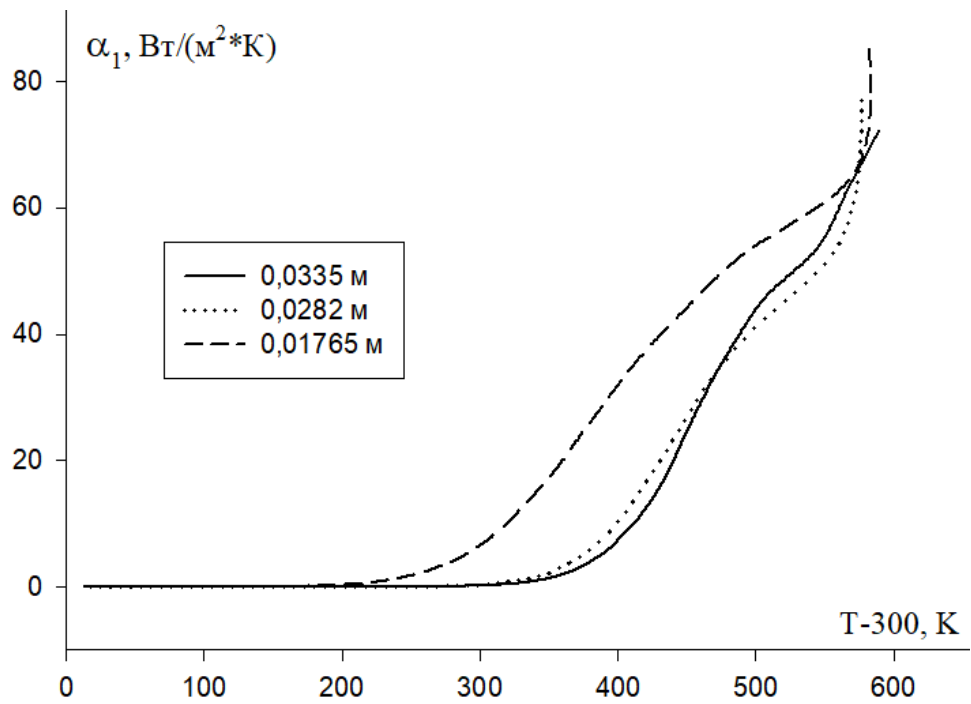


Рис. 4.11. Зависимость коэффициента излучательной теплоотдачи сферического алюминия марки А5 разных диаметров от величины $T-300$.

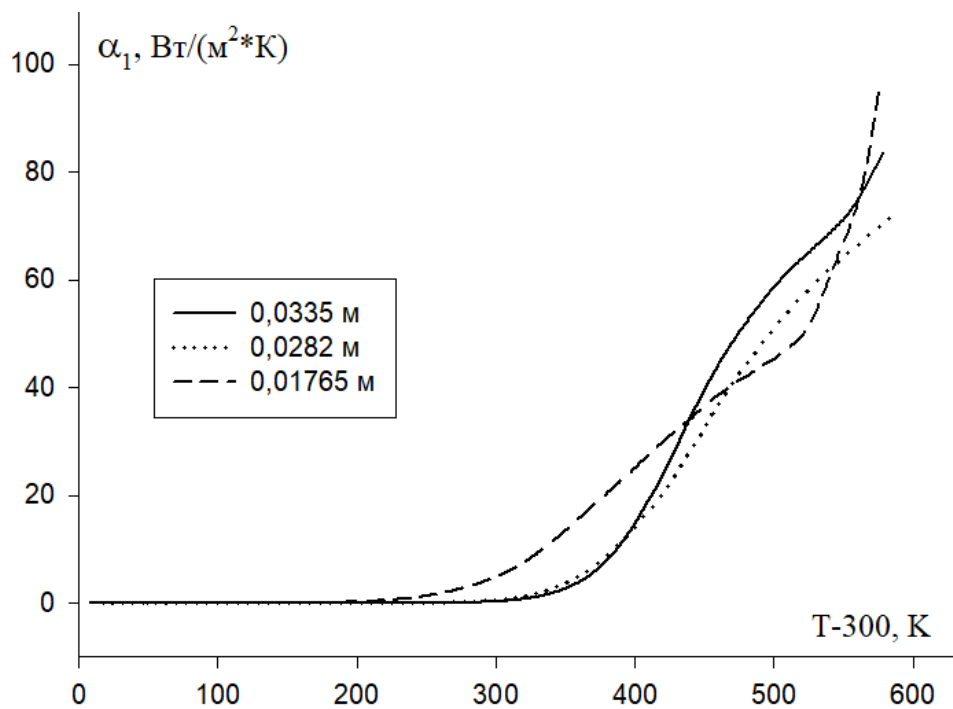


Рис. 4.12. Зависимость коэффициента излучательной теплоотдачи сферического алюминия марки АВ98 разных диаметров от величины $T-300$.

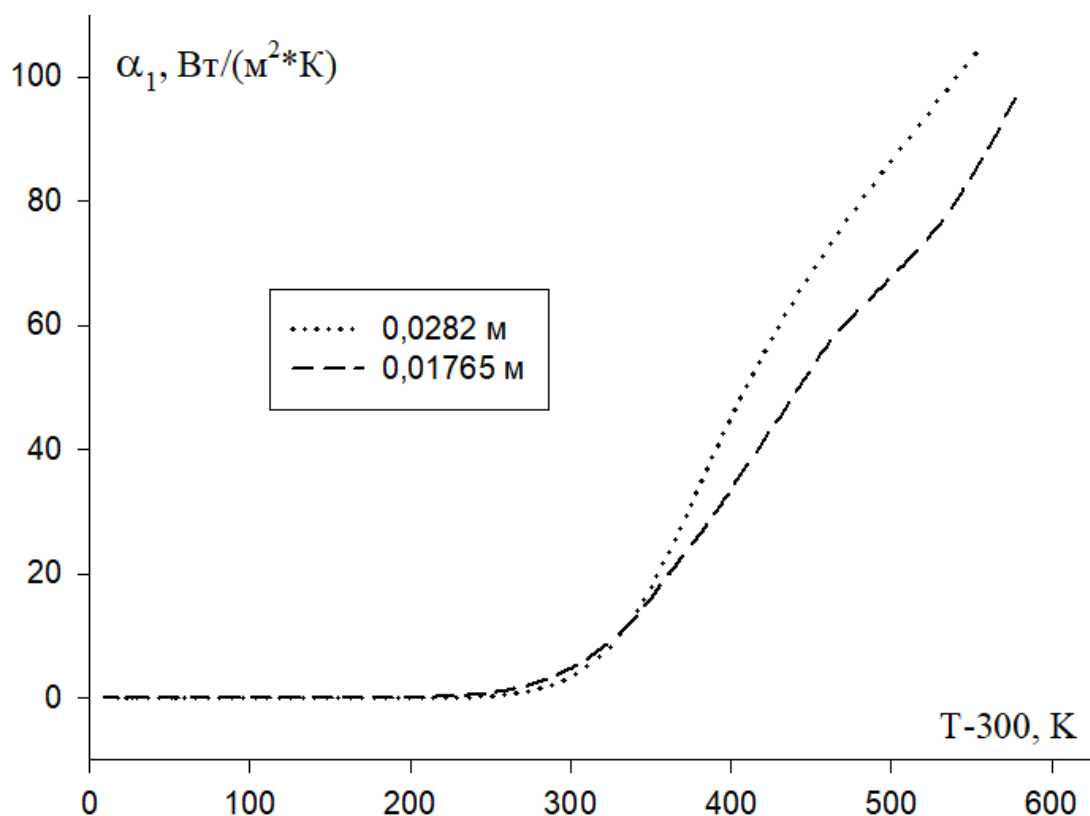


Рис. 4.13. Зависимость коэффициента излучательной теплоотдачи сферического алюминия марки А5N разных диаметров от величины T-300.

Из представленных графиков становится ясно, что теплопередача излучением происходит при высоких температурах. До температуры около 400 кельвинов коэффициент теплоотдачи за счёт излучения практически равен нулю. При низких температурах коэффициент поглощения излучения близок к нулю, но с увеличением температуры он возрастает.

На рисунках 4.14–4.16 представлены графики, демонстрирующие, как изменяется коэффициент конвективного теплоотдачи сферических образцов алюминия различных марок и размеров в зависимости от температуры T-300.

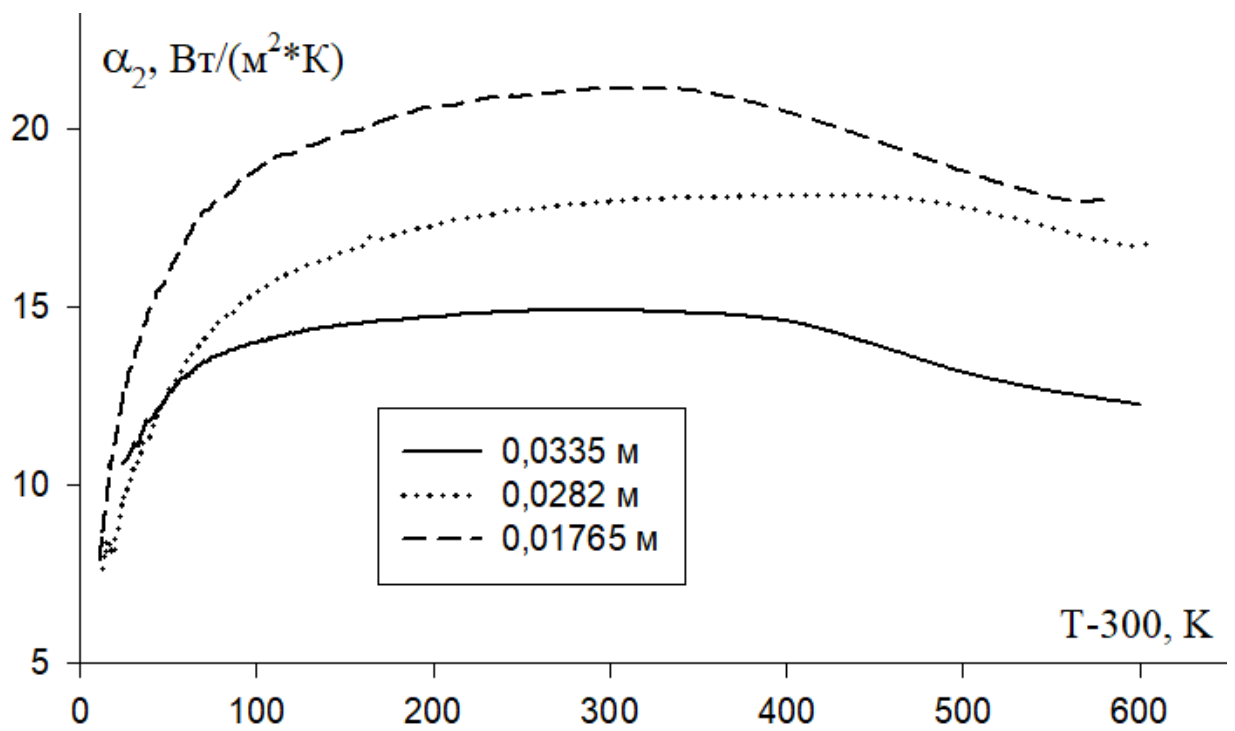


Рис. 4.14. Зависимость коэффициента конвективной теплоотдачи сферического алюминия марки А0 разных диаметров от величины $T-300$.

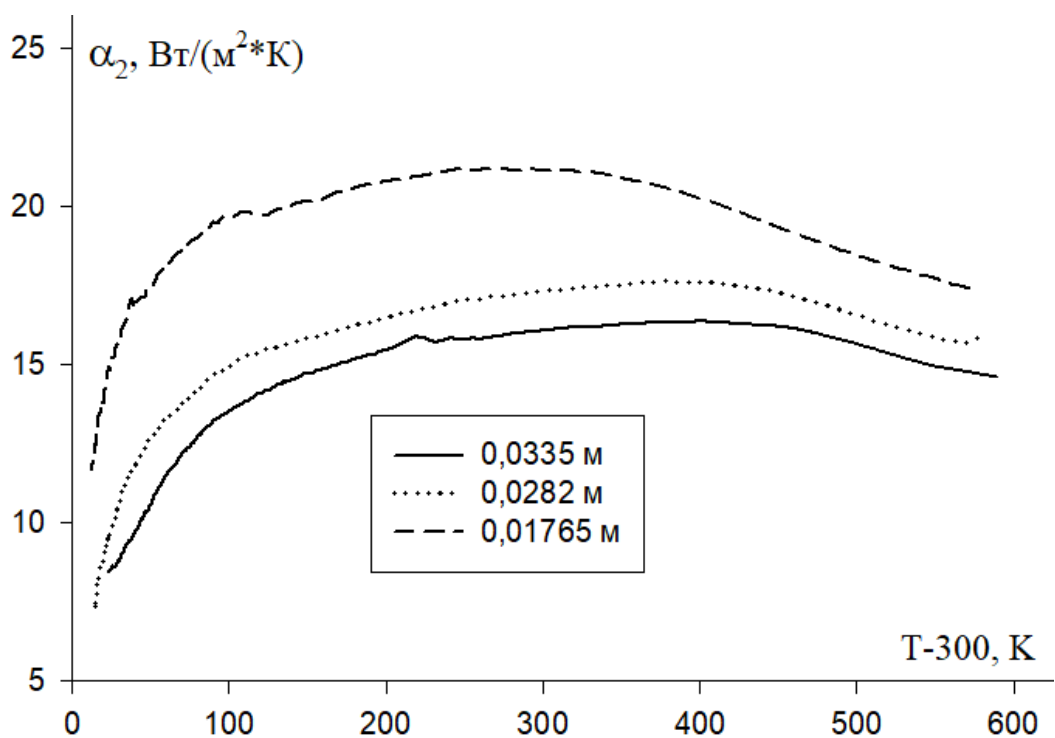


Рис. 4.15. Зависимость коэффициента конвективной теплоотдачи сферического алюминия марки А5 разных диаметров от величины $T-300$.

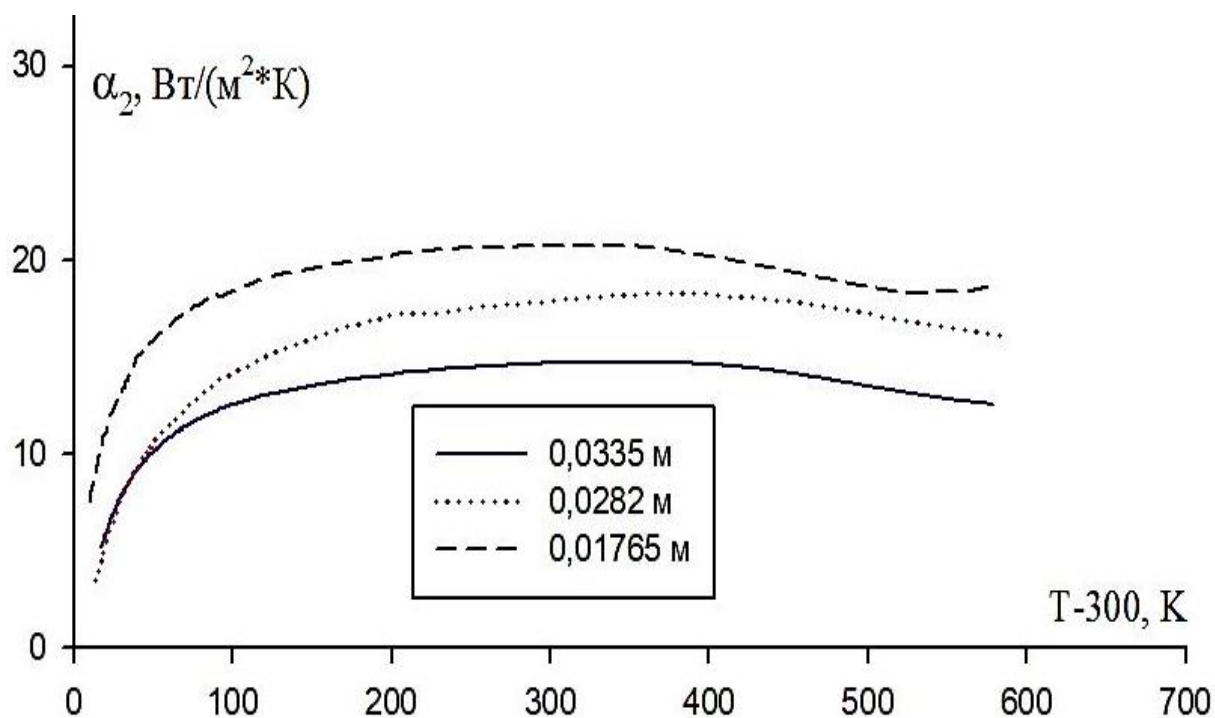


Рис. 4.16. Зависимость коэффициента конвективной теплоотдачи сферического алюминия марки АВ98 разных диаметров от величины $T-300$.

Из представленных графиков становится ясно, что с увеличением диаметра сферических образцов из алюминия разных марок коэффициент конвективной теплоотдачи снижается. При этом с ростом температуры он сначала увеличивается, а затем постепенно уменьшается. Важно отметить, что коэффициент конвективной теплоотдачи для сферических образцов выше, чем для цилиндрических образцов той же массы.

4.3. Сравнение температурной зависимости коэффициентов теплоотдачи цилиндрических и сферических образцов

Чтобы понять, как форма образцов влияет на теплообмен, на рисунках 4.17–4.19 представлены графики зависимости общего коэффициента теплоотдачи для сферических и цилиндрических образцов из алюминия разных марок с одинаковым объёмом. На графиках также отображена зависимость от значения ($T-300$).

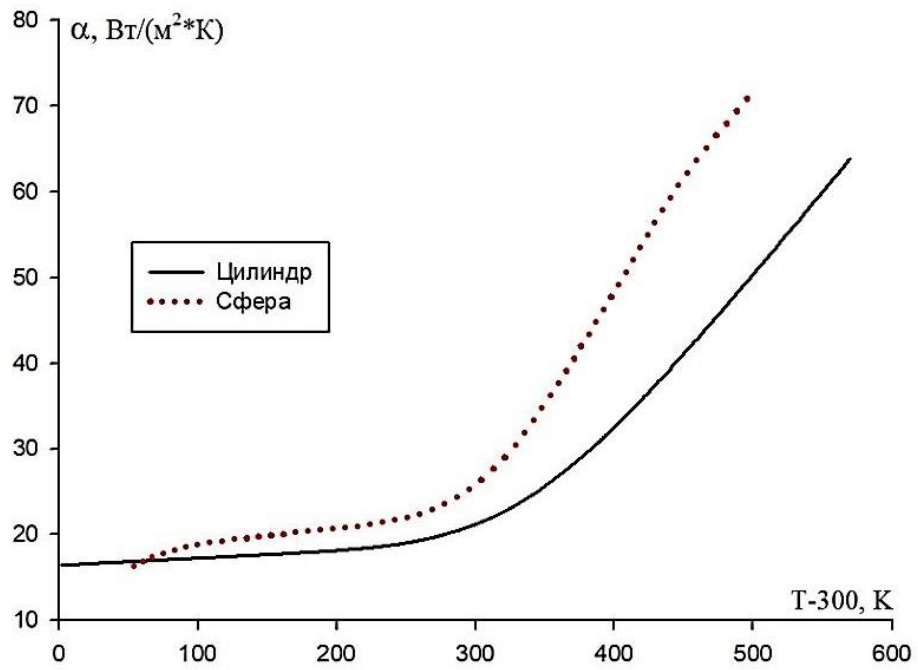


Рис. 4.17. Зависимость коэффициента теплоотдачи цилиндрического ($d=1,5$ см) и сферического ($d=1,765$ см) алюминия марки А0 от величины $T-300$ (при одинаковых объемах).

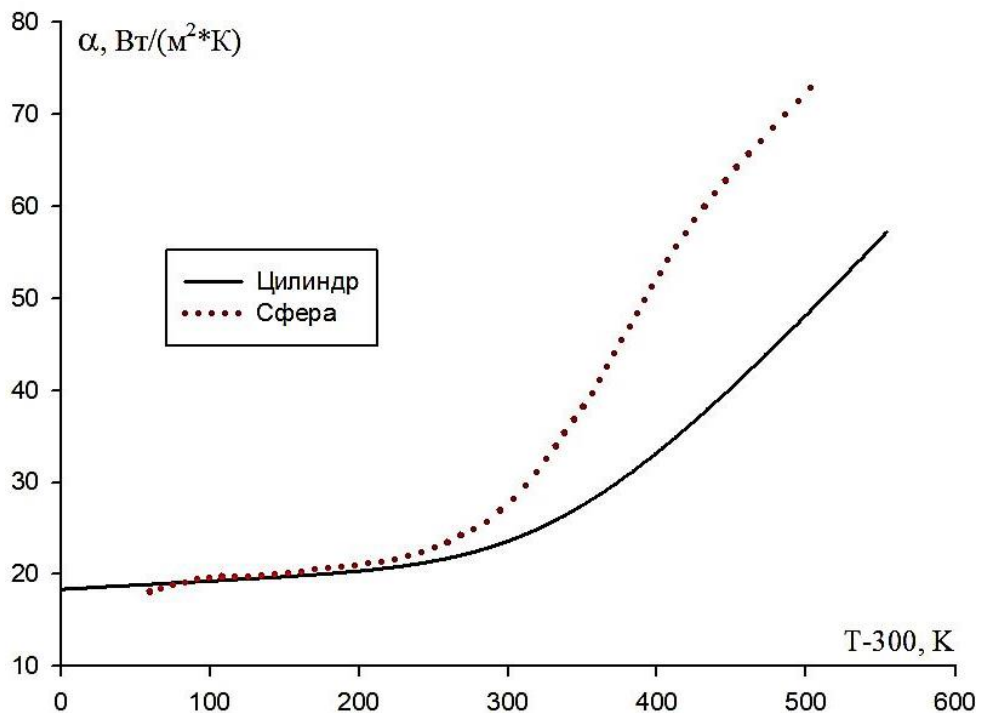


Рис. 4.18. Зависимость коэффициента теплоотдачи цилиндрического ($d=1,5$ см) и сферического ($d=1,765$ см) алюминия марки А5 от величины $T-300$ (при одинаковых объемах).

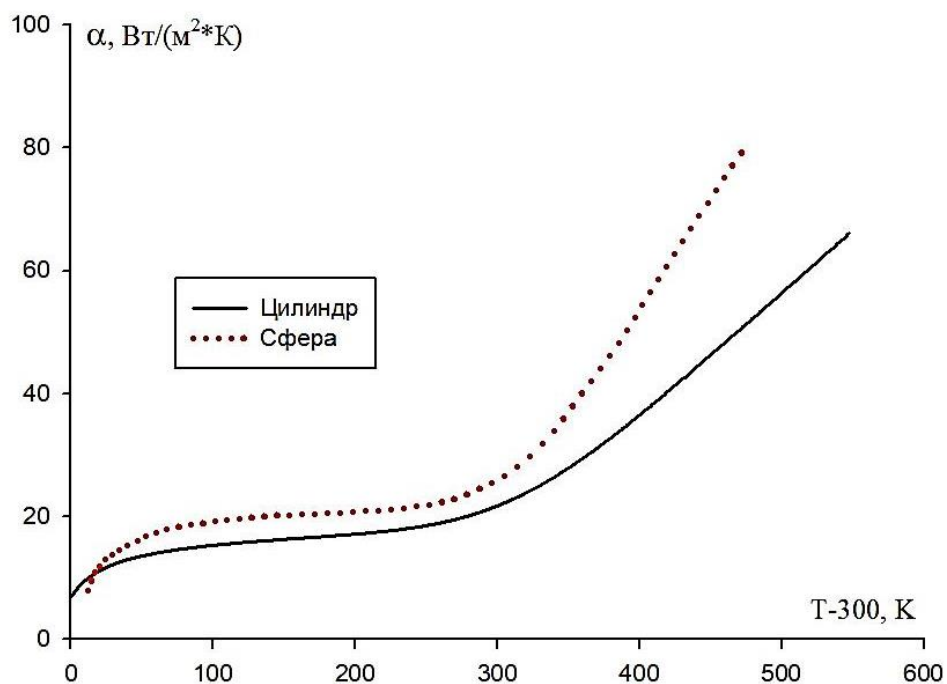


Рис. 4.19. Зависимость коэффициента теплоотдачи цилиндрического ($d=1,5$ см) и сферического ($d=1,765$ см) алюминия марки А5N от величины $T-300$

Как видно, коэффициент теплоотдачи сферических образцов больше, чем у цилиндрических образцов того же объема. Особенно это различие заметно при высоких температурах.

Для выяснения влияния формы на составляющие коэффициента теплоотдачи на рис. 4.20.- 4.23 приведены сравнения температурных зависимостей коэффициентов излучательных теплоотдач сферических и цилиндрических образцов одного и того же объема из алюминия разных марок.

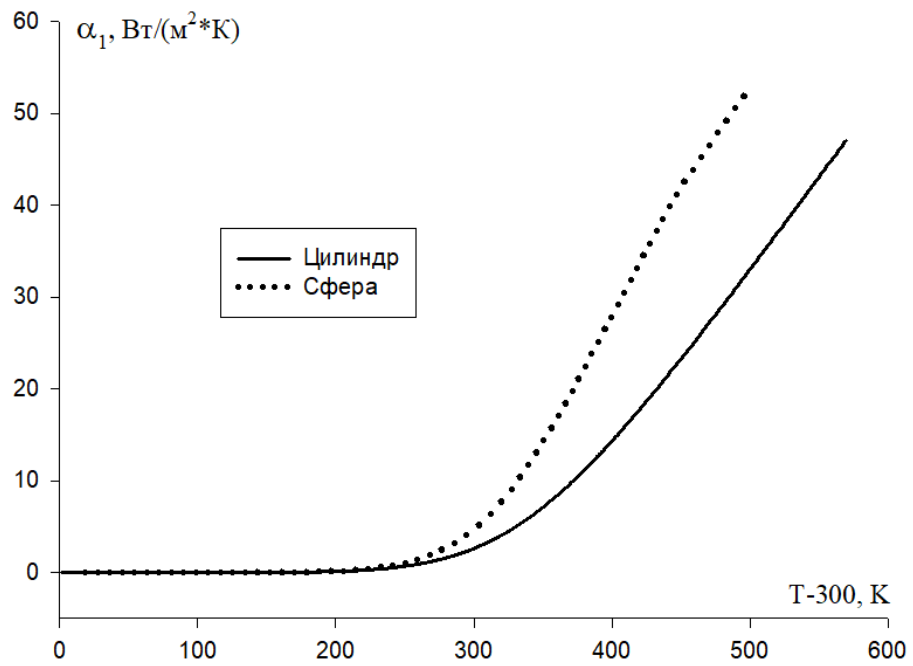


Рис. 4.20. Сравнение зависимостей коэффициентов излучательных теплоотдач цилиндрического ($d=1,5$ см) и сферического ($d=1,765$ см) алюминия марки А0 от величины $T-300$.

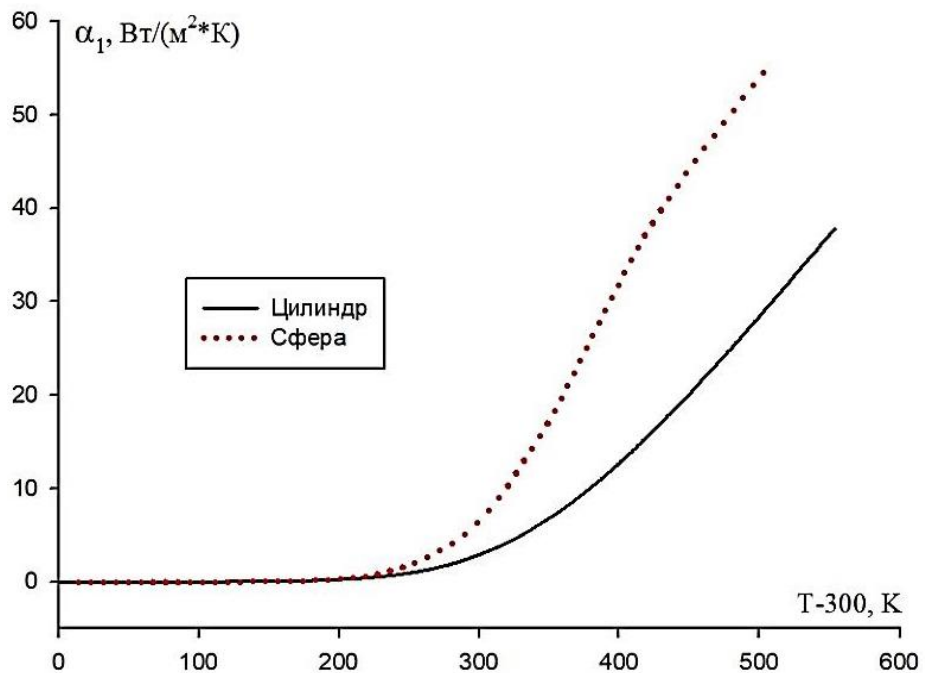


Рис. 4.21. Сравнение зависимостей коэффициентов излучательных теплоотдач цилиндрических ($d=1,5$ см) и сферических ($d=1,765$ см) алюминия марки А5 от величины $T-300$.

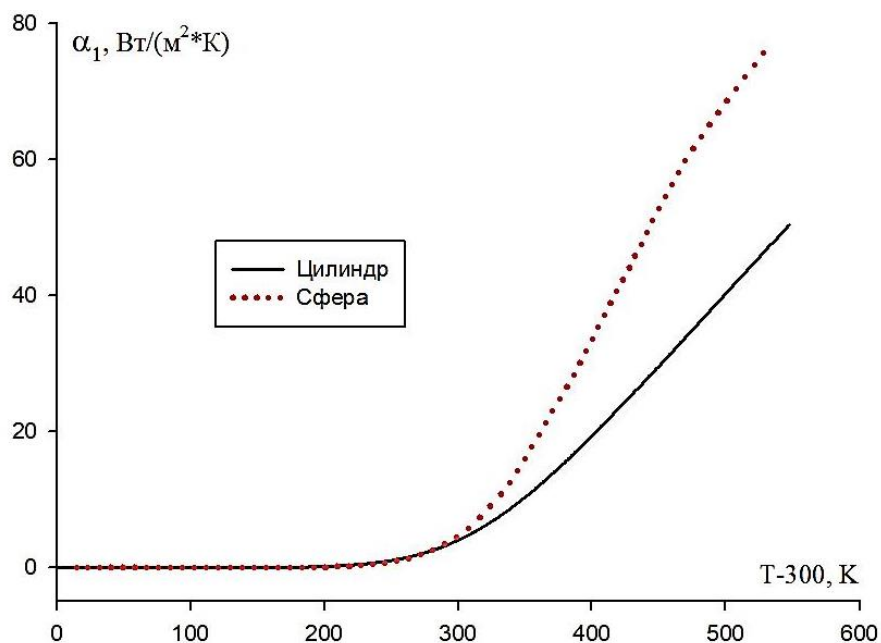


Рис. 4.22. Сравнение зависимостей коэффициентов излучательных теплоотдач цилиндрических ($d=1,5$ см) и сферических ($d=1,765$ см) алюминия марки А5N от величины $T-300$.

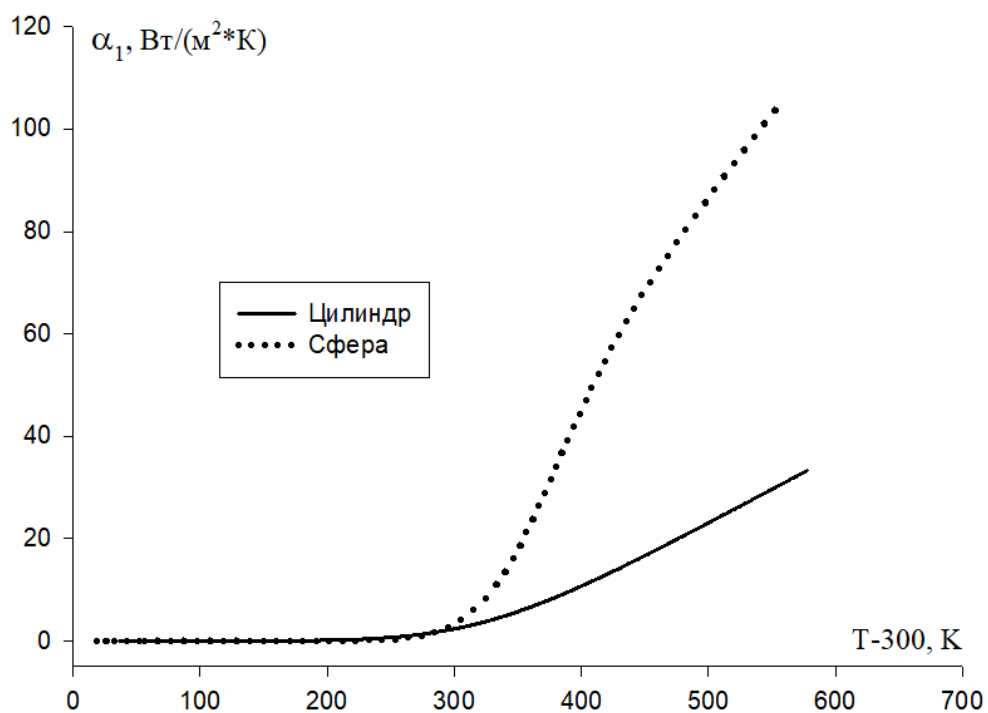


Рис. 4.23. Сравнение зависимостей коэффициентов излучательных теплоотдач цилиндрических ($d=3,0$ см) и сферических ($d=2,82$ см) алюминия марки А5N от величины $T-300$.

На рис. 4.24-4.34 приведено сравнение зависимостей коэффициентов конвективной теплоотдачи сферических и цилиндрических образцов одного и того же объема из алюминия разных марок.

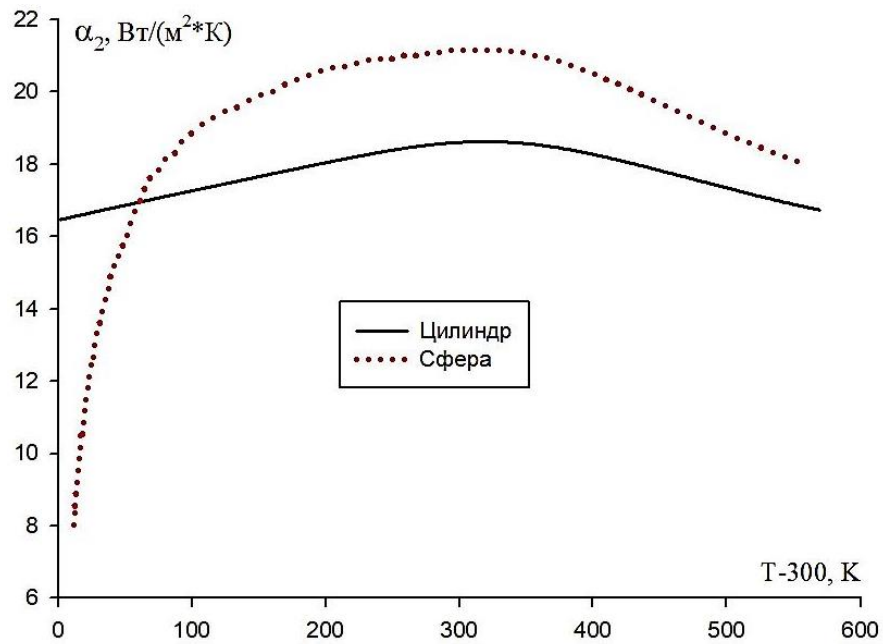


Рис. 4.24. Сравнение зависимостей коэффициентов конвективной теплоотдач цилиндрических ($d=1,5$ см) и сферических ($d=1,765$ см) алюминия марки А0 от величины $T-300$.

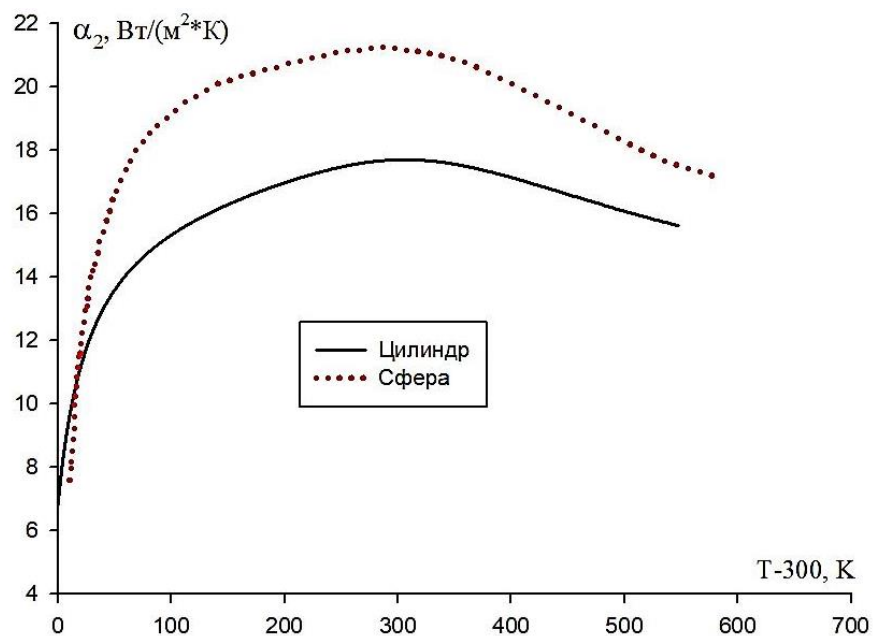


Рис. 4.25. Сравнение зависимостей коэффициентов конвективной теплоотдач цилиндрических ($d=1,5$ см) и сферических ($d=1,765$ см) алюминия марки А5N от величины $T-300$.

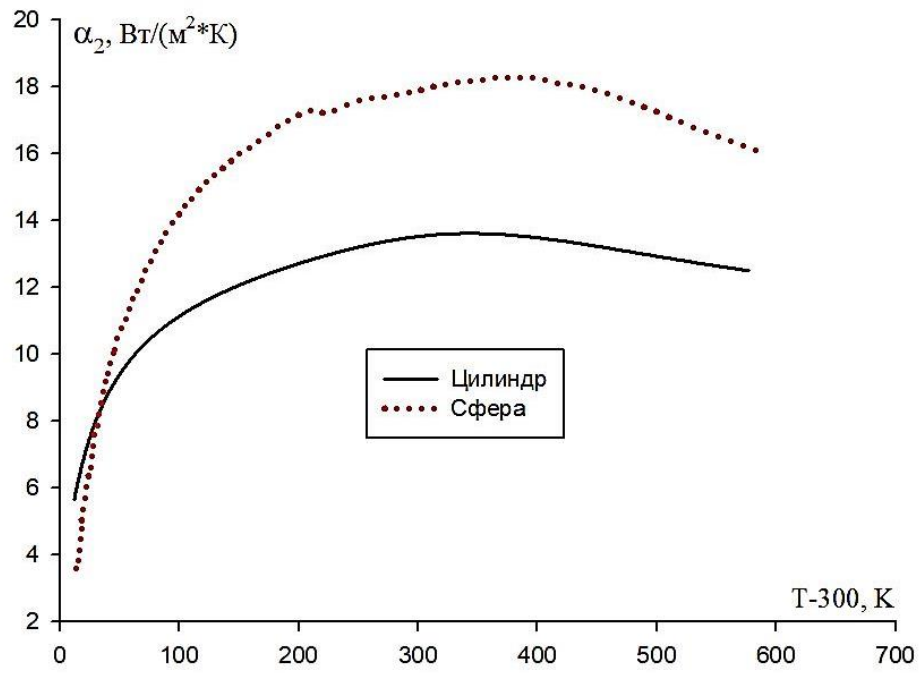


Рис. 4.26. Сравнение зависимостей коэффициентов конвективной теплоотдач цилиндрических ($d=3,0$ см) и сферических ($d=2,82$ см) алюминия марки АВ98 от величины $T-300$.

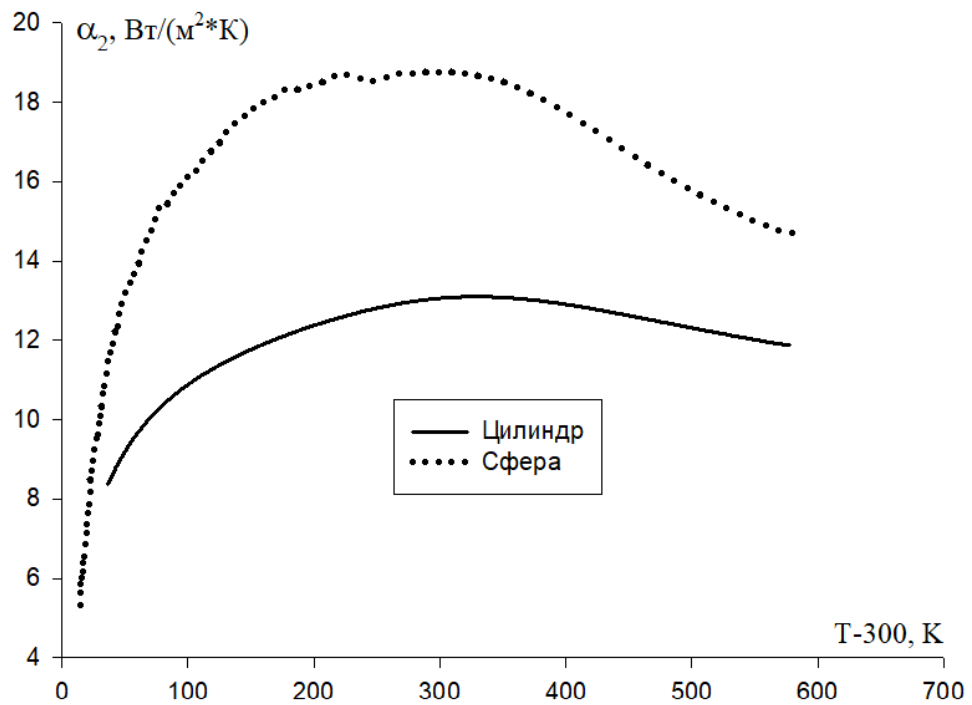


Рис. 4.27. Сравнение зависимостей коэффициентов конвективной теплоотдач цилиндрических ($d=3,0$ см) и сферических ($d=2,82$ см) алюминия марки А5N от величины $T-300$.

4.4. Обсуждение результатов

Характерные времена охлаждения $\frac{c\rho V}{\alpha S} = \tau_i$ зависят от отношения объема образца к его площади поверхности и соответствующего коэффициента теплоотдачи:

$$\tau_i = \tau_i \left(\frac{V}{S} \right).$$

В табл. 4.3 приведены значения характерных времен охлаждения цилиндрических образцов алюминия разных марок в зависимости V/S.

Таблица 4.3.

Значение постоянных в уравнении (3.1) от V/S ($h= 3,368$) см

Марка	Диаметр, м	$\tau_{1,c}$	$\tau_{2,c}$	V/S
A0	0	0	0	0
	0,015	50,00	454,54	0,306
	0,02	92,59	625,00	0,385
	0,025	116,28	769,23	0,456
	0,03	144,90	909,10	0,519
	0,035	216,53	1000,00	0,575
	0,04	416,67	1080,57	0,627
A5	0	0	0	0
	0,015	51,54	400,00	0,306
	0,02	59,52	588,23	0,385
	0,025	94,34	760,33	0,456
	0,03	140,82	909,10	0,519
	0,035	210,55	1000,00	0,575
	0,04	384,60	1092,50	0,627
A6	0	0	0	0
	0,015	44,76	480,23	0,306
	0,02	74,07	625,00	0,385
	0,025	110,97	769,23	0,456
	0,03	164,57	909,10	0,519
	0,035	250,44	1020,10	0,575
	0,04	434,78	1095,57	0,627
AB98	0	0	0	0
	0,015	39,84	454,54	0,306

	0,02	47,39	660,00	0,385
	0,025	67,57	820,33	0,456
	0,03	108,20	940,23	0,519
	0,035	180,64	1028,00	0,575
	0,04	333,33	1095,00	0,627
A5N	0	0	0	0
	0,015	48,31	454,54	0,306
	0,02	51,81	640,00	0,385
	0,025	76,19	820,28	0,456
	0,03	116,09	960,10	0,519
	0,035	180,92	1111,10	0,575
	0,04	384,61	1428,6	0,627

На рисунках 4.28–4.32 представлены графики, демонстрирующие, как меняется характерные время охлаждения цилиндрических образцов алюминия различных марок в зависимости от соотношения объема к площади поверхности (V/S).

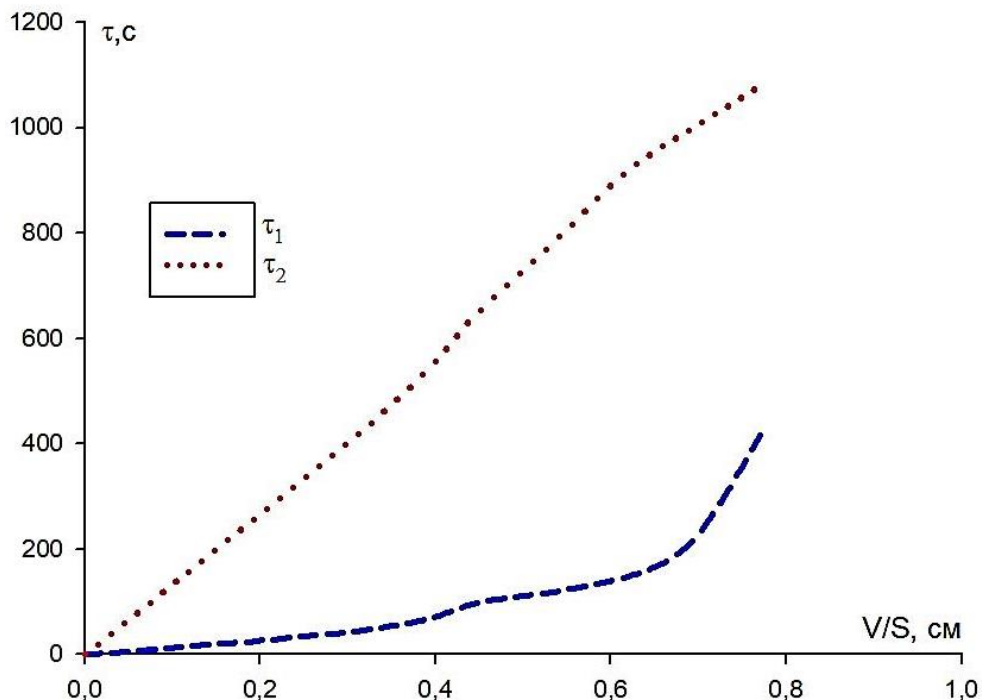


Рис.4.28. Зависимость характерных времен охлаждения цилиндрических образцов алюминия марки А0 от величины V/S .

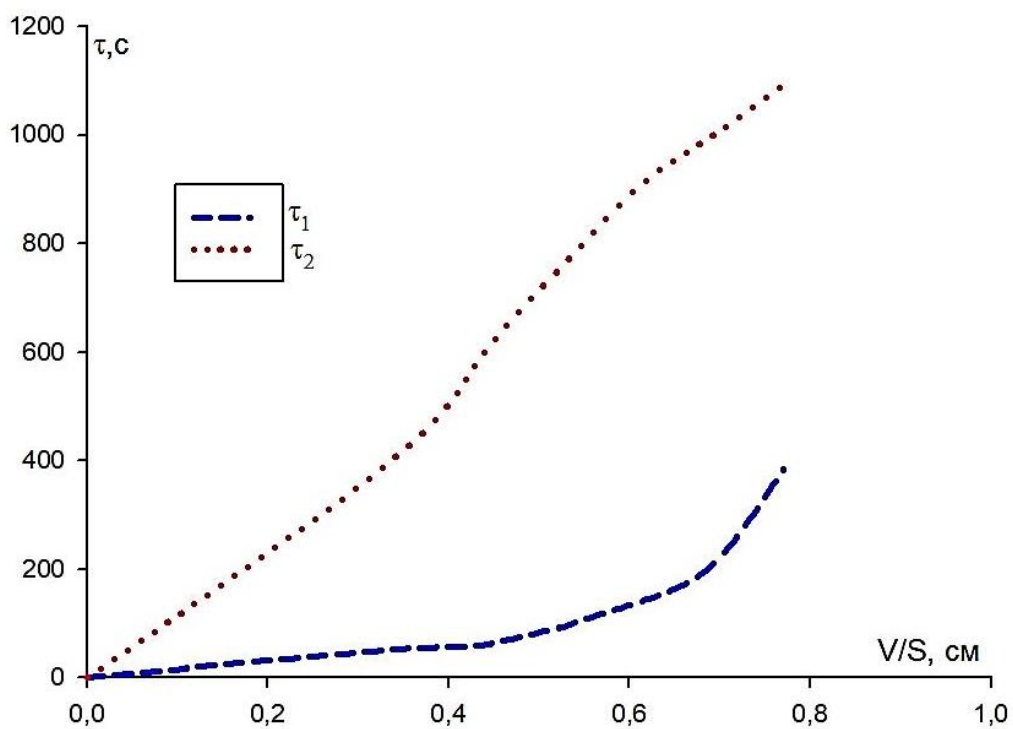


Рис.4.29. Зависимости характерных времен охлаждения цилиндрических образцов алюминия марки А5 от величины V/S .

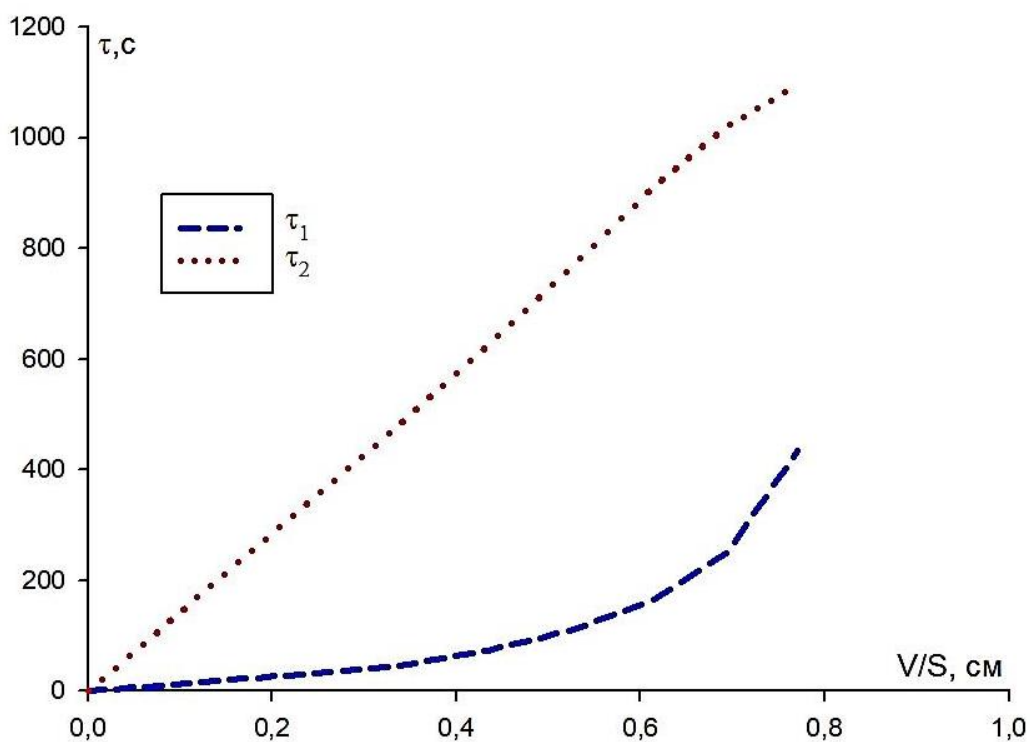


Рис.4.30. Зависимости характерных времен охлаждения цилиндрических образцов алюминия марки А6 от величины V/S .

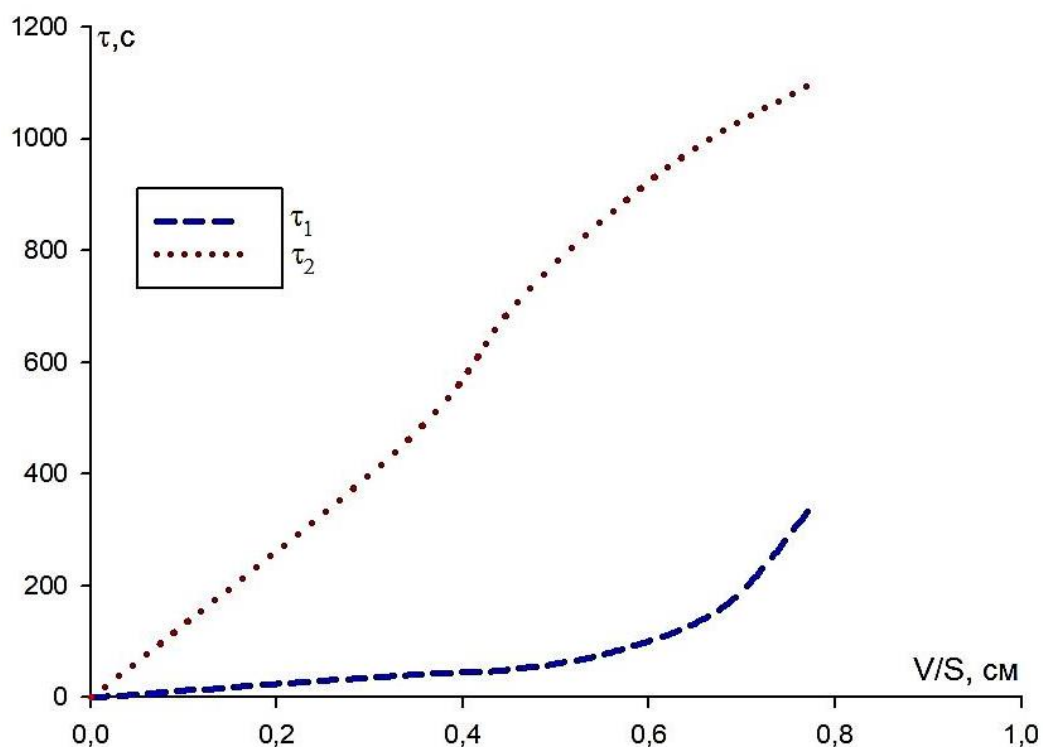


Рис.4.31. Зависимость характерных времен охлаждения цилиндрических образцов алюминия марки АВ98 от величины V/S.

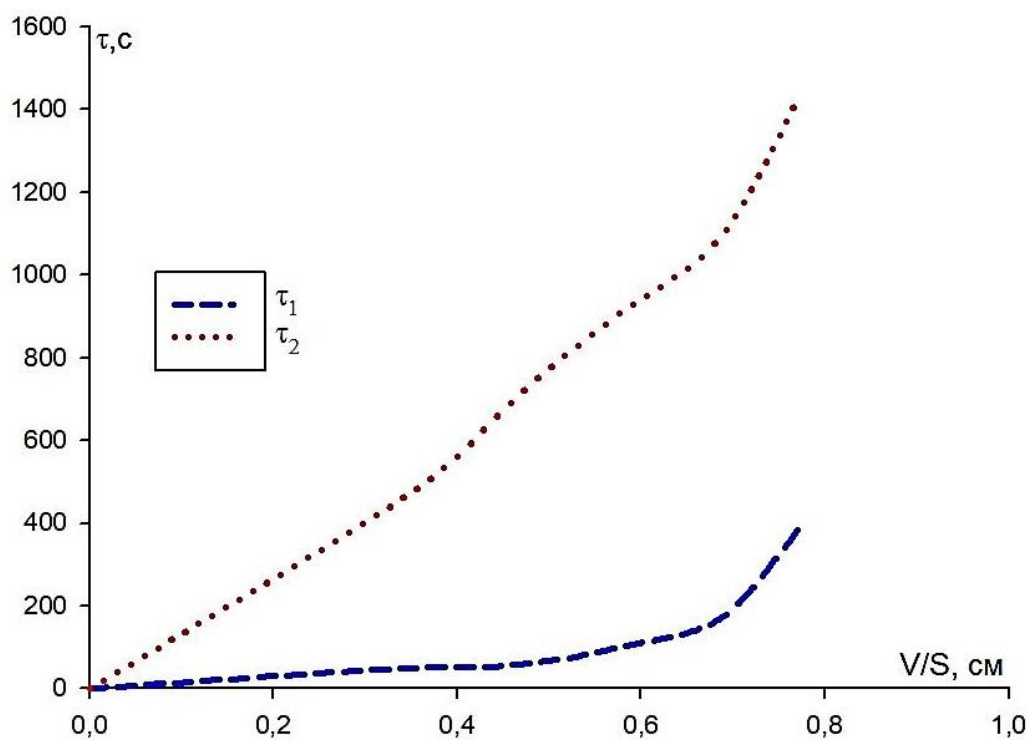


Рис.4.32. Зависимость характерных времен охлаждения цилиндрических образцов алюминия марки А5N от величины V/S.

На рис. 4.33 приведены зависимости характерных времен охлаждения за счет излучения от величины V/S для цилиндрических образцов алюминия разных марок.

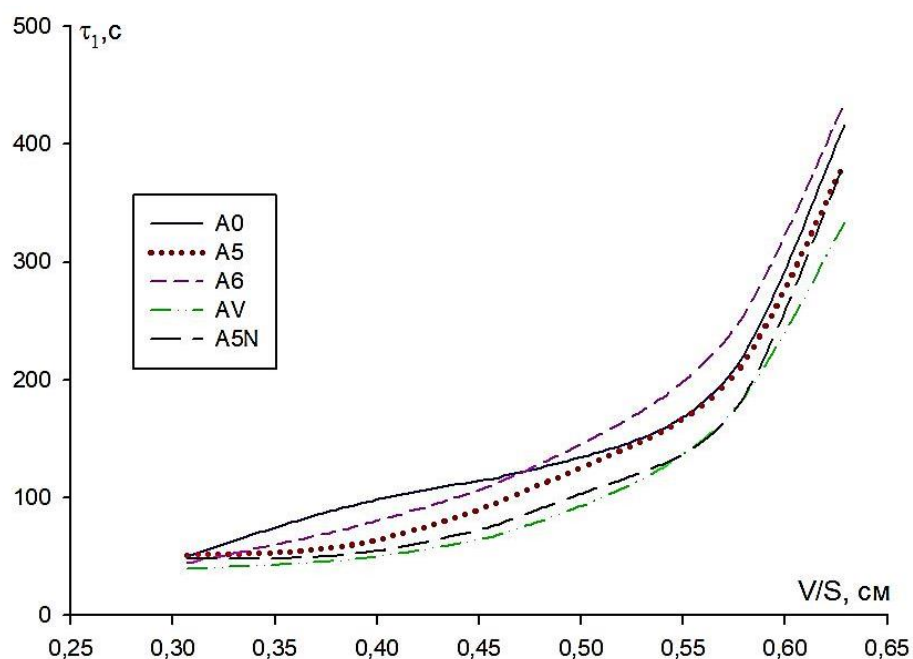


Рис. 4.33. Зависимости характерных времен излучательного охлаждения от величины V/S для цилиндрических образцов алюминия разных марок.

Обработка этих кривых показала, что они подчиняются уравнению $\tau_1 = y_0 + ax + bx^2 + cx^3$ ($x=V/S$). В табл. 4.4 приведены значения постоянных в этом уравнении.

Таблица 4.4

Значения постоянных в уравнении $\tau_1 = y_0 + ax + bx^2 + cx^3$ ($x = V/S$) для цилиндрического алюминия разных марок

Марка	$y_0, с$	$a, с/см$	$b, с/см^2$	$c, с/см^3$	R
A0	0,00	945,0	-3376,0	3659,0	0,9861
A5	0,00	814,4	-3032,0	3379,0	0,9955
A6	0,00	713,0	-2691,3	3216,0	0,9961
AV98	0,00	777,4	-2990,3	3282,0	0,9971
A5N	0,00	1064,8	-4063,2	4285,5	0,9909

Ни рис. 4.34 приведены зависимости характерных времен конвективного охлаждения от величины V/S для цилиндрического алюминия различных марок.

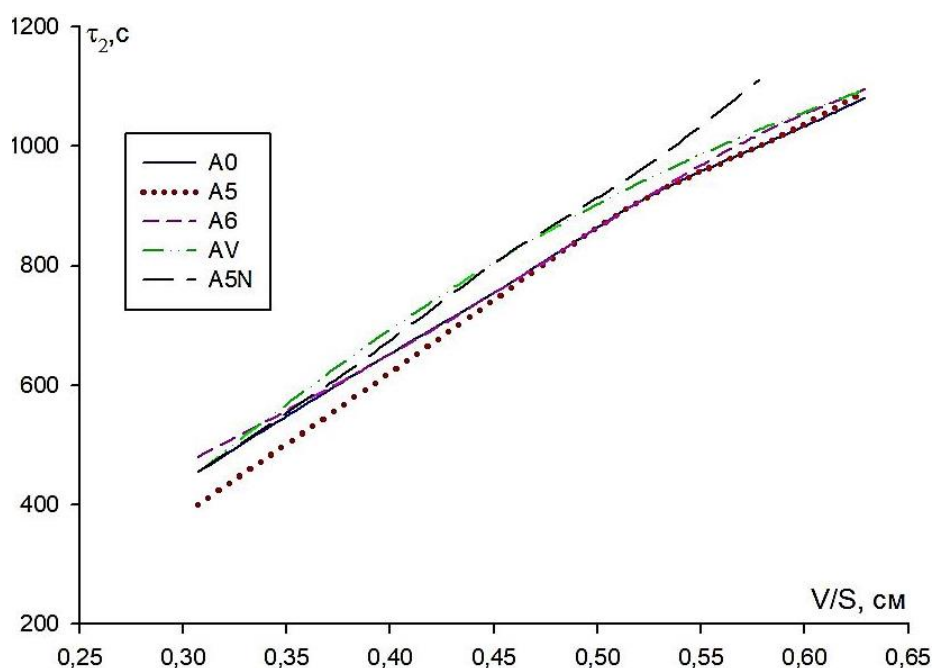


Рис. 4.34. Зависимости характерного времени конвективного охлаждения от величины V/S для цилиндрического алюминия различных марок.

Анализ полученных данных о характерного времени конвективного охлаждения в зависимости от соотношения V/S выявил, что эта зависимость описывается кубическим уравнением.

$$y = y_0 + ax + bx^2 + cx^3, \quad (4.1)$$

где $x = V/S$, $y_0 = 0$. В табл. 4.5 приведены значения постоянных, входящих в уравнение (4.1) для цилиндрических образцов алюминия разных марок.

Таблица 4.5

Значения постоянных в уравнении (4.1) для цилиндрических образцов алюминия разных марок

Марка	y_0, c	$a, c/cm$	$b, c/cm^2$	$c, c/cm^3$	R
-------	----------	-----------	-------------	-------------	-----

A0	0,00	776,0	2406,6	-2072,3	0,9999
A5	0,00	194,2	4056,7	-3216,2	0,9998
A6	0,00	1048,4	1485,4	-1289,8	0,9998
AB98	0,00	508,3	3682,9	-3255,1	0,9990
A5N	0,00	1751,7	2380,4	-1749,3	0,9976

В табл. 4.6 приведены значения характерных времен излучательного τ_1 , и конвективного τ_2 охлаждений сферических образцов алюминия разных марок в зависимости величины V/S .

Таблица 4.6

Значения характерных времен охлаждения сферических образцов алюминия разной марки от величины V/S

Марка	Диаметр, см	τ_1, c	τ_2, c	V/S	h, cm
A0	0	0	0	0	3,368
	1,765	50,00	454,54	0,294	
	2,82	92,59	653,00	0,470	
	3,35	116,28	769,23	0,558	
A5	0	0	0	0	
	1,765	51,54	400,00	0,294	
	2,82	80,00	610,55	0,470	
	3,35	94,34	760,33	0,558	
A6	0	0	0	0	
	1,765	44,76	430,00	0,294	
	2,82	74,07	625,00	0,470	
	3,35	90,00	769,23	0,558	
AB98	0	0	0	0	
	1,765	32,00	454,54	0,294	
	2,82	47,39	660,00	0,470	
	3,35	55,00	820,33	0,558	
A5N	0	0	0	0	
	1,765	40,00	434,00	0,294	
	2,82	55,00	640,00	0,470	

На рис. 4.35-4.39 приведены зависимости характерных времен излучательного и конвективного охлаждения сферических образцов из алюминия разных марок от величины V/S .

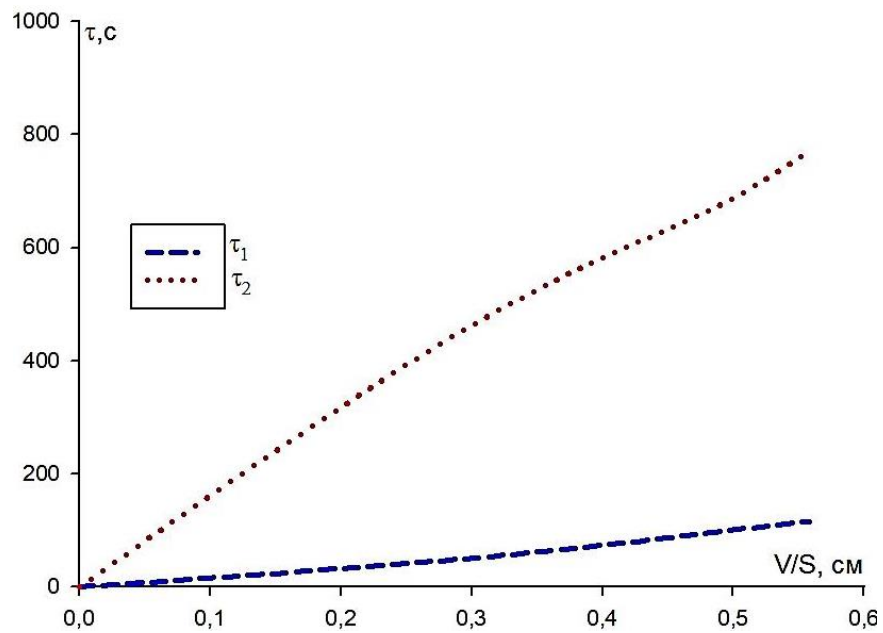


Рис.4.35. Зависимости характерных времен излучательного и конвективного охлаждений сферического алюминия марки А0 от величины V/S .

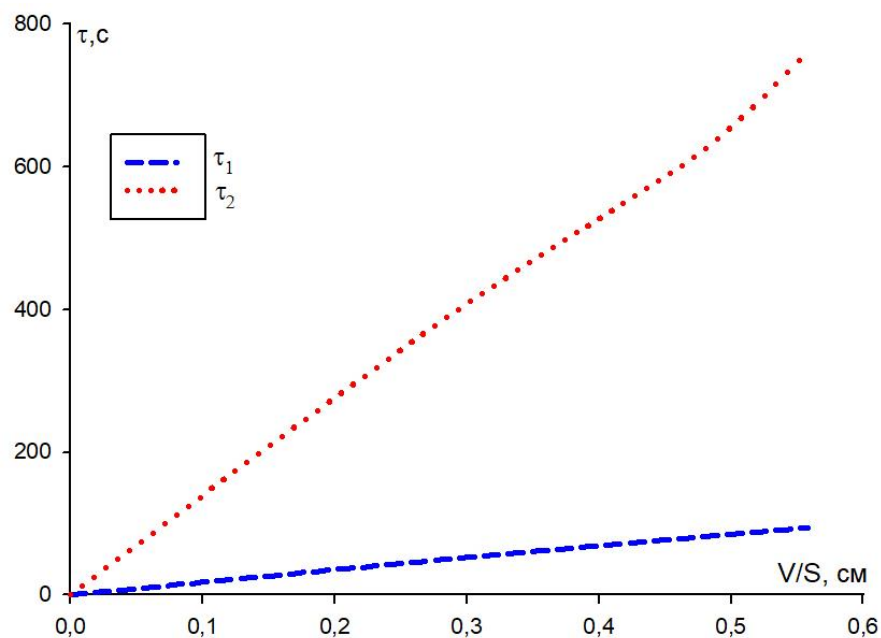


Рис. 4.36. Зависимости характерных времен излучательного и конвективного охлаждений сферического алюминия марки А5 от величины V/S .

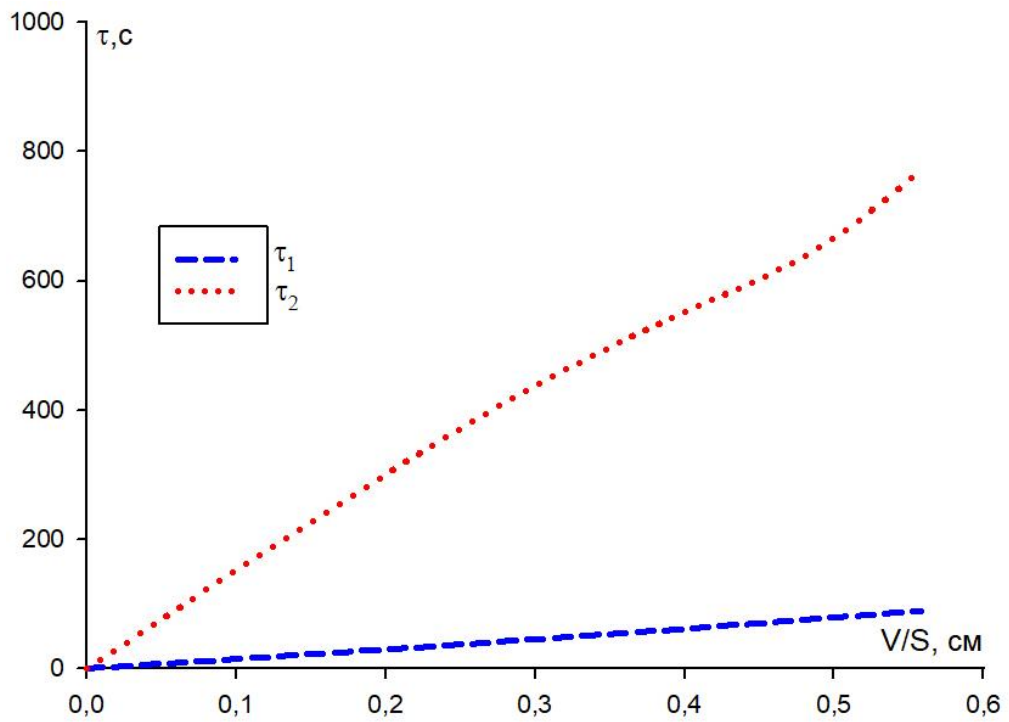


Рис.4.37. Зависимости характерных времен излучательного и конвективного охлаждения сферического алюминия марки А6 от величины V/S .

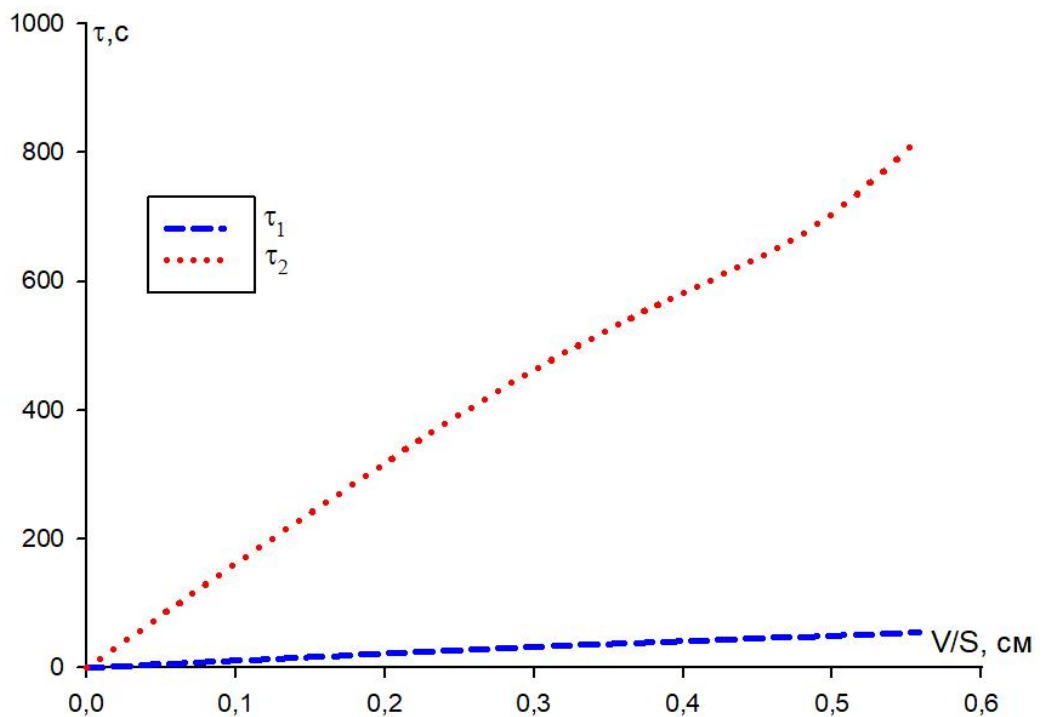


Рис. 4.38. Зависимости характерных времен излучательного и конвективного охлаждения сферического алюминия марки АВ98 от величины V/S

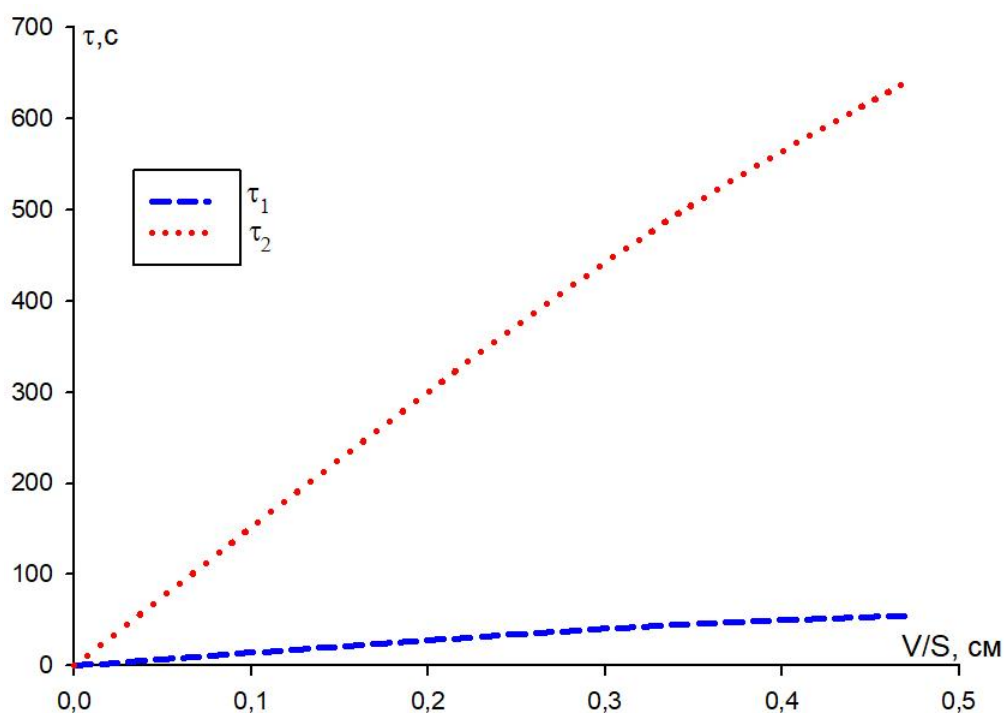


Рис. 4.39. Зависимости характерных времен излучательного и конвективного охлаждения сферического алюминия марки А5N от величины V/S

При одинаковых объемах площадь поверхности сферических образцов меньше, чем цилиндрических. Поэтому коэффициент теплоотдачи сферических образцов больше, чем цилиндрических.

В главе 1 было показано, что теплоемкость не зависит от размера образца. Для наноразмерных образцов она увеличивается всего на нескольких процентах. Величина теплоемкости для данной марки алюминия зависит только от температуры. Полученные результаты показывают, что с ростом диаметра цилиндрических и сферических образцов коэффициенты теплоотдачи уменьшаются. Поэтому зависимости характерных времен охлаждения цилиндрических образцов от отношения объема образца к его площади поверхности нелинейно увеличиваются.

Числа Био и Фурье являются критериями теплового подобия. Коэффициент температуропроводности алюминия в интервале температур 300-900 К $a = (84 \pm 2) 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$.

На рисунках 16 и 17 можно увидеть, как меняется разница между температурой объекта и температурой окружающей среды в зависимости от числа Фурье для образцов алюминия марки А0 в форме цилиндра и сферы с различными диаметрами.

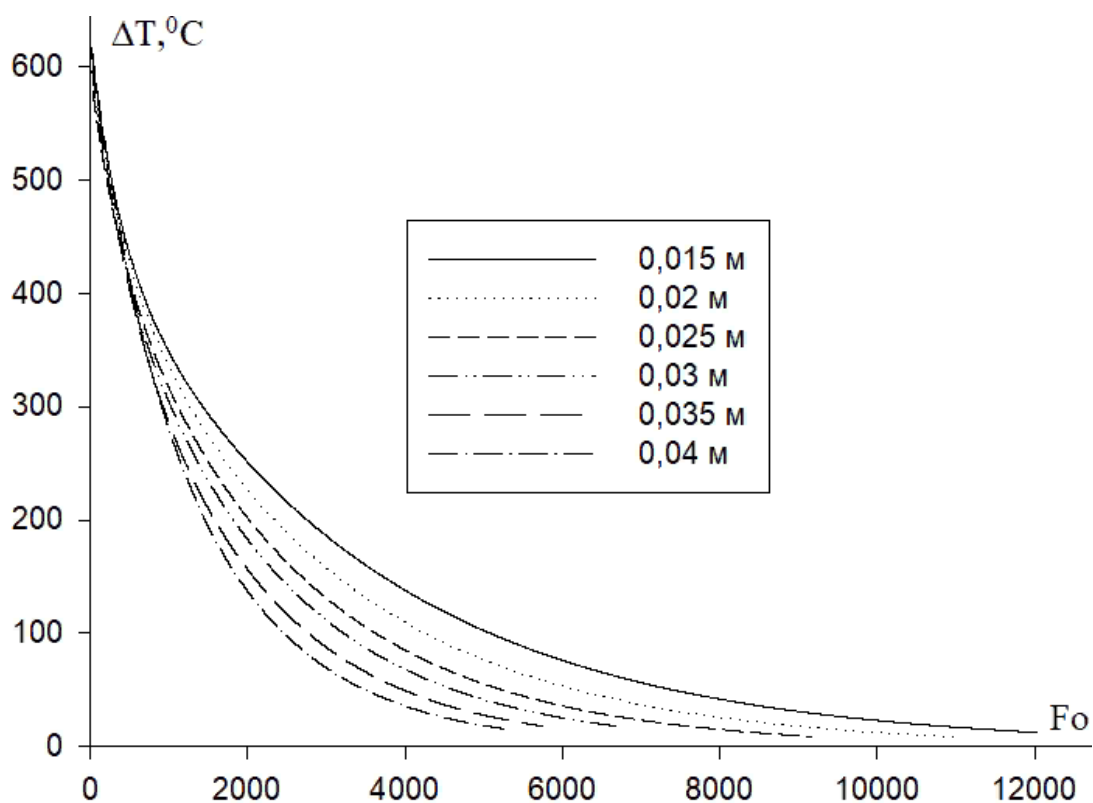


Рис.4.40. Зависимость ΔT от числа Фурье Fo для цилиндрических образцов из алюминия марки А0 различного диаметра

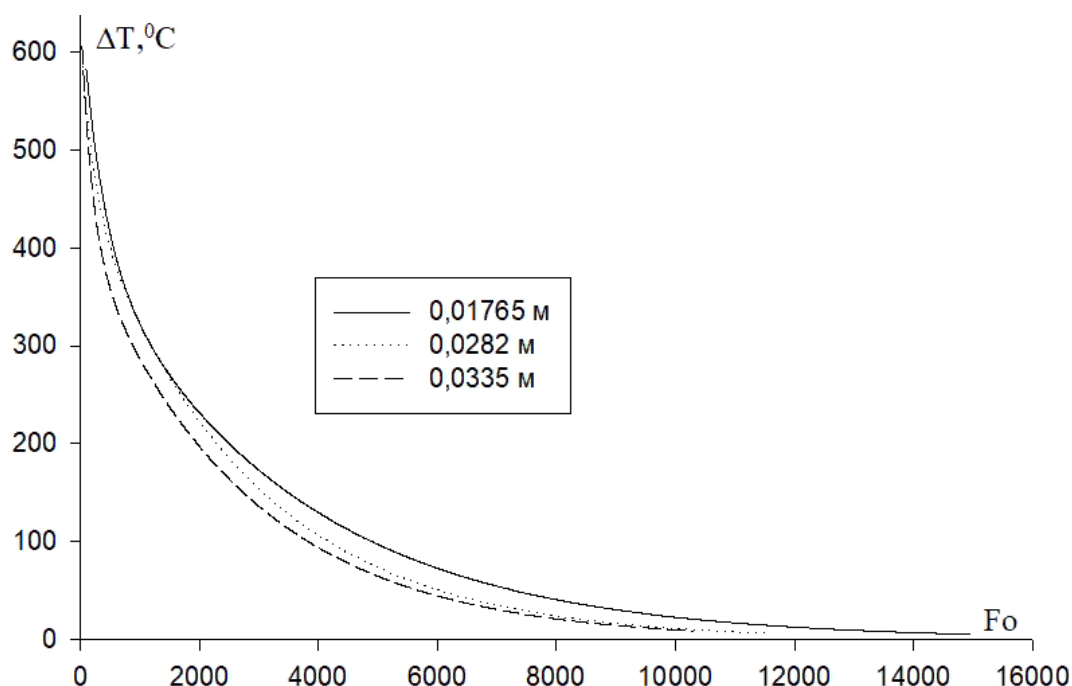


Рис.4.41. Зависимость ΔT от числа Фурье Fo для сферических образцов из алюминия марки А0 различного диаметра

Экспериментальная зависимость температуры образца от времени охлаждения выражается уравнением подобия (1.17) для всех исследованных объектов. Величины $\tau_{и}$ и $\tau_{к}$ определяем при обработке экспериментальных кривых охлаждения. Поэтому более обосновано рассматривать зависимость разности температуры ΔT от $\frac{\tau}{\tau_i} = Bi Fo$. На рисунках 4.42-4.43 в качестве примера приведены такие зависимости для цилиндрических и сферических образцов разного диаметра алюминия марки А0.

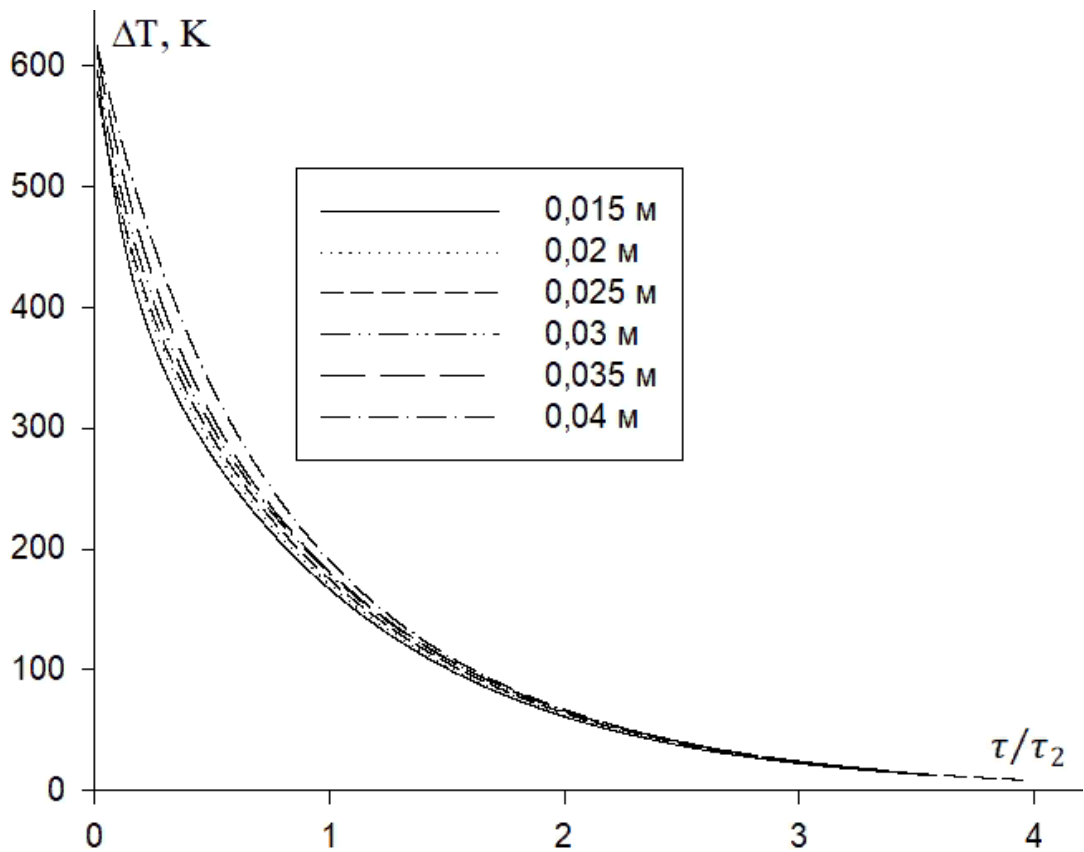


Рис.4.42. Зависимость ΔT от $\frac{\tau}{\tau_2} = BiFo$ для цилиндрических образцов из алюминия марки А0 различного диаметра

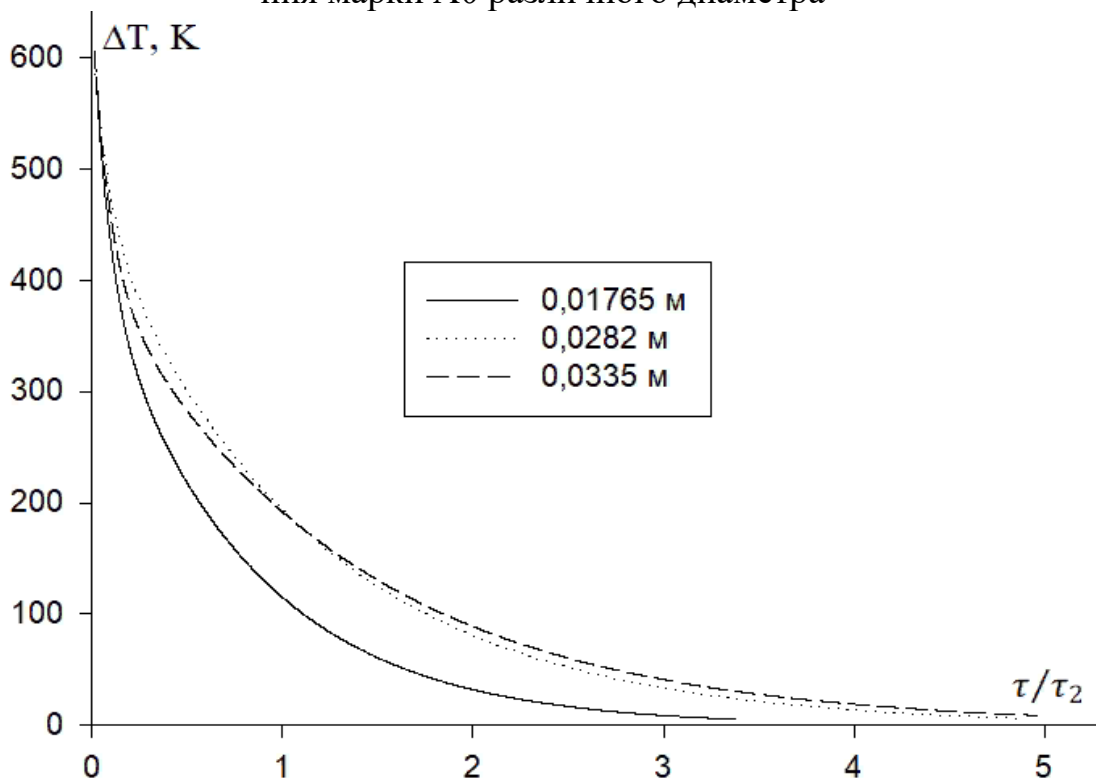


Рис.4.43. Зависимость ΔT от $\frac{\tau}{\tau_2} = BiFo$ для сферических образцов из алюминия марки А0 различного диаметра

Зависимость $\frac{\Delta T}{(\Delta T)_{\tau=0}}$ от $\frac{\tau}{\tau_2} = BiFo = N$ для всех образцов будет одинаковая.

На рис. 4.44 приведена зависимость $\frac{\Delta T}{(\Delta T)_{\tau=0}}$ от $\frac{\tau}{\tau_2} = BiFo = N$.

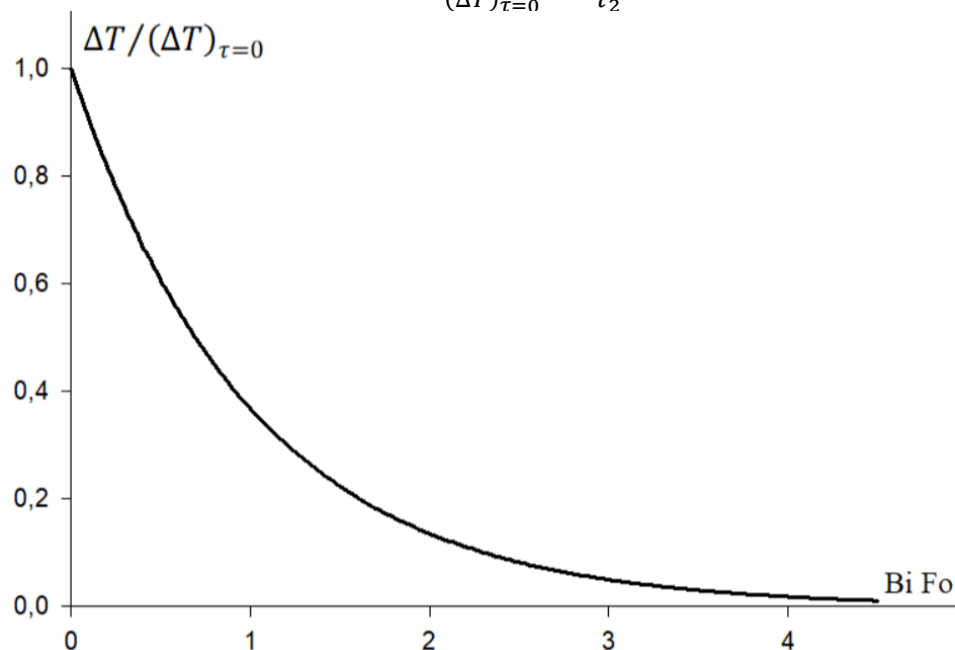


Рис. 4.44. Зависимость $\frac{\Delta T}{(\Delta T)_{\tau=0}}$ от $\frac{\tau}{\tau_2} = BiFo = N$

На рисунке 4.44 наглядно показано, как можно определить температуру различных тел при охлаждении в условиях охлаждения.

Поскольку коэффициент черноты с ростом температуры тела увеличивается, то вклад теплового излучения заметен лишь при высоких температурах [144-146]. Под коэффициентом излучательного теплообмена будем подразумевать коэффициент излучательной теплоотдачи поверхности твердого тела. Этот коэффициент значительно меняется с повышением температуры. При температурах от 300 до 500 кельвинов основная доля тепла передаётся конвекцией, а при более высоких температурах — излучением.

Процесс передачи тепла всегда связан с теплопроводностью, поскольку при движении молекул газа происходит соприкосновение частиц с разной температурой. Когда тепло передаётся одновременно конвекцией и теплопроводностью, это называется конвективным теплообменом. Средние значения коэф-

коэффициента теплоотдачи при свободной конвекции воздуха составляют от 5 до 30 Вт/(м²·К). Полученные нами результаты соответствуют этим значениям.

Коэффициент теплоотдачи α определяет, насколько интенсивно происходит теплообмен между поверхностью объекта и окружающей средой. Он показывает, какое количество тепла передаётся от единицы поверхности стенки в окружающую среду за единицу времени при разнице температур между ними в один градус.

Ключевая цель при проектировании теплообменных устройств — вычислить коэффициент теплоотдачи. Теоретически этот параметр можно определить с помощью критериальных уравнений, которые получают путём преобразования дифференциальных уравнений гидродинамики и конвективного теплообмена с использованием методов теории подобия. Если значение числа Нуссельта известно, то коэффициент конвективной теплопередачи можно вычислить по формуле (1.1).

Коэффициент теплоотдачи определяется различными параметрами, среди которых: размеры и форма исследуемого объекта, материал, из которого изготовлен объект, температура объекта и окружающей среды, тип конвекции, состояние поверхности объекта и другие факторы. В связи с этим, для каждого конкретного случая коэффициент теплообмена определяется экспериментально.

В целом интенсивность сложного теплообмена в этом случае характеризуют суммарным коэффициентом теплоотдачи $\alpha = \alpha_k + \alpha_l$. При этом считается, что процессы конвекция и излучение независимы друг от друга.

При свободной конвекции для вычисления коэффициента конвективной теплоотдачи используют число Нуссельта. Конкретные числа подобия получают в результате анализа дифференциальных уравнений, описывающих изучаемое явление. Применительно к конвективному теплообмену наиболее распространены следующие числа подобия:

Число Нуссельта - характеризует связь между интенсивностью теплоотдачи и температурным полем в пограничном слое потока. Получен из диффе-

ренциального уравнения теплоотдачи применительно к двум заранее подобным явлениям:

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial n} = \alpha \Delta t, \quad Nu = \frac{\alpha l_0}{\lambda}.$$

Число Нуссельта — это показатель, который характеризует, насколько эффективно поверхность тела охлаждается при естественной конвекции, то есть без использования дополнительных устройств. Этот критерий является одним из ключевых для оценки эффективности теплообмена в газообразных средах, таких как воздух. Чем выше значение коэффициента Нуссельта, тем лучше происходит теплообмен.

Число Грасгофа - мера отношения силы молекулярного трения к подъемной силе, обусловленной различием плотностей газа в отдельных точках неизотермического потока.

$$Gr = \frac{g l_0^3}{\nu^2} \beta \Delta t.$$

Число Прендтля показывает, насколько сильно конвективный тепловой поток превышает теплопроводность газа. Число Прандтля для газов является практически постоянной величиной, не зависящей от температуры (в частности, для воздуха $Pr = 0,722$). Оно вычисляется, как отношение теплопроводности к вязкости

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha}.$$

Физические параметры, входящие в числа подобия зависят от температуры. Поэтому заранее оговаривается, при какой температуре их следует выбирать. Эта температура называется определяющей.

При свободной конвекции для вычисления коэффициент конвективной теплоотдачи поверхности обычно пользуются критериальным уравнением М. А. Михеева [83]:

$$Nu = C Ra^n \left(\frac{Pr}{Pr_c} \right)^{0,25} \quad (4.2)$$

где C , n и $0,25$ - эмпирические (определяемые из опыта) постоянные.

Для газов множитель $\left(\frac{Pr}{Pr_c}\right)^{0,25}$ близок к единице, так как $Pr \approx Pr_c$ в силу слабой зависимости числа Прандтля газов от температуры, поэтому для газов формула (4.2) принимает более простой вид:

$$Nu = C Ra^n \quad (4.3)$$

В таблице 4.7 представлены значения коэффициента C и степени « n » в зависимости от произведения $Gr Pr$.

Таблица 4.7. Значение коэффициента C и показателя степени n

Режим	$Gr Pr$	C	n
Ламинарный	$1 \cdot 10^{-3} \div 5 \cdot 10^2$	1,18	0,125
Переходный	$5 \cdot 10^2 \div 2 \cdot 10^7$	0,54	0,25
Турбулентный	$2 \cdot 10^7 \div 1 \cdot 10^{12}$	0,185	0,33

В таблице 1.1 приведены значения $\frac{Gr}{\Delta T l^3}$ для сухого воздуха.

$$\frac{Ra}{\Delta T l^3} = g \frac{1}{T} \frac{C_p \rho^2}{\lambda \mu} \quad (4.4)$$

В виду того, что число Рэлея для всего диапазона температур воздуха не превышало 500, течение рассматриваем как ламинарное.

Уравнение (4.4) применимо для тел любой формы при омывании их газами при $Pr > 0,7$; за определяющую температуру принимают среднюю температуру пограничного слоя $T_0 = 0,5(T_{\Pi} + T_c)$, где T_{Π} - температура поверхности образца, T_c - температура среды на большом удалении от нагретого тела; за определяющий геометрический размер: $\frac{V}{S}$.

Если известно значение число Нуссельта Nu , то коэффициент конвективной теплоотдачи можно вычислить, используя формулу:

$$\alpha_k = \frac{Nu \lambda S}{V} \quad (4.5)$$

Из формулы (4.5) вытекает, что коэффициент конвективной теплоотдачи зависит от геометрических размеров образца, но не зависит от материала. Определяющей температурой в выражение (4.5) является температура окружа-

ющей среды T_c . Теплопроводность воздуха $0,026 \text{ Вт / (м К)}$ при 300 К . В таблице 4.8 приведены результаты вычисления коэффициента конвективного теплообмена для сферического образца из алюминия марки А5N диаметром $d=1,765 \text{ см}$. За определяющую температуру принимали температуру поверхности T_n .

Таблица 4.8. Вычисленные значения коэффициента конвективной теплоотдачи для сферического образца из алюминия марки А5N диаметром $d=1,765 \text{ см}$

T, К	$\lambda, 10^{-2}$ Вт м ⁻¹ К ⁻¹	Pr	$\frac{Gr}{l^3 \Delta t}, 10^6$ м ⁻³ К ⁻¹	Gr	Ra	Nu	α_k
300	2,624	0,708	132,9				
350	3,003	0,697	65,10	82,677	57,62	1,96	17,5
400	3,365	0,689	36,56	92,862	63,98	1,98	17,7
450	3,707	0,683	26,15	99,631	68,05	2,00	17,8
500	4,038	0,680	13,66	69,392	47,19	1,91	17,0
550	4,360	0,680	9,081	57,664	39,21	1,87	16,7
600	4,659	0,680	6,215	47,358	32,20	1,82	16,2
650	4,953	0,682	4,413	39,231	26,75	1,78	15,9
700	5,230	0,684	3,196	32,471	22,21	1,74	15,5
750	5,509	0,686	2,388	27,294	18,72	1,70	15,2
800	5,779	0,689	1,810	22,987	15,84	1,67	14,9
850	6,028	0,692	1,406	19,641	13,59	1,63	14,5
900	6,279	0,696	1,104	16,824	11,71	1,60	14,3

В таблице 4.9 приведены результаты вычисления коэффициента конвективного теплообмена для сферического образца из алюминия марки А5N диаметром $d=1,765 \text{ см}$. За определяющую температуру около нагретого тела принимали среднюю температуру пограничного слоя $T_0 = 0,5(T_n + T_c)$.

Таблица 4.9

Вычисленные значения коэффициента конвективной теплоотдачи для сферического образца из алюминия марки А5N диаметром $d=1,765 \text{ см}$

T, К	$\lambda, 10^{-2}$ Вт м ⁻¹ К ⁻¹	Pr	$\frac{Gr}{l^3 \Delta t}, 10^6$ м ⁻³ К ⁻¹	$\Delta T, \text{ К}$	Gr	Ra	Nu	α_k
------	--	----	--	-----------------------	----	----	----	------------

325	2,81	0,701	95,6	25	60,71	42,55	1,88	16,8
350	3,00	0,697	65,10	50	82,68	57,63	1,96	17,5
375	3,18	0,693	47,5	75	90,49	62,71	1,98	17,6
400	3,36	0,689	36,56	100	92,86	64,00	1,99	17,7
425	3,54	0,686	31,35	125	99,54	68,28	2,00	17,9
450	3,71	0,683	26,15	150	99,63	68,05	2,00	17,8
475	3,87	0,681	21,03	175	93,48	63,66	1,98	17,7
500	4,04	0,680	13,66	200	69,39	47,18	1,91	17,0
525	4,20	0,680	11,37	225	65,00	44,20	1,89	16,9
550	4,36	0,680	9,08	250	57,66	39,20	1,87	16,7
575	4,52	0,680	7,79	275	54,41	37,0	1,85	16,5
586,5	4,60	0,680	7,5	286,5	54,00	36,7	1,85	16,5

На рисунке 4.45 приведено сравнение зависимости коэффициента конвективной теплоотдачи от температуры для сферического образца из алюминия марки А5N диаметром $d=1,765$ см при определяющей температуре $T_0 = T_{\Pi}$ и $T_0 = 0,5(T_{\Pi} + T_c)$.

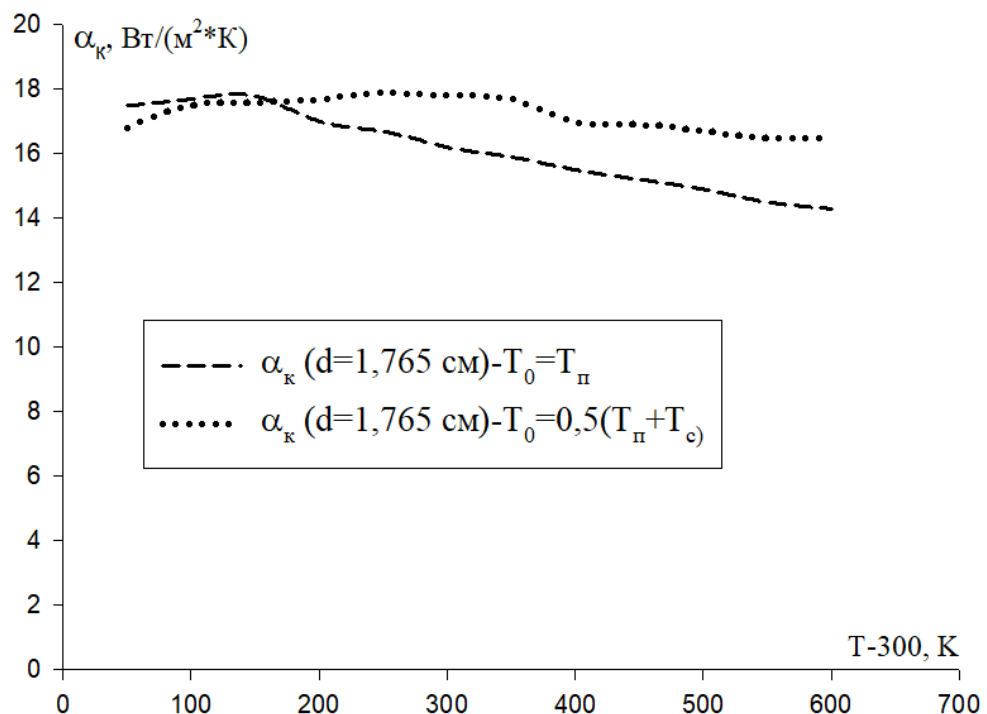


Рис. 4.45. Зависимость коэффициента конвективной теплоотдачи от температуры

Как видно из рисунка при определении коэффициента конвективной теплоотдачи можно принимать определяющую температуру равным температуры поверхности образца.

В таблице 4.46 и 4.47 приведены результаты вычисления числа Релея по формуле (4.6) и коэффициента конвективного теплообмена для цилиндрического образца из алюминия марки А5N диаметрами $d=4$ см и $d=1,5$ см.

$$Ra = 4,04 \cdot 10^9 \frac{\Delta T \left(1 + \frac{112}{T}\right)^2}{\left(\frac{T}{100}\right)^4} \left(\frac{V}{S}\right)^3. \quad (4.6)$$

Число Релея $Ra < 500$, поэтому для расчета числа Нуссельта использовали предложенную формулу академика Михеева [83]

$$Nu = 1,18Ra^{0,125}.$$

За определяющую температуру принимали среднюю температуру пограничного слоя $T_0 = 0,5(T_{\text{п}} + T_{\text{с}})$.

Таблица 4.10

Вычисленные значения коэффициента конвективной теплоотдачи для цилиндрического образца из алюминия марки А5N диаметром $d=4$ см $T_{\text{с}}=300$ К

T_0, K	ΔT	$4,04 \frac{\Delta T \left(1 + \frac{112}{T}\right)^2}{\left(\frac{T}{100}\right)^4}$	$Ra,$	Nu	$\alpha_{\text{к}}$	$T_{\text{п}}$
325	25	1,64	403,44	2,50	10,4	350
350	50	2,34	575,64	2,61	10,9	400
375	75	2,58	634,68	2,64	11,0	450
400	100	2,59	637,14	2,64	11,0	500
425	125	2,46	605,16	2,63	11,0	550
450	150	2,31	568,26	2,61	11,0	600
475	175	2,12	521,52	2,58	11,0	650
500	200	1,94	477,24	2,55	10,6	700
525	225	1,75	430,5	2,52	10,6	750
550	250	1,59	391,14	2,49	10,4	800
575	275	1,45	356,7	2,46	10,3	850
586,5	286,5	1,39	341,94	2,45	10,3	873

Таблица 4.11

Вычисленные значения коэффициента конвективной теплоотдачи для цилиндрического образца из алюминия марки А5N диаметром $d=1,5$ см $T_c=300$ К

T_o, K	ΔT	$4,04 \frac{\Delta T \left(1 + \frac{112}{T}\right)^2}{\left(\frac{T}{100}\right)^4}$	Ra	Nu	α_k	T_n
325	25	1,64	46,9	1,91	16,3	350
350	50	2,34	66,9	1,99	17,0	400
375	75	2,58	73,8	2,02	17,3	450
400	100	2,59	74,1	2,02	17,3	500
425	125	2,46	70,3	2,00	17,1	550
450	150	2,31	66,1	2,00	17,1	600
475	175	2,12	60,6	1,97	16,9	650
500	200	1,94	55,5	1,95	16,7	700
525	225	1,75	50,0	1,92	16,4	750
550	250	1,59	45,5	1,90	16,3	800
575	275	1,45	41,5	1,88	16,1	850
586,5	286,5	1,39	39,7	1,87	16,0	873

На рисунке 4.46 приведены зависимости вычисленных коэффициентов конвективной теплоотдачи от температуры для диаметров образца 1,5 и 4 см.

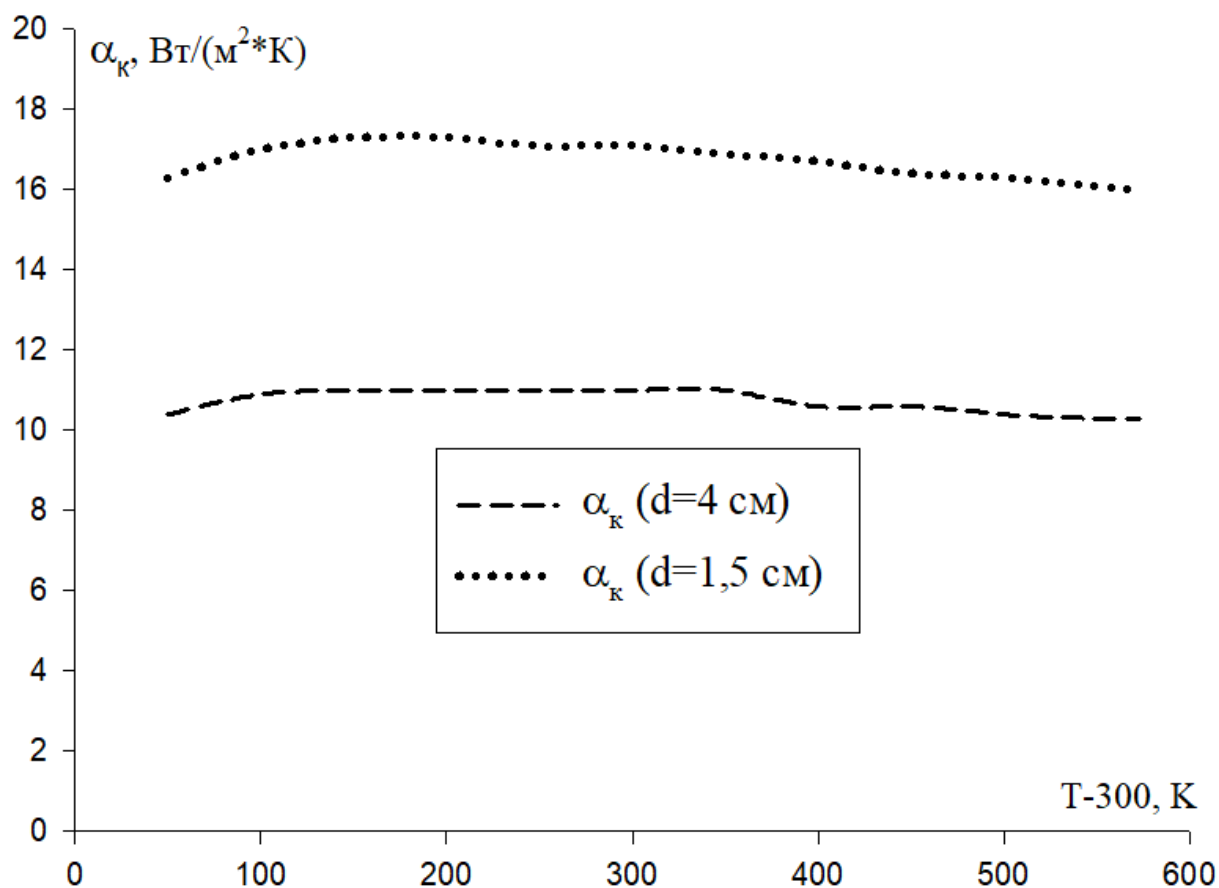


Рис.4.46. Зависимости вычисленных коэффициентов конвективной теплоотдачи от температуры для диаметров образца 1,5 см и 4 см

Как видно из рис.4.46 с ростом температуры коэффициент конвективной теплоотдачи в пределах погрешности остается постоянным, а с увеличением диаметра уменьшается.

На рисунок 4.47 приведено сравнение вычисленных и экспериментальных зависимостей коэффициентов конвективной теплоотдачи от температуры для образцов из алюминия марки А5N диаметрами 4 см и 1,5 см.

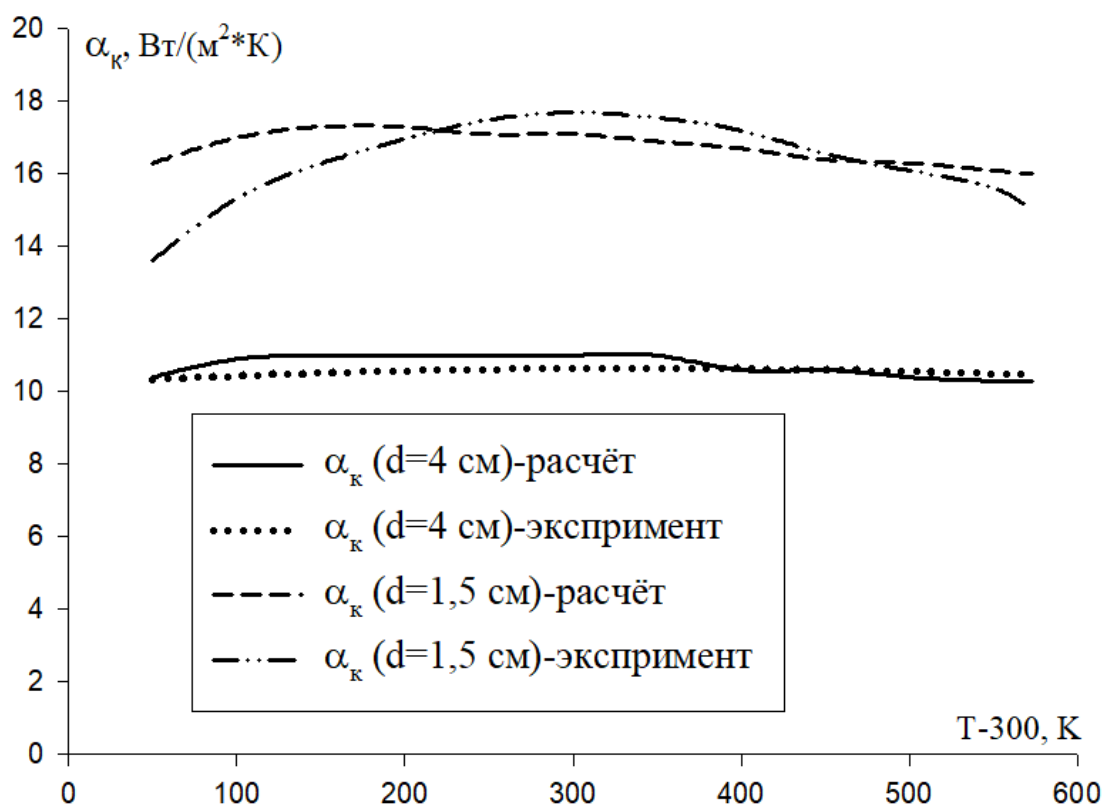


Рис.4.47. Зависимости вычисленных и экспериментальных значений α_k от температуры для образцов алюминия марки А5N

Как демонстрирует график на рисунке 4.47, результаты наших экспериментов по измерению коэффициентов конвективной теплоотдачи соответствуют теоретическим значениям, рассчитанным на основе теории подобия.

В таблице 4.12 представлены данные о расчёте коэффициента конвективного теплообмена для алюминиевого образца сферической формы марки А5N с диаметром $d = 1,765$ см. В качестве определяющей температуры была выбрана средняя температура пограничного слоя $T_0 = 0,5(T_{\text{п}} + T_{\text{с}})$.

Таблица 4.12

Вычисленные значения коэффициента конвективной теплоотдачи для сферического образца из алюминия марки А5N диаметром $d=1,765$ см

T_0, K	ΔT	$4,04 \frac{\Delta T \left(1 + \frac{112}{T}\right)^2}{\left(\frac{T}{100}\right)^4}$	Ra	Nu	α_k	$T_{\text{п}}$
325	25	1,64	41,65	1,88	16,8	350

350	50	2,34	59,43	1,97	17,6	400
375	75	2,58	65,53	1,99	17,7	450
400	100	2,59	65,79	1,99	17,7	500
425	125	2,46	62,48	1,98	17,6	550
450	150	2,31	58,67	1,96	17,5	600
475	175	2,12	53,80	1,94	17,3	650
500	200	1,94	49,28	1,92	17,1	700
525	225	1,75	44,45	1,90	16,9	750
550	250	1,59	40,39	1,87	16,7	800
575	275	1,45	36,83	1,85	16,5	850
586,5	286,5	1,39	35,31	1,84	16,4	873

На рисунке 4.48 приведены зависимости коэффициента конвективной теплоотдачи от температуры, вычисленные по формулам (1.3) и (1.8).

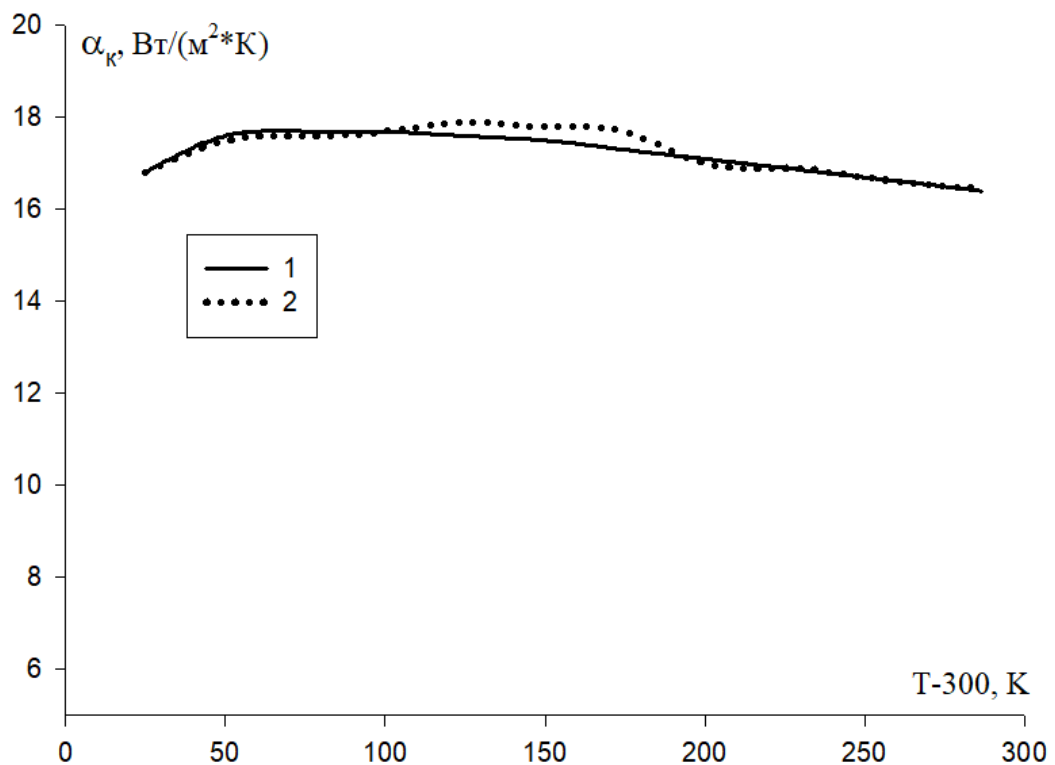


Рис.4.48 Зависимости коэффициента конвективной теплоотдачи от температуры, вычисленные по формулам (1.3) и (1.8)

Как видно обе формулы дают совпадающие результаты. Поэтому можно использовать формулу (1.8).

Процесс передачи тепла между поверхностью и окружающей её средой также представляет собой результат совместного воздействия конвекции, теплопроводности и теплового излучения. В данном контексте количественным показателем процесса выступает общий коэффициент теплоотдачи.

$$\alpha = \alpha_k + \alpha_{\text{и}}.$$

В этом уравнении коэффициент α_k отвечает за влияние конвекции и теплопроводности, а $\alpha_{\text{и}}$ — за излучение.

В различных областях промышленности происходят процессы теплообмена излучением. Правильный расчёт теплообмена излучением становится критически важным при проектировании оборудования, которое работает при высоких температурах. В таких условиях становится особенно актуальной проблема охлаждения.

Коэффициент излучательной теплоотдачи поверхности образца обозначается как $\alpha_{\text{и}}$. Его обычно определяют, применяя закон Стефана-Больцмана. В практических расчётах этот закон для удобства записывается следующим образом:

$$\alpha_{\text{и}} = \frac{\varepsilon 5,67 \left\{ \left(\frac{T}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right\}}{T - T_0}, \quad (4.7)$$

где ε – степень черноты и $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}^4}$.

В формуле (4.7) не ясен физический смысл второй составляющей. Если она связана с излучением окружающей среды, тогда непонятно использование коэффициента черноты образца для воздуха в этой формуле.

Единственный параметр зависящий от свойства материала образцов это степень черноты.

С учетом излучения газа формулу (4.7) можно записать в следующем виде

$$\alpha_{\text{и}} = \frac{\varepsilon 5,67 \left(\frac{T}{100}\right)^4 - \varepsilon_{\text{г}} \left(\frac{T_0}{100}\right)^4}{T - T_0} \quad (4.8)$$

Излучают и поглощают энергию только трёхатомные и многоатомные газы. Трёхатомные газы (H_2O , CO_2 и другие) обладают значительной излучательной и поглощательной способностью, которая носит резко выраженный селективный характер. Достаточно полно изучен теплообмен излучением для H_2O и CO_2 , которые содержатся в продуктах сгорания топлив. Плотность их собственного интегрального излучения по экспериментальным данным определяется из выражений.

$$E(\text{CO}_2) = 3,5 (pl)^{0,33} (T/100)^{3,5} \quad (4.9)$$

$$E(\text{H}_2\text{O}) = 3,5 (pl)^{0,81} 0,6 (T/100)^3 \quad (4.10)$$

Из уравнений 4.9 и 4.10 следует, что при изменении парциального давления p и толщины слоя l излучение H_2O сильнее зависит от этих параметров, чем излучение CO_2 . Таким образом, при малых значениях толщины слоя l преобладает излучение CO_2 , а при больших — излучение H_2O .

Поскольку в данной ситуации воздух сухой, мы не будем принимать во внимание его излучение. Будем считать, что количество тепла, которое теряется за счёт излучения, пропорционально температуре поверхности тела. Формула для расчёта коэффициента лучистой теплоотдачи выглядит следующим образом.

$$\alpha_{\text{и}} = \varepsilon 0,0567 \left(\frac{T}{100}\right)^3 \quad (4.11)$$

Согласно опытным данным [98] излучательная способность реальных тел, в общем изменяется пропорционально температуре не в четвертой, а в более высокой степени, т.е. T^n , где $n > 4$ (для платины $n = 5,11$ в интервале $T = 500 \sim 900\text{K}$; для алюминия $n = 4,73$ в интервале $T = 500 - 800\text{K}$). Выражение (4.11) является типичной формой расчетной зависимости, которая искусственно вводится в рамки закона четвертой степени абсолютной температуры (для единообразия расчетных соотношений).

Излучательная способность различных видов обработки поверхности алюминия [101]

Алюминий	310 К	530 К	800 К
Полированный	0,04	0,05	0,08
Оксидированный	0,11	0,12	0,18

По данным другого справочника [103] для алюминия, полированного в интервале температур 225...575 излучательная способность 0,039...0,057, а для алюминия с шероховатой поверхностью - 0,055. Большое влияние на степень черноты металлов оказывает наличие оксидной пленки на их поверхности.

В таблице 4.13 приведены результаты вычисления коэффициентов лучистой теплоотдачи при различных значениях степени черноты и степени температуры в законе Стефана-Больцмана по формуле (4.11).

Таблица 4.13. Вычисленные значения коэффициента лучистой теплоотдачи

T, К	ε	α_l	ε оксидиро - ванный	α_l	α_l n=4,7	T- 300	α_l n=4,7	α_l $\varepsilon =$ 0,055
350	0,0315	0,247	0,11	0,862	0,665	50	1,87	0,44
400	0,034	0,336	0,11	1,087	0,966	100	4,21	0,55
450	0,0365	0,455	0,115	1,433	1,383	150	5,11	0,70
500	0,039	0,617	0,115	1,819	1,938	200	6,29	0,89
550	0,0415	0,786	0,12	2,273	2,115	250	8,21	1,06
600	0,044	1,014	0,125	2,880	3,632	300	10,73	1,29
650	0,047	1,341	0,13	3,709	4,456	350	13,94	1,60
700	0,052	1,705	0,145	4,754	6,781	400	19,27	1,84
750	0,0545	2,121	0,16	6,227	8,386	450	26,14	2,18
800	0,057	2,732	0,18	8,627	11,237	500	35,84	2,68
850	0,059	3,131	0,20	10,61	13,755	550	48,14	2,97
873	0,061	3,426	0,20	11,232	15,873	573	52,39	3,14

Как видно из таблицы близки к экспериментальным данным шестая строка, когда поверхность образца оксидированная и n=3 в формуле (4.11)

На рисунке 4.49 приведены зависимости коэффициента лучистой теплоотдачи от температуры поверхности образца при различных степени черноты и степени температуры.

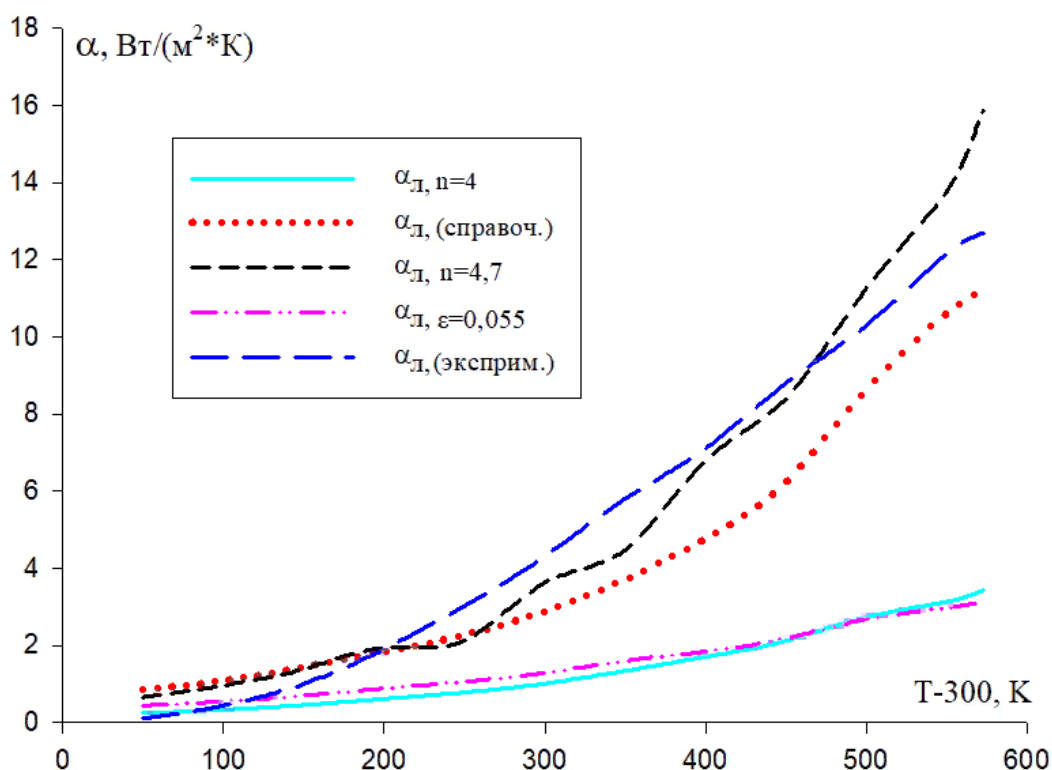


Рис. 4.49. Зависимости коэффициента лучистой теплоотдачи от температуры поверхности образца

В инженерных расчетах для быстрого приближенного определения суммарного коэффициента теплоотдачи можно использовать более простые зависимости, приведенные в [88]

$$\alpha = 9,3 + 0,058 t_{п}, \text{ Вт / (м}^2 \text{ К)} \text{ при } t_{п} = 50 \dots 350 \text{ }^\circ \quad (4.12)$$

Результаты вычисления по этой формуле приведены в таблице 4.14.

Таблица 4.14. Значения суммарного коэффициента теплоотдачи, вычисленные по приближенной формуле (4.12)

Т, К	323	373	423	473	523	573	623	673	723	773	823	873
α	12,2	15,1	18,0	20,9	23,8	26,7	29,6	32,5	35,4	38,3	41,2	44,1

На рисунке 4.50 приведены вычисленные величины суммарного коэффициента теплоотдачи по упрощенной формуле (4.12) и экспериментальные данные (таблица 1.2).

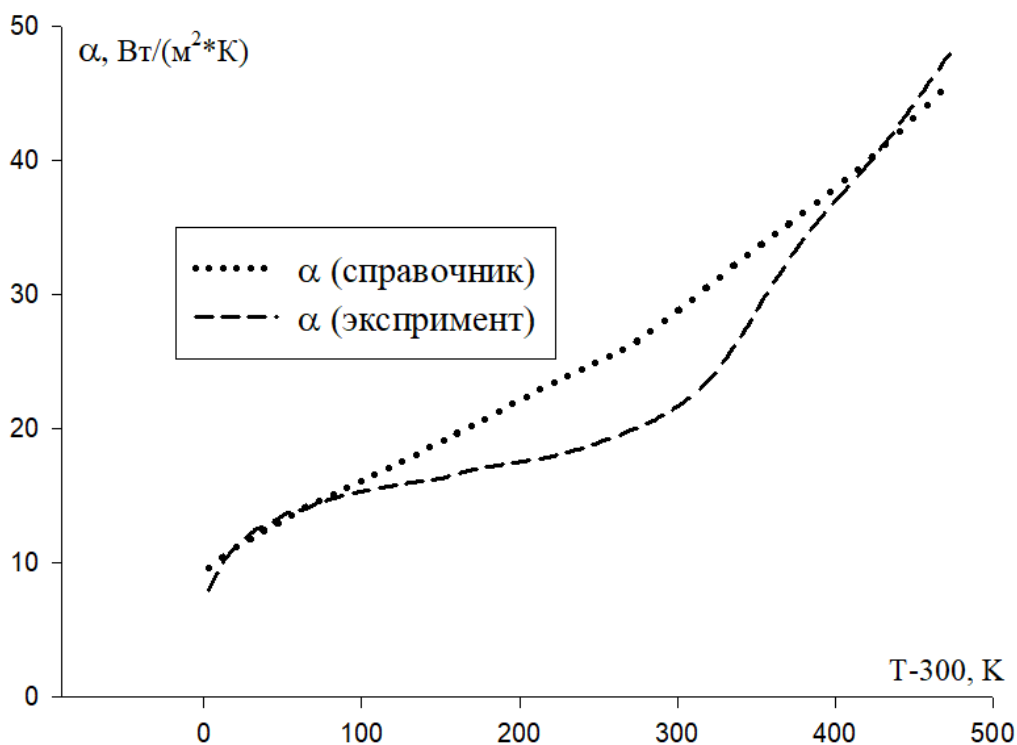


Рис. 4.50. Сравнения вычисленных величин суммарного коэффициента теплоотдачи по упрощенной формуле с экспериментальными данными

При высоких температурах поток тепловой энергии излучением может быть сравним или даже превосходить конвективный. Так, по оценкам работы [145,146), уже при температуре 800 К радиационный коэффициент теплоотдачи составляет более 70 % от суммарного коэффициента теплоотдачи.

Полученные результаты показывают, что с увеличением диаметра цилиндра и шара коэффициент конвективной теплоотдачи уменьшается.

Для данного объема образца коэффициент конвективной теплоотдачи обратно пропорционален площади теплоотдающей поверхности. Площадь сферы меньше площади цилиндра при том же объеме. Например, для цилиндра диаметра 1,5 см и высотой 3,368 см и сферы того же объема и диаметра 1,765 см

$\frac{S_{ш}}{S_{ц}} = 0,814$. Коэффициент конвективной теплоотдачи у сферы больше, чем у цилиндра того же объема.

Полученные экспериментальные результаты по кинетике охлаждения и коэффициентам теплоотдачи находятся в хорошем согласии с теорией теплопроводности и конвективного теплообмена, поскольку теоретические зависимости такие же [79-83].

Из экспериментальные значения коэффициента излучательной теплоотдачи по формуле (4.11) оценили степень черноты для алюминия марки А5N при различных температурах. На таблице 4.15 приведено вычисленные значения степени черноты по формуле (4.11).

Таблица 4.15.

Вычисленные значения степени черноты для алюминия А5N

T	$a_{и}$ (экспериментальные)	ϵ
350	0,114	0,05
400	0,439	0,12
450	1	0,19
500	1,9	0,27
550	3,02	0,32
600	4,3	0,35
650	5,79	0,37
700	7,1	0,36
750	8,8	0,37
800	10,3	0,35
850	12,15	0,35
873	12,7	0,34

Как видно из таблицы 4.15 с повышением температуры степень черноты растет до определенной температуры и далее остается постоянным.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Проведено исследование временная зависимость температуры цилиндрических и сферических образцов в широком температурном диапазоне. Результаты исследования подтвердили высокую эффективность и информативность метода охлаждения.
2. Выявлено, что цилиндрические и сферические образцы из алюминия разных марок во всех случаях охлаждаются за счет лучистого и конвективного теплообмена. Выполнена оценка величины их характерных времен охлаждения. Показано, что радиационное охлаждение протекает быстрее, чем конвективное и зависимость характерных времен охлаждения от отношения объема к площади поверхности образца нелинейная.
3. С использованием данных по скорости охлаждения образцов и их теплоемкости были вычислены коэффициенты конвективного и лучистого теплоотдачи в зависимости от температуры. В результате удалось обнаружить различия между этими коэффициентами.
4. Было проведено исследование, в ходе которого сравнивались закономерности, связанные с влиянием размера образцов на их теплофизические свойства. В результате было установлено, что с увеличением диаметра как цилиндрических, так и сферических образцов, коэффициенты теплоотдачи уменьшаются. Также было обнаружено, что сферические образцы охлаждаются быстрее, чем цилиндрические образцы с такой же массой. Это указывает на то, что коэффициент теплоотдачи у сферических образцов выше. Результаты исследования соответствуют теории подобия и данным других авторов, что подтверждает достоверность полученных результатов.
5. В результате исследования было выявлено, что с повышением температуры коэффициент излучательного теплоотдачи увеличивается, а коэффициент конвективного теплообмена сначала растёт, затем достигает максимума и постепенно снижается. При высоких температурах становится заметным вклад излучения в общий коэффициент теплоотдачи. Сравнение экспериментальных

и расчётных значений коэффициентов теплоотдачи излучением и конвекцией в зависимости от температуры показывает их качественное совпадение. Полученные экспериментальным путём значения коэффициентов конвективного теплоотдачи качественно соответствуют значениям, рассчитанным с использованием теории подобия для термически тонких тел.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фридляндер, И.Н. Избранные труды: создание, исследование и применение алюминиевых сплавов [Текст] /И.Н. Фридляндер //М.: Наука, 2009. - 400 с.
2. Алюминиевые сплавы (Состав, свойства, технология, применение). Справочник. Под ред. И.Н. Фридляндера [Текст] / В.М. Белецкий, Г.Н. Кривов/ // Киев: КОМИНТЕХ, 2005. - 365 с.
3. Фридляндер, И.Н. Перспективные высокопрочные материалы на алюминиевой основе [Текст] /И.Н. Фридляндер, А.В. Добромыслов, Е.А. Ткаченко, О.Г. Сенаторова // МиТОМ, 2005.-№7.- С.17-23.
4. Фридляндер, И.Н. Алюминиевые сплавы в авиаракетной и ядерной технике [Текст] / И.Н. Фридляндер // Вестник РАН, 2004.-Т.74.-№12.-С.1076-1081.
5. 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.
6. 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. А.В.
7. Макаров, Г.С. Тенденции в применении продукции из алюминия и его сплавов в России [Текст] / Г.С. Макаров // Цветные металлы, 2007. - №5. - С. 82-89.
8. Головенко, Ж.В. Современное материаловедение: материалы и технологии новых поколений [Текст] / Ж.В. Головенко, Ю.Я. Гофнер // Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. - С.163-167.
9. Thermophysical properties of materials for nuclear engineering: a tutorial and collection of data [Текст]. IAEA, VIENNA, 2008.- 200 p. IAEA-THRN
10. Хэтч, Дж. Е. Алюминий. Свойства и физическое металловедение. Справочник. Перевод с англ. [Текст] / Под ред. Дж. Е. Хэтч // М.: Металлургия, 1989. - 422 с.

11. Кириллов, П.Л. Теплофизические свойства материалов ядерной техники: Учебное справочное пособие для студентов [Текст] / П.Л. Кириллов, М.И. Терентьева, Н.Б. Денискина // Под общ. ред. П.Л. Кириллова. 2-е изд., перераб. и доп. - М.: ИздАТ, 2007. - 200 с.
12. Авиационные материалы [Текст]: Справочник в 13-ти томах. 7-е изд., перераб. и доп./Под общ. ред. Е.Н. Каблова. Т.4. Книга 1.-М.: ВИАМ, 2008. -263 с.
13. Thermophysical Properties of Matter. V. 12. Thermal Expansion. Metallic Elements and Alloys [Text] / Ed. Touloukian Y. S. N.Y: IFI Plenum, 1975.-1366 p.
14. Новицкий, Л.А. Теплофизические свойства металлов при низких температурах [Текст] / Л.А. Новицкий, И.Г. Кожевников: Справ. изд. – М.: Машиностроение, 1975. - 216 с.
15. Терехов, С.В. Тепловые свойства металлов/ Справочник [Текст] / С.В. Терехов. – Донецк: ГБУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», 2023. – 184 с.
16. Зиновьев, В.Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах [Текст] / В.Е. Зиновьев. – М.: Metallurgy, 1989. - 384 с.
17. Физические величины. Справочник [Текст] / А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др.; под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. - 1232 с.
18. Лариков, Л.Н. Структура и свойства металлов и сплавов. Тепловые свойства металлов и сплавов [Текст]/Л.Н. Лариков, Ю.Ф. Юрченко. - Киев: Наукова думка, 1985. - 437 с.
19. Лифшиц, Б.Г. Физические свойства металлов и сплавов [Текст]/ Б.Г. Лифшиц, В.С. Крапошин, Я.Л. Линецкий. – М.: Metallurgy, 1980. – 320 с.
20. Свойства элементов: справочник [Текст] / Под ред. М.Е. Дрица. - М.: Metallurgy, 1985. - 671 с.
21. Термодинамические свойства индивидуальных веществ. Справочник [Текст] / Под ред. Глушкова В.П. – М.: Наука, 1982. - 559 с.
22. Макаров Г.С. Алюминиевая энциклопедия [Текст] / Г.С. Макаров. – Ин-термет Инжиниринг, 2011. – 528 с.

23. Загорулько, Г. Б. Систематизация знаний по теплофизическим свойствам веществ [Текст] / Г.Б. Загорулько, Ю.И. Молородов, А.М. Федотов // Вестник Новосиб. гос. ун-та. Серия: Информационные технологии, 2014. -Т. 12. - Вып. 3. - С. 48-56.
24. Низомов, З. Теплоемкость алюминия высокой чистоты и его сплавов [Текст] / З. Низомов, Р.Х. Саидов, Б.Н. Гулов. - LAMBERT Academic Publishing, 2012. - 96 с.
25. 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.
26. 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.
27. 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.
28. 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.
29. Металлические примеси в алюминиевых сплавах [Текст] / А.В. Курдюмов, С.В. Инкин, В.С. Чулков, Г.Г. Шадрин. - М.: Металлургия, 1988.- 144 с.
30. Hultgren, R. Selected values of the thermodynamic properties of the elements. Metals Park [Текст] / R. Hultgren, P.D. Desai, D.T. Hawkins, M. Gleiser, H.K. Kelley, D.D. Wagman. - Ohio.: Amer. Soc. for Metals.,1973. -P. 1-636.
31. Гурвич, Л.В. Термодинамические свойства индивидуальных веществ. Справочное издание в 4-х томах [Текст] / Л.В. Гурвич, И.В. Вейц, В.А. Медведев и др. 3-е изд. перераб. и расшир. –М.: Наука, 1978.- Т.1. - Кн. 1. - 496 с. - 1980. -Т.4.- Кн. 2. - 560 с.

32. Гурвич, Л.В. Термодинамические свойства индивидуальных веществ. Справочное издание в 4-х т. [Текст] / Л.В. Гурвич, И.В. Вейц, В.А. Медведев и др.-3-е изд., переработ. и расширен. -Т. 3.- Кн. 1. – М.: Наука, 1981. - 472 с.
33. [Http://www.chem.msu.ru/rus/tsiv](http://www.chem.msu.ru/rus/tsiv) [Электронный продукт] / Химические наука и образования в Россия // Термодинамические свойства индивидуальных веществ.
34. Лифшиц, И.М. Электронная теория металлов [Текст] / И.М. Лифшиц, М.Я. Азбель, М.И. Каганов. - М.: Наука, 1971. - 415 с.
35. Френкель, Я.И. Введение в теорию металлов [Текст] / Я.И. Френкель. 4-е изд. – Л.: Наука, 1972. - 424 с.
36. Ашкрофт, Н. Физика твердого тела [Текст] / Н. Ашкрофт, Н. Мермин. – М.: Мир, 1979.-Том 1.- 400 с. Том 2. - 486 с.
37. Верещагин, И.К. Физика твердого тела: Учебное пособие для втузов [Текст] / И.К. Верещагин, В.А. Кокин. – М.: Высшая школа, 2001. - 237 с.
38. Pathak, P.D. Debye temperatures of silver and aluminum of high temperatures. Some new correlations [Text] / P.D. Pathak, N.P. Shah // Phys. Stat. Sol., 1979. - V.55. –№2. - P.159-162.
39. Nizomov, Z. Temperature dependence of heat capacity of aluminum, copper, silicon, magnesium and zinc and comparison with Debye theory [Text] / Z. Nizomov, R.H. Saidzoda (Saidov), B.N. Gulov, J.G. Sharipov. - Proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Conference Current issues and prospects for the development of scientific research. Scientific collection “INTERCONF” №55. Orleans, France, 7-8.05.2021. - P.307-313. DOI 10.51582 / interconf.7-8.05.2021.032. Physics and math's. ISSN 2709-4685/
40. Nizomov, Z. Temperature dependence of heat capacity scandium, yttrium, praseodymium, neodymium and europium [Text] / Z. Nizomov, R.H. Saidzoda (Saidov), J.G. Sharipov, B.N. Gulov // I st International Scientific and Practical Conference Theory and practice of science: key aspects. Physics and math's. Scientific collection “INTERCONF” №49. Rome, Italy, 2021. - P. 549-553. DOI 10.51582 / interconf.7-8.04.2021.059

41. Низомов, З. Температурная зависимость теплоемкости и термодинамические функции алюминия, железо, кремния, цинка, меди, магния, марганца и титана [Текст] / З. Низомов, Ф.М. Мирзоев // Вестник Таджикского национального университета. Серия естественных наук, 2019. - №1. - С. 122-128.
42. Низомов, З. Температурная зависимость теплоемкости и термодинамические функции бериллия, магния, кальция, стронция и бария [Текст] / З. Низомов, Р.Х. Саидов, З.И. Аvezов, Дж.Г. Шарипов, Б.Н. Гулов // Вестник национального университета. Серия естественных наук. -2018. - Вып. №1. -С.55-60.
43. ГОСТ 11069-2001 Алюминий первичный. Марки Постановление Госстандарта России от 17.05.2002 N 195-стГОСТ от 17.05.2002 N 11069-2001 [Текст]. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2002.
44. Поуэлл, Р. Наиболее важные достижения в изучении теплопроводности металлов [Текст] / Р. Поуэлл. - Успехи физических наук, 1971. - Т.105. - Вып. 2. - С. 329-350.
45. Фомин, Н.Е. Влияние примесей на электросопротивление меди и алюминия [Текст] / Н.Е. Фомин, В.И. Ивлев, В.А. Юдин // Вестник Мордовского университета, 2014. - №1-2. - С. 50 -57.
46. Саакиян, Л. С. Защита нефтегазопромыслового оборудования от коррозии [Текст] / Л.С. Саакиян, А.П. Ефремов. - М.: Недра, 1982.- 227 с.
47. Фомин, Г.С. Коррозия и защита от коррозии: Энциклопедия международных стандартов [Текст] / Г. С. Фомин - 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Протектор, 2013. - 720 с.
48. Умарова, Т.М. Коррозионное и электрохимическое поведение алюминия различной степени чистоты в нейтральной среде [Текст] /Т.М. Умарова, И.Н. Ганиев // Доклады АН РТ. - 2003. -Т. XLVI. - №1-2. - С.53-56.
49. Постников, Н.С. Коррозионностойкие алюминиевые сплавы [Текст] / Н.С. Постников. - М.: Металлургия, 1976. -302 с.
50. Саидзода, Р.Х. Структурообразования и свойства легких алюминиевых сплавов с редкоземельными и щелочноземельными металлами: Монография [Текст] / Р.Х. Саидзода. - Душанбе: Дониш, 2017. - 272 с.

51. Гусев, А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии [Текст] / А.И. Гусев. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. - 416 с.
52. Суздальев, И.В. Нанотехнология: физикохимия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов [Текст]/И.В. Суздальев. - М.: КомКнига, 2007. -592 с.
53. Дмитриев, А.С. Введение в нанотеплофизику [Текст] / А.С. Дмитриев. - М.: БИНОМ, 2019. - 790 с.
54. Zhang, Z.M. Nano/microscale heat transfer [Text] / Z.M. Zhang // Springer Nature Switzerland AG, 2020. - 761 p.
55. Lepri, S. Thermal transport in low dimensions: from statistical physics to nanoscale heat transfer [Text] / Lepri S. - Springer, 2016. - 407 p.
56. Жмакин, А.И. Теплопроводность за пределами закона Фурье [Текст] /А.И. Жмакин // ЖТФ, 2021. - Т. 91. - № 1.- С. 5-25.
57. 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.
58. 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. Zamu- lin, L.V. Redel // The Physics of Metals Metallography, 2015. - 116 (6). -P. 568-575. DOI: 10.1134/S0031918X15040055
59. 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. - P. 488-501.
60. Родунер, Э. Размерные эффекты в наноматериалах [Текст] / Э. Родунер - М.: Техносфера, 2010. - 352 с.
61. Лобанова, Л.А. Влияние размера и размерно-зависимой удельной теплоемкости на тепловую проводимость наноструктурированных полупроводников [Текст] / Л.А. Лобанова, Д.А. Шульгин // Научный форум: Технические и физико-математические науки: сб. ст. по материалам XXIII межд. НПК - № 4(23). - М.: Изд. «МЦНО», 2019. - С. 66-70.

62. Корляков, А.В. Размерные эффекты и эффекты масштабирования в теплофизических микросистемах [Текст] / А.В. Корляков, В.В. Лучинин, И.В. Никитин // Петербургский журнал электроники, 2001. - № 4. - С. 54-59.
63. Зиновьев, Д.В. Размерный эффект теплоотдачи [Текст] / Д.В. Зиновьев, А.Н. Бурмистров // Электроника и информатика - XXI век. Третья Международная научно-техническая конференция, Зеленоград, 22-24 ноября 2000 г. Тезисы докладов, с. 148.
64. Локализация пластической деформации и неравновесные структурно-деформационные превращения [Текст] - Избранные труды профессора А.А. Преснякова - Алматы, 2004. - 271 с.
65. Пресняков, А.А. Локализация пластической деформации [Текст]. – М.: Машиностроение, 1988. – 56 с.
66. 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.
67. 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: КазНИИНТИ, 1991. - С. 15-39.
68. 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.
69. 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.
70. Васильев, В.В. К определению пластических характеристик материалов со склонностью к локальному развитию деформаций [Текст] / В.В. Васильев, Л.С. Гольбрайх, П.Г. Зыкин // Проблемы прочности, 1981. - №.12. - С.55-58.
71. 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.
72. 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.
73. 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.
74. Мофа, Н.Н. Влияние предварительной деформации на развитие формоизменения при растяжении алюминия [Текст] / Н.Н. Мофа, Р.К. Аубакирова, А.А. Пресняков, К.К. Каменов // Изв. АН КазССР. Сер. физ.-мат., 1973. - №4.- С.36-41.
75. 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
76. Писаренко, Г.С. Экспериментальные методы в механике деформируемого твердого тела [Текст] / Г.С. Писаренко, В.А. Стрижало. - Киев: Наукова думка, 1986. - 264 с.
77. 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.
78. Писаренко, Г.С. Избранные труды [Текст] / Г. С. Писаренко / Отв. ред. В.Т. Трощенко. - Киев: Наук. думка, 2010. - 728 с.
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. Цветков, Ф.Ф. Тепломассообмен: уч. пособие для вузов [Текст] / Ф.Ф. Цветков, Б.А. Григорьев. -М.: Издат. Дом МЭИ, 2008. -196 с.
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 [Текст] / 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 [Текст] / 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 [Текст] / J. Hernandez, B. Zamora // Int. J. Heat Mass Transfer. – 2005. – V. 48. – P. 793–807.
96. Pozzi, A. Variable-property effects in free convection [Текст] / 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 [Текст] / 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. Каганер, М.Г. Тепловая изоляция в технике низких температур [Текст] /М.Г. Каганер. - М.: Машиностроение, 1966.- 275 с.
110. 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.
111. Авезов, З.И. Теплофизические свойства цинк-алюминиевых сплавов (Zn5Al, Zn55Al) с элементами II A группы [Текст] / З.И. Авезов, Р.Х. Саидзода, З. Низомов. - Душанбе: Сино, 2020. - 138 с.
112. 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.
113. 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.
114. Пономарев, С. В. Теоретические и практические основы теплофизических измерений [Текст] / С. В. Пономарев. - М.: Физматлит, 2008. - 408 с.
115. Фесенко, А.И. Частотно-импульсный метод определения теплофизических характеристик твердых материалов [Текст] / А.И. Фесенко, С.С. Маташков. - ИФЖ, 1998. - Т. 71. - № 2. - С. 336-341.
116. Пелецкий, В.Э. Исследования теплофизических свойств веществ в условиях электронного нагрева [Текст] / В.Э. Пелецкий. – М.: Наука, 1983. -93 с.

117. 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.
118. Вейник, А.И. Метод определения теплофизических свойств металлов и сплавов [Текст] / А.И. Вейник, В.И. Прилепин, Л.М. Ефимов // Сб. Теплофизические свойства твердых тел: под ред. чл.-корр. АН УССР Самсонова Г.В. – М.: Наука, 1976. - С. 44-49.
119. Филиппов, Л.П. Измерения теплофизических свойств веществ методом периодического нагрева [Текст] / Л.П. Филиппов. – М.: Энергоатомиздат, 1984. - 106 с.
120. Ивлиев, А.Д. Высокотемпературные теплофизические свойства твердых редкоземельных металлов [Текст] / А.Д. Ивлиев // Диссерт. . . д-ра ф.-м. наук. - Екатеринбург, 1991. – 455 с.
121. 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.
122. Теплофизические измерения и приборы [Текст] / Е.С. Платунов, С.Е. Буравой, В.В. Курепин, Г.С. Петров / Под общ. ред. Е.С. Платунова. - Л.: Машиностроение. Ленингр. Отд., 1986. - 256 с.
123. Перевозчиков, С.М. Автоматизированная система измерения теплофизических параметров металлов и сплавов [Текст] / С.М. Перевозчиков, Л.Д. Загребин // ПТЭ, 1998. - № 3. - С. 155 – 158.
124. Прикладная физика: Теплообмен в приборостроении [Текст] / Г.М. Кондратьев, Г.Н. Дульнев, Е.С. Платунов, Н.А. Ярышев. - СПб.: СПбГУ ИТМО, 2003. - 560 с.
125. Малый патент №ТJ 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.,

Авезов З., Иброхимов Н. - № 1100659; заявл. 03.10.11; опубл. 12.04.12. Бюлетен изобретения 72, 2012. -3 с.

126. Низомов, З. Измерение удельной теплоемкости твердых тел методом охлаждения [Текст] / З. Низомов, Б. Гулов, Р. Саидов, З. Авезов // Вестник национального университета. - 2010. - Вып. 3(59). - С.136-141.

127. 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.

128. 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.

129. Гулов, Б.Н. Теплофизические свойства особочистого алюминия и его сплавов с кремнием, медью и некоторыми редкоземельными металлами [Текст] / Автореф. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.07 / Гулов Бобомурод Нурович. - Душанбе, 2015. – 18 с.

130. Низомов, З. Исследование температурной зависимости коэффициента теплоотдачи меди, алюминия А7 и цинка [Текст] / З. Низомов, Р. Саидов, Б. Гулов, З. Авезов // Матер. межд. конф. «Современные проблемы физики конденсированных сред и астрофизики». - Душанбе: Бахт LTD, 2010. - С.38-41.

131. Гулов, Б.Н. Сравнение температурной зависимости теплоемкости и коэффициента теплоотдачи алюминия марки А7 [Текст] / Б.Н. Гулов, Ф.М. Мирзоев, Н.Ф. Иброхимов, Р.Х. Саидов, З. Низомов // Вестник Таджикского технического университета. - 2011. - Вып.1(13). - С. 8-12.

132. 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.

133. 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 имени академика Б. Гафурова. Серия естественных наук, 2022. -№ 1(60). - С.14-19.
134. 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, 15-16 may. -P. 113-119. DOI -10.24412/2709-1201-2022-123-129.
135. 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](https://doi.org/10.48048/tis.2022.3536). Pp. 1-11. Published 19 November 2022. Formerly known as Walailak Journal of Science and Technology.
136. 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, 1(1), 2022. - С. 46-52.
137. Турахасанов, И.Т. Влияние размера цилиндрических образцов из алюминия марки А0 на времени и скорости охлаждения [Текст] / И.Т. Турахасанов, З. Низомов // Вестник технического колледжа, 1(1), 2022. - С.53-58.
138. Низомов, З. Влияние размеры цилиндрических образцов из меди на процессы теплоотдачи [Текст] / З. Низомов, Ш.С. Содатдинов, И.Т. Турахасанов, М.Р. Файзиева, М. Комилов // Мат. Респуб. НПК "Значение физической науки в развитии современной техники и технологии". - Худжанд: Дабир, 2023. - С.76-80.
139. 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.

140. 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.
141. Низомов, З. Влияние масштабного фактора на охлаждения образцов из алюминия [Текст] / З. Низомов, И.Т. Турахасанов // Матер. Симпозиума физиков Таджикистана, посвящ. 85-летию акад. Р. Марупова. - Душанбе: «Дониш», 2022. - С.111-114.
142. Турахасанов, И.Т. Исследование кинетики охлаждения сферических образцов из алюминия марки А5 [Текст] / И.Т. Турахасанов, З. Низомов, Р.Х. Саидзода // Матер. Межд. конф. «Роль физики в развитие науки, просвещения и инноваций», посвящ. 80-летию памяти члена-корр. НАН Таджикистана, д. физ.-мат. н., проф. Бобоева Т. Б. - Душанбе: Дониш, 2022. - С.172-176.
143. 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», посвящённой 80-летию со дня рождения член-корр. НАН Таджикистана, д. физ.-мат. наук, профессора Туйчиева Шарофиддина. - Душанбе: Изд-во ТНУ, 2023. - С. 94-98.
144. Низомов, З. Механизм охлаждения алюминия, меди и цинка при естественном воздушном теплоотводе [Текст] / З. Низомов, Р.Х. Саидов, Дж.Г. Шарипов // Вестник национального университета. Серия естественных наук, 2017. - №1-1. - С. 99-103.
145. Низомов, З. Оценка вклада теплового излучения и конвективного теплообмена в коэффициент теплоотдачи алюминия различной чистоты при естественном воздушном теплоотводе [Текст] / З. Низомов, Ф.М. Мирзоев, Б.Н. Гулов // Доклады Академии наук Республики Таджикистан, 2017. - Т. 60. - №11-12. - С. 575-582.

146. 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, 15-16 April. -P. 131-140. DOI 10.24412/2709-1201-2022-1-29-38.



**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ ТАДЖИКИСТАН
ТАДЖИКСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

имени академика М.С. Осими

734042, Душанбе, просп. академиков Раджабовых, 10, Тел.: (+992 37) 221-35-11,

Факс: (+992 37) 221-71-35, E-mail: rector.ttu@mail.ru, Web: www.ttu.tj

«УТВЕРЖДАЮ»

Ректор ТТУ им. акад. М.С. Осими

Давлатзода К.К.

2023 г.

А К Т

о внедрении изобретения в научные и учебные процессы

Настоящий акт составлен о том, что изобретение по патенту Республики Таджикистан №ТJ 667 от 27.11.2013 «Установка для исследования температурной зависимости электропроводности металлов и сплавов» с 2013 г. по настоящее время используется при выполнении диссертационных работ, магистерской диссертации и при выполнении лабораторных работ студентами Энергетического факультета на кафедре “Теоретические основы радио и электротехники” и “Физика” Таджикского технического университета имени академика М.С.Осими.

Авторами изобретения являются сотрудники Отдела физики конденсированных состояний НИИ Таджикского национального университета, Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими, Филиала федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» в г. Душанбе, ООО “Энергосетьпроект” (г. Душанбе), З. Низомов, Р.Х. Саидов, И.Т.Турахасанов, М.Б. Иноятов, Дж.К. Насимов, Ф.М.Мирзоев.

Прибор по патенту №ТJ 667 относится к измерительным установкам для исследования физико-химических свойств металлов и сплавов и может найти применение в физике, электротехнике, физической химии, материаловедении, металлургии металлов и сплавов. Прибор позволяет непрерывное равномерное нагревание образцов.

Установка позволяет прямую фиксацию экспериментальных результатов электропроводности металлов и сплавов.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ КОМИССИИ

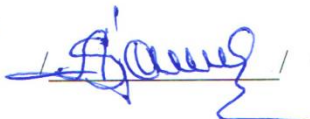
Проректор по учебной работе,
к.т.н., доцент



Маджидзода Т.С.

ЧЛЕНЫ КОМИССИИ:

Начальник учебно-методического
управления, д.т.н., доцент



Сайдализода А.С.

Зав. кафедрой «ТОР и Э»,
к.т.н., доцент



Киргизов А.К.

Зав. кафедрой «Физика»
к.х.н., доцент



Насриддинов А.С.

Подписи к.т.н., доцента Маджидзода Т.С., д.т.н., доцента Сайдализода А.С., к.т.н., доцента Киргизова А.К., и к.х.н., доцента Насриддинова А.С. заверяю:

*Начальник отдела кадров и специальных работ
ТТУ им. акад. М.С. Осими*



Кодирзода Н.Х.