

ТАДЖИКСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

УДК 538.9

**Турахасанов Исфандиер Турахасанович**

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

Специальность 1.3.8– физика конденсированного состояния

**Автореферат диссертации**  
на соискание ученой степени кандидата  
физико-математических наук

**Душанбе-2024**

Работа выполнена в научно-исследовательской лаборатории физики конденсированных сред имени профессора Б.Н. Нарзуллаева НИИ Таджикского национального университета.

**Научный руководитель:** Саидзода Рахимджон Хамро-доктор технических наук, профессор кафедры эксплуатации автомобильного транспорта Таджикского технического университета им. академика М.С.Осими

**Официальные оппоненты:** Ивлиев Андрей Дмитриевич - д.ф.-м.н., профессор кафедры математических и естественнонаучных дисциплин ФГАОУ «Российский государственный профессионально-педагогический университет», г. Екатеринбург, Россия

Исозода Диловаршох Тарик – кандидата химических наук, доктор технических наук, ректор Института энергетики Таджикистана (г. Бохтар, Таджикистан).

**Ведущая организация:** Государственное учреждение «Центр по исследованию инновационных технологий» Национальной академии наук Таджикистана

Защита состоится « 24 » декабря 2024 года в 10:00 часов на заседании объединенного диссертационного совета 99.0.057.02 по защите докторских и кандидатских диссертаций при Таджикском национальном университете по адресу: 734025, Республика Таджикистан, г. Душанбе, ул. Буни Хисорак, Студенческий городок, учебный корпус 16).

Отзывы направлять по адресу: 734025, Республика Таджикистан, г. Душанбе, проспект Рудаки, 17, ТНУ, диссертационный совет 99.0.057.02. E-mail: [tgnu@mail.tj](mailto:tgnu@mail.tj).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте Таджикского национального университета ([www.tnu.tj](http://www.tnu.tj)).

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 г.

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

Табаров С.Х.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**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. 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 излучательного 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 исполь-

зованием 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** вкратце рассмотрены актуальные аспекты проблемы, связанные с воздействием формы и размеров образцов на их механические и теплофизические характеристики. Также рассмотрены методы расчёта радиационно-конвективного теплообмена.

Критерии Био и Фурье-это показатели, которые используются для определения теплового подобия. Число Био - это отношение скорости теплопередачи путём теплопроводности к скорости накопления энергии в материале:

$$Bi = \alpha V / \lambda S$$

где  $\alpha$ - коэффициент теплоотдачи от поверхности тела к окружающей среде,  $\lambda$ - коэффициент теплопроводности материала тела.

Число Био полезно для определения того, имеет ли маленькое тело однородную температуру или нет. Для температуры 773 К  $\alpha = 45,82$  Вт/(м К) , коэффициент теплопроводности алюминия  $\lambda \approx 200 \frac{\text{Вт}}{\text{м К}}$  и  $V/S = 0,306$  см для цилиндра  $d=1,5$  см и  $h=3,368$  см;  $Bi=0,0007$ . Для объектов нашего исследования значение числа Био мало. В такой ситуации тело можно считать «термически тонким», а распределение температуры внутри него-равномерным. В каждый момент времени температура внутри такого тела успевает выровняться благодаря интенсивному переносу тепла через теплопроводность.

Поскольку градиент температуры внутри тела практически отсутствует, то вместо дифференциального уравнения теплопроводности Фурье мы можем использовать балансовое уравнение тепла.

Процессы передачи тепла излучением и конвекцией не связаны между собой. Излучение зависит от температуры и степени черноты объекта, а конвекция-от физических свойств окружающей среды (воздуха). Общее охлаждение равно сумме охлаждения за счёт конвекции и излучения:  $\Delta T = \Delta T_{\text{к}} + \Delta T_{\text{и}}$ .



Количество тепловой энергии, которое теряется в результате конвективного теплообмена, составляет

$$Cm dT_k = -\alpha_k S (T - T_0) d\tau, \quad (1)$$

а за счет теплового излучения составляет

$$Cm dT_{и} = -\alpha_{и} S T d\tau. \quad (2)$$

Решениями уравнений (1) и (2) будут выражения

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

где  $(\Delta T_k)_{\tau=0}$  - разность температур между нагретым объектом и окружающей средой при  $\tau = 0$ ,  $(\Delta T_{и})_{\tau=0}$  - разность между температурой нагретого объекта в момент начала измерений и температурой, при которой степень черноты достигает значения  $\varepsilon = 0$ ,  $\tau_k$  и  $\tau_{и}$  - характерные времена охлаждения в процессах теплообмена излучением и конвекцией.

Принимая во внимание процессы излучения и конвекции, уравнение подобия можно записать следующим образом:

$$\Delta T = (\Delta T_k)_{\tau=0} \exp(-\tau/\tau_k) + (\Delta T_{и})_{\tau=0} \exp(-\tau/\tau_{и}) \quad (3)$$

В каждом из описанных уравнений индексы «к» и «и» обозначают конвективный и лучистый теплообмен.

Для образцов в форме цилиндра

$$\tau_k = \frac{C \rho}{\alpha_k} \frac{d}{4(1+\frac{d}{2h})} \quad \text{и} \quad \tau_{и} = \frac{C \rho}{\alpha_{и}} \frac{d}{4(1+\frac{d}{2h})}. \quad (4)$$

Для образцов, имеющих форму шара

$$\tau_k = \frac{C \rho d}{\alpha_k 6}, \quad \tau_{и} = \frac{C \rho d}{\alpha_{и} 6}. \quad (5)$$

Как видно из формул (4 и 5),  $\tau_k$  и  $\tau_{и}$  зависят от геометрических размеров образца и коэффициента теплоотдачи соответствующего процесса охлаждения, поэтому используем их как характерное время охлаждения.

В большинстве актуальных задач в качестве характерного размера выступает тепловая длина, которая определяется как отношение объёма тела к площади его поверхности, контактирующей с окружающей средой:

$\frac{V}{S} = l$ . Для цилиндра  $V = \pi r^2 h$ , а площадь поверхности теплообмена с окружающей средой  $S = 2\pi r^2 + 2\pi r h = 2\pi r(r + h)$ . В нашем случае  $h = \text{const}$  и

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

Для шара  $V = \frac{4}{3}\pi r^3$ ,  $S = 4\pi r^2$  и  $l = \frac{d}{6}$ . Как можно заметить, для объектов разной формы свойственны разные характерные размеры.

Используя формулу (3), можно вычислить температуру образца в любой момент времени. Это позволяет решать практические задачи нестационарной теплопроводности, связанные с охлаждением тел в среде с постоянной температурой. В частности, при малых значениях числа Био ( $Bi \ll 0,1$ ), когда охлаждение происходит свободно, уравнение подобия можно описать формулой (3). Избыточная температура термического тонкого тела с течением времени уменьшается экспоненциально от начальной  $(\Delta T)_{\tau=0}^i$ ,  $(\Delta T)_{\tau=0}^k$  до нуля при  $\tau \rightarrow \infty$ , и тем быстрее, чем меньше  $\tau_i$ .

$$N_i = \frac{\tau}{\tau_i} = \frac{\alpha S \tau}{C \rho V} = \frac{\alpha S \tau}{C \rho V} \frac{\lambda V S}{\lambda V S} = Bi \frac{S^2 \lambda \tau}{V^2 C \rho} = Bi \frac{\alpha \tau S^2}{V^2} = Bi Fo.$$

$$N_k = \frac{\tau}{\tau_k} = Bi^k Fo \quad \text{и} \quad N_i = \frac{\tau}{\tau_i} = Bi^i Fo$$

Если  $\tau = N \tau_k$ , тогда  $\frac{\Delta T}{(\Delta T)_{\tau=0}} = \frac{1}{e^N}$ .  $\tau_k$  и  $\tau_i$  - численно равны времени, за которое разница температур уменьшается в 2,71 раза.

**Во второй главе** приведены принцип работы устройства для изучения скорости охлаждения твёрдых объектов, а также методика анализа полученных данных. Образцы для эксперимента были изготовлены в физической лаборатории ГУП ТалКо. Там же с помощью спектрометра «Spectrolab» был определён их химический состав.

Для изучения теплофизических характеристик твёрдых тел оптимальным и несложным методом является режим «охлаждения». Измерения температуры образцов со временем в процессе охлаждения производились на

установке, которая представлена на рис.1.

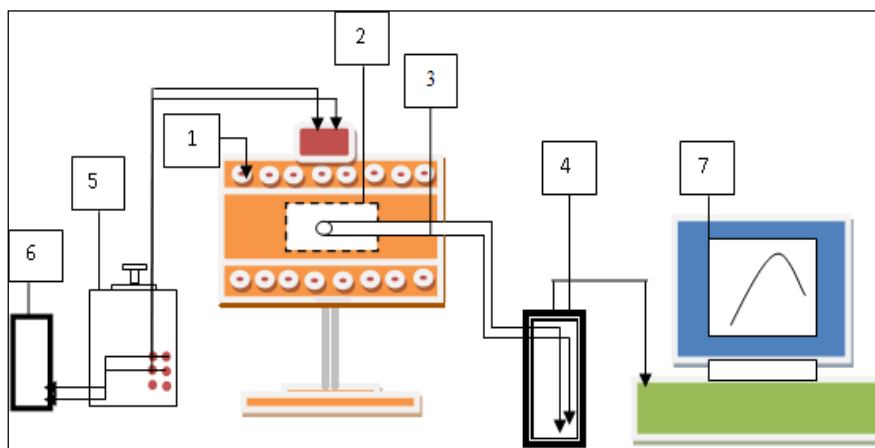


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

- 1 - электропечь; 2 - образец; 3 - термопара; 4 - Digital Multimeter UT71B;  
5 - ЛАТР тип РНО 250-2; 6 - Digital Multimeter DI 9208; 7 - компьютер.

Образец 2 представляет собой сферу или цилиндр с высверленным каналом на одном конце. В этот канал помещается термопара. Концы термопары подключены к цифровому мультиметру UT71B (4), цена деления для измерения температуры составляет  $\pm 0,1$  °C. Мультиметр соединён с компьютером (7), что позволяет напрямую записывать результаты измерений в виде таблицы. После включения печи через лабораторный автотрансформатор (5) с помощью измерителя Digital multimeter DI 9208 L (6) устанавливается напряжение и фиксируется значение температуры окружающей среды. Образец помещается в печь и нагревается до температуры чуть ниже температуры плавления алюминия. Температура контролируется с помощью цифрового термометра Digital Multimeter UT71B. После достижения температуры 620 °C образец быстро извлекается из печи. В момент, когда температура достигает 600 °C, начинается автоматический отсчёт времени охлаждения и температуры образца до момента, когда она достигнет 35–40 °C. Каждые 10 секунд компьютер (7) автоматически фиксирует температуру образца. Итоговый результат отображается на компьютере (7) в виде таблицы зависимости  $T=f(t)$ . Относительная ошибка измерения температуры в интервале от 40 °C до 400 °C составляла  $\pm 1\%$ , а в интервале от 400°C

до 1000 °C  $\pm$  2,5%.

Из измеренного значения температуры образца вычитаем температуру окружающей среды  $\Delta T = T - T_0$ . Затем строим график, который демонстрирует, как меняется разность между температурами образца и окружающей среды с течением времени  $\tau$ :  $\Delta T = f(\tau)$ . Все вычисления, связанные с результатами измерений, были выполнены на компьютере с использованием программного обеспечения Microsoft Office Excel. Для построения и обработки графиков применялась программа Sigma Plot 10. Перед каждой серией измерений проверялась надёжность работы установки с помощью эталонной кривой охлаждения меди.

Для образцов алюминия различных марок с помощью правила Неймана-Коппа были определены значения их теплоёмкости с учётом температурных зависимостей теплоёмкости чистых металлов. Эти данные впоследствии были применены для оценки коэффициентов теплоотдачи.

Исходные цилиндрические образцы имели диаметр 4 см и высоту 3,368 см. После того как была измерена зависимость температуры образца от времени охлаждения, из него на токарном станке модели Pinacho были изготовлены образцы с диаметром 3,5 сантиметра. Затем процесс повторялся до тех пор, пока диаметр образцов не достигал 1,5 сантиметра. При изготовлении сферических образцов соблюдалось равенство объёма с цилиндрическими образцами  $V_c = V_{ц}$ , т.е.  $\frac{4}{3}\pi R^3 = \pi r^2 H$ ,  $R = \sqrt[3]{\frac{3}{4}r^2 H}$ . В лаборатории материаловедения Центра по исследованию инновационных технологий НАН Таджикистана были созданы образцы сферической формы. Для этого были использованы графитовые формы с диаметрами полостей: 1,765 см, 2,82 см и 3,35 см. Затем в эти формы были помещены предварительно подготовленные цилиндрические образцы, которые были расплавлены и залиты в формы.

**В третьей главе** рассматривается, как размеры цилиндрических образцов из алюминия разных марок влияют на кинетику охлаждения и коэффициент теплоотдачи. Для каждой марки алюминия были выбраны образцы с диа-

метрами 1,5 см, 2,0 см, 2,5 см, 3,0 см, 3,5 см и 4,0 см. Исследовалась временная зависимость температуры образцов. Полученные экспериментальные данные о разности температур между образцами и окружающей средой хорошо описываются уравнением  $\Delta T(\tau) = ae^{-b\tau} + ce^{-d\tau}$ , где  $a, b, c, d$  – постоянные величины для данного образца.

На рис. 2 представлены графики, демонстрирующие изменение разность температур между образцом и окружающей средой при охлаждении за счёт излучения  $\Delta T_{\text{и}}$  и конвекции  $\Delta T_{\text{к}}$  в зависимости от произведения чисел Био и Фурье ( $\tau/\tau_i = Bi Fo$ ). Как можно заметить, процесс охлаждения за счёт излучения происходит быстро, в то время как теплоотдача посредством конвекции осуществляется медленнее.

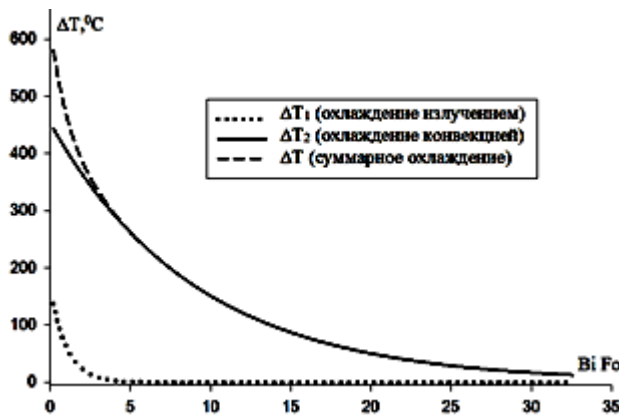


Рис. 2. Зависимости  $\Delta T$ ,  $\Delta T_{\text{и}}$  и  $\Delta T_{\text{к}}$  от  $BiFo$  для цилиндрического алюминия марки А0  $d = 1,5$  см.

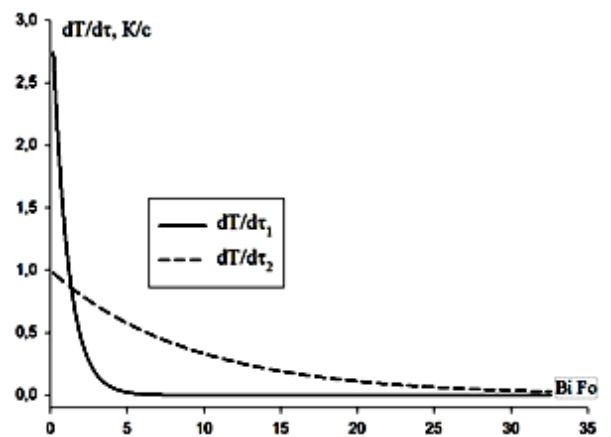


Рис. 3. Зависимости скоростей излучательного и конвективного охлаждений алюминия марки А0  $d = 1,5$  см от  $Bi Fo$ .

Дифференцируя (3), для скорости охлаждения получаем

$$\frac{dT}{d\tau} = - \left( \frac{(\Delta T)_{\tau=0}^{\text{и}}}{\tau_{\text{и}}} e^{-\tau/\tau_{\text{и}}} + \frac{(\Delta T)_{\tau=0}^{\text{к}}}{\tau_{\text{к}}} e^{-\tau/\tau_{\text{к}}} \right), \quad (6)$$

где  $(\Delta T)_{\tau=0}^{\text{и}}/\tau_{\text{и}}$  и  $(\Delta T)_{\tau=0}^{\text{к}}/\tau_{\text{к}}$  - значения скорости охлаждения в процессах, связанных с излучением и конвекцией в начале измерений.

На рис. 3 приведены зависимости скорости охлаждения за счет излучательного и конвективного теплоотдач от  $Bi Fo$  для алюминия марки А5N  $d=1,5$  см. Как можно заметить, процесс охлаждения посредством излучения завер-

шается довольно быстро, после чего образец продолжает охлаждаться исключительно за счёт конвекции.

На рис. 4 и 5 показаны зависимости характерных времен охлаждения за счет излучения и конвекции от отношения объёма к площади поверхности для образцов алюминия цилиндрической формы разных марок.

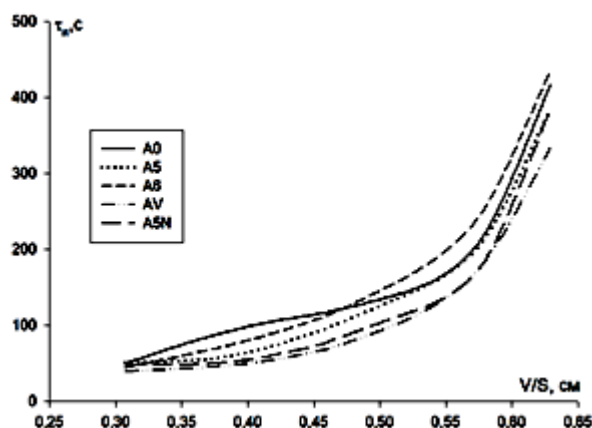


Рис. 4. Зависимости  $\tau_{и}$  от величины  $V/S$  для цилиндрического алюминия разных марок.

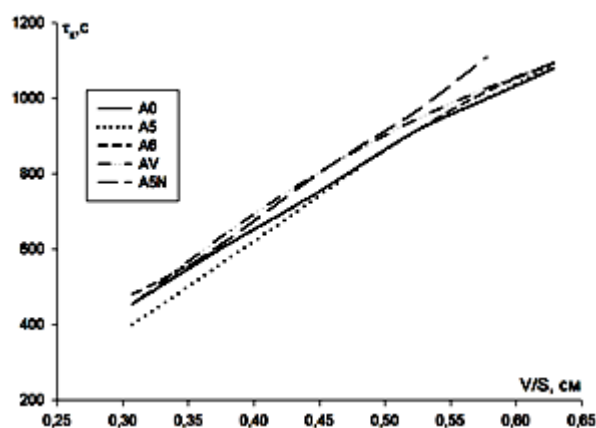


Рис. 5. Зависимости  $\tau_{к}$  от величины  $V/S$  для цилиндрического алюминия различных марок.

Из рис. 4 и 5 видно, что по мере увеличения диаметра образцов алюминия характерные времена их охлаждения растут нелинейно. Это может быть связано с тем, что коэффициент теплоотдачи уменьшается.

С помощью данных об удельной теплоёмкости и результатов экспериментов по измерению скорости охлаждения были определены коэффициенты общей  $\alpha(T)$ , конвективной  $\alpha_{к}(T)$  и излучательной теплоотдач  $\alpha_{и}(T)$  по формулам

$$\alpha(T) = -\frac{c \rho V \left(\frac{dT}{d\tau}\right)}{S(T-T_0)}, \quad \alpha_{к}(T) = -\frac{c \rho V \left(\frac{dT}{d\tau}\right)_{к}}{S(T-T_0)}, \quad \alpha_{и}(T) = -\frac{c \rho V \left(\frac{dT}{d\tau}\right)_{и}}{S(T-T_0)}, \quad (7)$$

где  $\frac{dT}{d\tau}$ ,  $\left(\frac{dT}{d\tau}\right)_{к}$  и  $\left(\frac{dT}{d\tau}\right)_{и}$  – соответственно, общая скорость охлаждения, скорость охлаждения за счет конвекции и излучения.

На рис. 6 представлены графики зависимости коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  от температуры ( $T-300$  °C). Как видно, с увеличением температуры коэффициент  $\alpha$  возрастает, а с увеличением диаметра образцов-уменьшается.

На рис. 7 показаны температурные зависимости коэффициента теплоотдачи для образцов цилиндрического алюминия марки А5N разного диаметра.

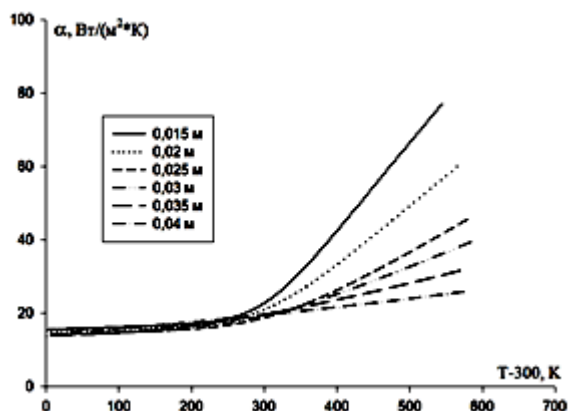


Рис. 6. Зависимости  $\alpha$  от  $T-300$  для цилиндрического образца алюминия марки А6 разных диаметров.

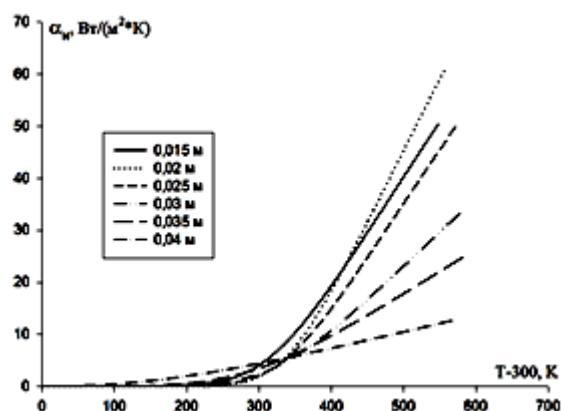


Рис. 7. Зависимости  $\alpha_{и}$  от  $T-300$  для цилиндрических образцов из алюминия марки А5N разных диаметров.

Как видно из рис. 7, с ростом температуры коэффициент излучательной теплоотдачи  $\alpha_{и}$  увеличивается.

На рис. 8 представлены графики температурных зависимостей коэффициента конвективной теплоотдачи цилиндрических образцов алюминия марки А0 с разными диаметрами. Из рисунка видно, что коэффициент конвектив -

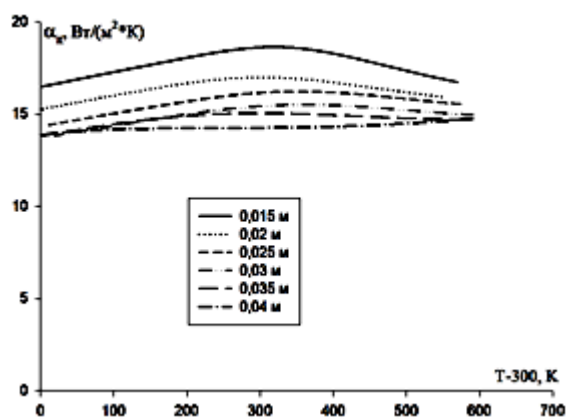


Рис. 8. Зависимости  $\alpha_{к}$  от  $T-300$  для цилиндрических образцов из алюминия марки А0 разных диаметров.

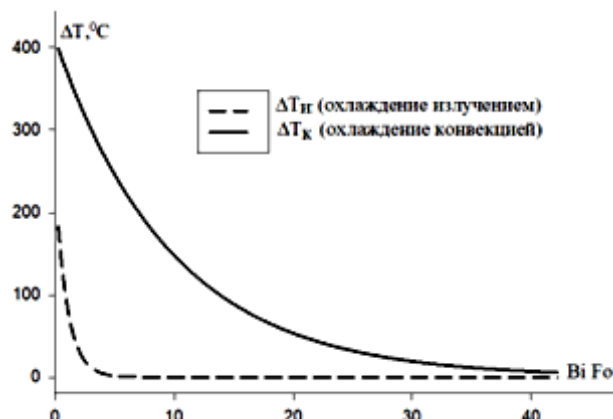


Рис.9. Зависимости охлаждения излучением и конвекцией для сферического алюминия марки А0,  $d=1,76$ см от  $Bi Fo$ .

ной теплоотдачи цилиндрического алюминия разных марок уменьшается с увеличением диаметра образца.

В четвёртой главе представлены результаты изучения кинетики охлаждения и коэффициентов теплообмена для сферических образцов. Проведено сравнение с результатами для цилиндрических образцов, а также обсуждение полученных данных. Исследована кинетика охлаждения сферических образцов алюминия марок А0, А5, А6, АВ98 и А5N с диаметрами 1,765 см, 2,82 см и 3,35 см в широком интервале температур. Экспериментально полученные зависимости  $\Delta T(\tau)$  описываются уравнением (3). На рис. 9 в качестве иллюстрации показана зависимость процесса охлаждения излучением и конвекцией для сферического алюминия марки А0 от  $BiFo$ .

На рис. 10 в качестве примера приведена зависимость скорости охлаждения образца сферического алюминия марки А0 за счет излучательного  $\frac{dT}{d\tau_i}$  и конвективного  $\frac{dT}{d\tau_k}$  теплообменов для от  $\tau/\tau_i$  (или  $BiFo$ ). На рис. 11 представлены зависимости характерные времена охлаждения сферических образцов из алюминия марки А0, от отношения  $V/S$ .

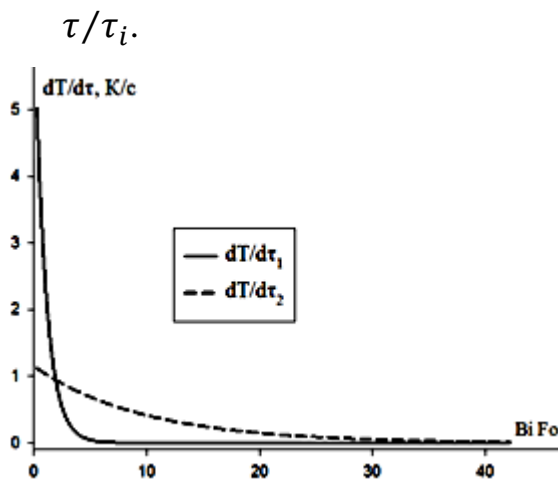


Рис.10. Зависимости скорости охлаждения от  $BiFo$  для сферического образца из алюминия марки А0 диаметром 1,765 см.

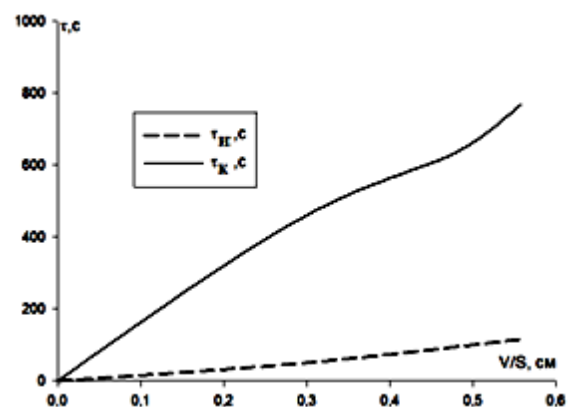


Рис.11. Зависимости характерных времен излучательного и конвективного охлаждений от величины  $V/S$  для сферического алюминия марки А0.

Для сферических образцов определены коэффициенты общей, излучательной  $\alpha_{и}$  и конвективной  $\alpha_{к}$  теплоотдач в зависимости от температуры.

На рис. 12 представлена зависимость общего коэффициента теплопередачи сферического образца алюминия марки АВ98 от температуры Т-300.



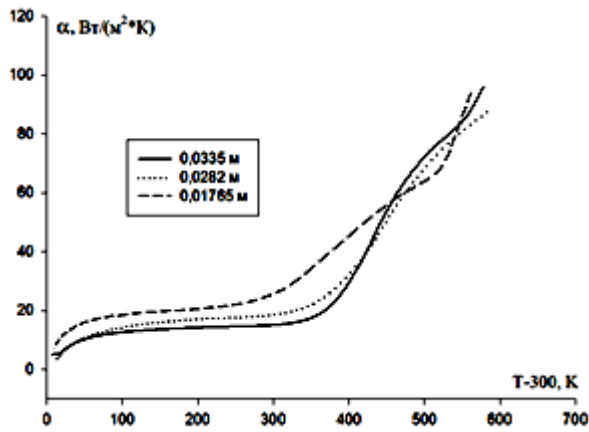


Рис. 12. Зависимость  $\alpha_k$  сферического образца алюминия марки АВ98 разных диаметров от величины Т-300.

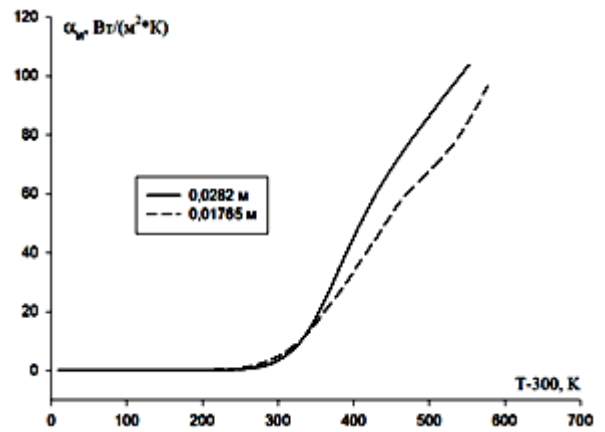


Рис. 13. Зависимость  $\alpha_r$  сферического алюминия марки А5N разных диаметров от величины Т-300.

На рис. 13 показаны зависимости коэффициента теплоотдачи излучением  $\alpha_r$  сферического образца из алюминия марки А5N от температуры Т-300. Можно заметить, что теплоотдача излучением становится существенной при высоких температурах.

На рис. 14 представлена температурная зависимость коэффициента конвективной теплоотдачи  $\alpha_k$  сферического образца алюминия марки АВ98.

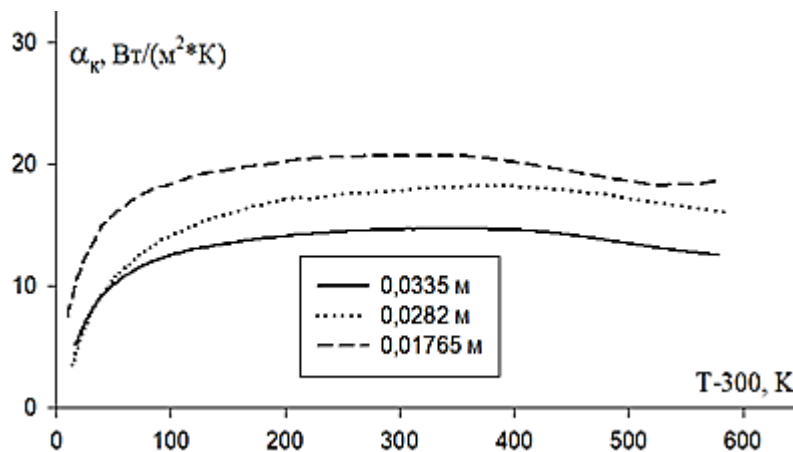


Рис. 14. Зависимость  $\alpha_k$  сферического алюминия марки АВ98 разных диаметров от величины Т-300.

Для сферических и цилиндрических образцов характерны одинаковые закономерности изменения коэффициентов теплоотдачи. С увеличением диаметра сферы эти коэффициенты уменьшаются. Значения  $\alpha_k$  для сферических образцов больше, чем для цилиндрических образцов.

Число Фурье ( $Fo$ ) отражает связь между тем, как быстро меняются тепловые условия в окружающей среде и тем, как быстро меняется температура внутри рассматриваемого тела. Значение числа Фурье зависит от размеров тела и его коэффициента температуропроводности  $Fo = \alpha\tau/l^2$ , где  $\alpha$  - коэффициент температуропроводности,  $\tau$  - характерное время изменения внешних условий. Коэффициент температуропроводности алюминия в интервале температур  $300 \div 900$  К  $\alpha = (84 \pm 2) 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ .

На рис. 15-16 приведены зависимости разности температур образца и окружающей среды от числа Фурье для цилиндрических и сферических образцов алюминия марки А0 разных диаметров.

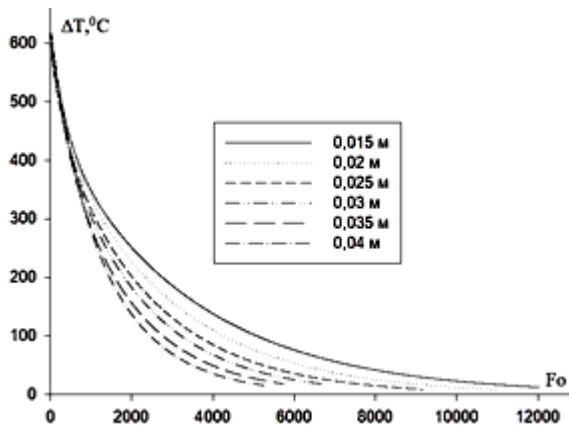


Рис.15. Зависимость  $\Delta T$  от  $Fo$  для цилиндрических образцов алюминия марки А0 разных диаметров.

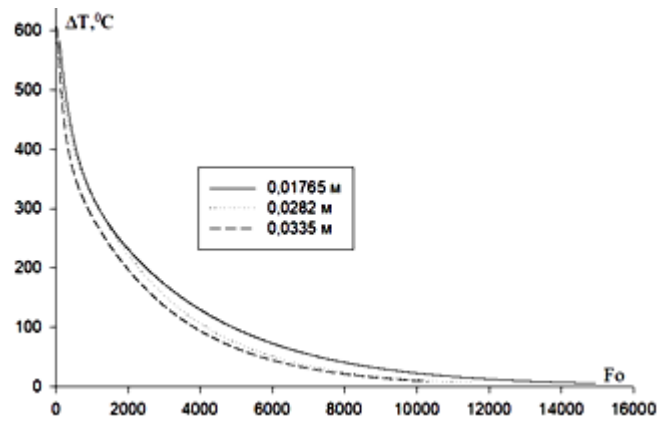


Рис.16. Зависимость  $\Delta T$  от числа Фурье  $Fo$  для сферических образцов из алюминия марки А0 разных диаметров.

Экспериментальная зависимость температуры образца от времени охлаждения выражается уравнением подобия (3) для всех исследованных объектов. Величины  $\tau_n$  и  $\tau_k$  определяем при обработке кривых охлаждения. Поэтому более обосновано рассматривать зависимость разности температуры  $\Delta T$  от  $\tau/\tau_i$ . На рис. 17-18 приведены такие зависимости для цилиндрических и сферических образцов разного диаметра алюминия марки А0.

На рис. 19 прведена зависимость  $\frac{\Delta T}{(\Delta T)_{\tau=0}}$  от  $\frac{\tau}{\tau_i} = N$ , которая для всех образцов одинакова и позволяет находить температуру в любой момент времени.

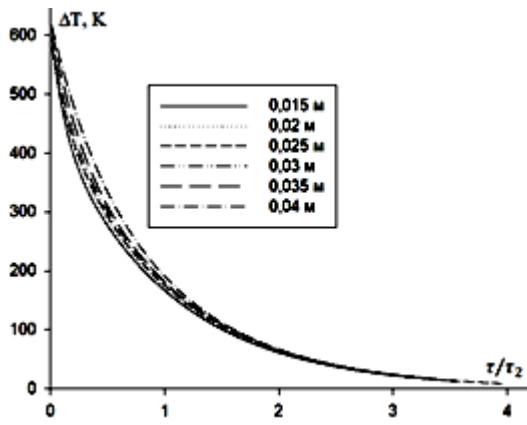


Рис.17. Зависимости  $\Delta T$  от  $\frac{\tau}{\tau_i}$  для цилиндрических образцов алюминия марки А0 разных диаметров.

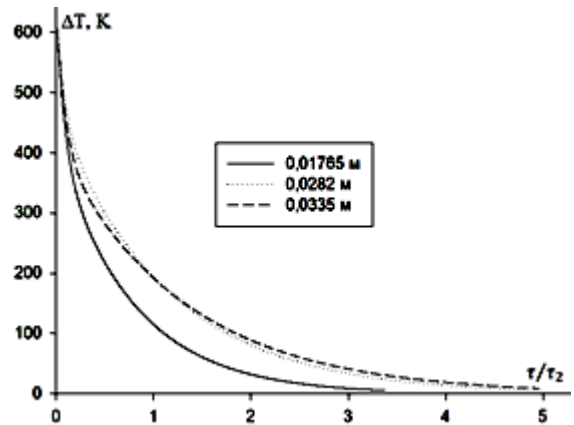


Рис.18. Зависимость  $\Delta T$  от  $\frac{\tau}{\tau_i}$  для сферических образцов из алюминия марки А0 разных диаметров.

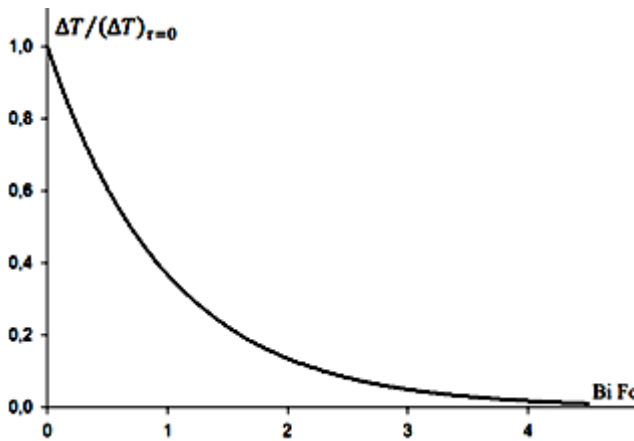


Рис. 19. Зависимость  $\frac{\Delta T}{(\Delta T)_{\tau=0}}$  от  $\frac{\tau}{\tau_i}$ .

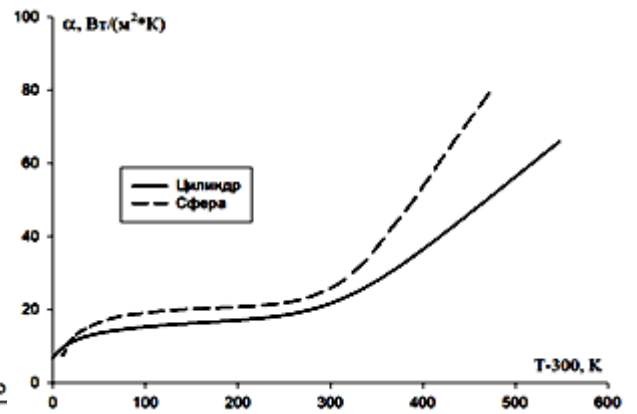


Рис. 20. Зависимость  $\alpha$  цилиндрического ( $d=1,5\text{см}$ ) и сферического ( $d=1,765\text{ см}$ ) алюминия марки А5 от величины  $T-300$ .

В параграфе 4.3 приведены результаты сравнения коэффициентов теплоотдачи цилиндрических и сферических образцов равного объема. Как можно заметить, теплоотдача сферических образцов выше, чем у цилиндрических образцов того же объёма, особенно при высоких температурах. Для данной марки алюминия теплоёмкость зависит только от температуры. Результаты эксперимента показали, что с увеличением диаметра цилиндрических и сферических образцов коэффициент теплоотдачи уменьшается. Поэтому зависимости характерных времен охлаждения от  $\frac{V}{S}$  нелинейные.

Чтобы понять, как форма влияет на коэффициент теплообмена и его компоненты, мы сравнили, результаты для цилиндра и сферы. На рис. 20–22 показаны зависимости коэффициентов общего, излучательного и конвективного теплообменов для образцов в форме сферы и цилиндра одинакового объёма.

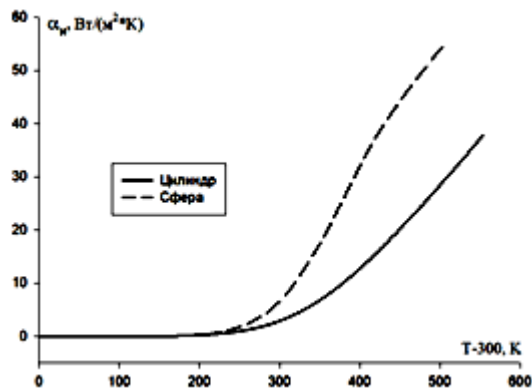


Рис. 21. Сравнение зависимостей  $\alpha_n$  цилиндрических ( $d=1,5$  см) и сферических ( $d=1,765$  см) алюминия марки А5 от величины  $T-300$ .

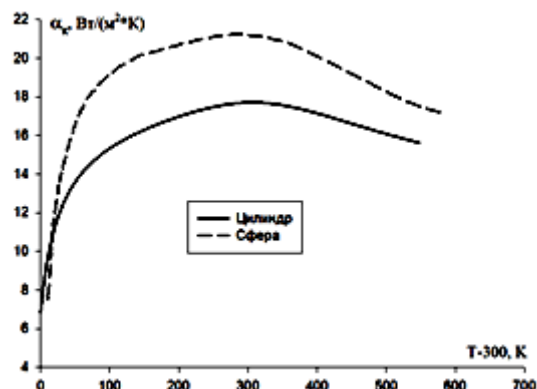


Рис. 22. Сравнение зависимостей  $\alpha_k$  цилиндрических ( $d=1,5$  см) и сферических ( $d=1,765$  см) алюминия марки А5 от величины  $T-300$ .

При естественной конвекции для определения коэффициента конвективной теплопередачи применяется число Нуссельта. Оно отражает взаимосвязь между интенсивностью теплообмена и температурным градиентом в приграничном слое потока. Физические параметры, входящие в число подобия, зависят от температуры. Поэтому необходимо заранее определить, при какой температуре их следует использовать. Эта температура считается определяющей.

При свободной конвекции число Релея  $Ra < 500$ , поэтому для расчета числа Нуссельта использовали предложенную М.А. Михеевым формулу:

$$\text{Число Релея } Ra = Gr Pr. \quad \text{В справочниках приведены значения } \frac{Gr}{\Delta T l^3} = A \text{ и число } (8)$$

Прандтля  $Pr$  для сухого воздуха. Число Релея определили по формуле

$$Ra = A \Delta T \left(\frac{V}{S}\right)^3 Pr, \quad (9)$$

где  $\Delta T = T_n - T_c$ . Поскольку значение числа Рэлея для всего спектра температур воздуха не достигает 500, мы можем считать поток ламинарным.

Уравнение (8) применимо для тел любой формы при омывании их газами при  $Pr > 0,7$ ; за определяющую температуру принимают среднюю температуру пограничного слоя  $T_0 = 0,5(T_{\text{п}} + T_c)$ , где  $T_{\text{п}}$  - температура поверхности образца,  $T_c$  - температура среды на большом удалении от нагретого тела; за определяющий геометрический размер примем  $\frac{V}{S}$ .

Если известно значение числа Нуссельта, то можно вычислить коэффициент конвективной теплоотдачи, используя формулу

$$\alpha_k = \frac{Nu \lambda S}{V}. \quad (10)$$

Определяющей температурой в выражении (10) является температура окружающей среды  $T_c$ . Теплопроводность воздуха  $0,026 \text{ Вт / (м К)}$  при  $300 \text{ К}$ .

На рис. 23 представлено сравнение теоретических и экспериментальных данных о коэффициентах конвективной теплоотдачи от температуры для образцов из алюминия марки А5N с диаметрами  $4 \text{ см}$  и  $1,5 \text{ см}$ .

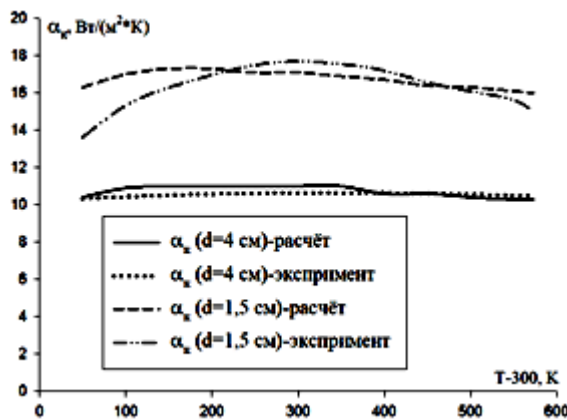


Рис.23. Зависимости вычисленных и экспериментальных  $\alpha_k$  от температуры для алюминия марки А5N.

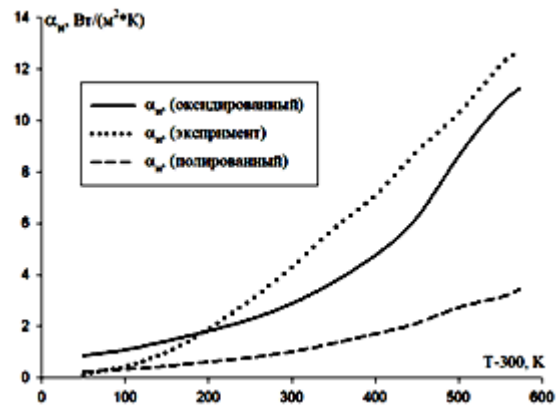


Рис. 24. Зависимости  $\alpha_{\text{и}}$  от температуры поверхности образца алюминия марки А5N.

На графике можно увидеть, что результаты экспериментов по измерению коэффициентов конвективной теплоотдачи согласуются с теоретическими расчётами, основанными на теории подобия. Результаты экспериментов и теоретических расчётов демонстрируют, что при росте диаметра цилиндра и шара происходит снижение коэффициента конвективной теплоотдачи.

Для конкретного образца коэффициент конвективной теплоотдачи обратно пропорциональна площади поверхности, через которую происходит теплоотдача. Площадь сферы меньше площади цилиндра при одинаковых объёмах, поэтому коэффициент конвективной теплоотдачи больше.

Определение коэффициента излучательного теплообмена  $\alpha_{и}$  становится очень важным при проектировании оборудования, эксплуатируемого при высоких температурах. Под  $\alpha_{и}$  будем подразумевать коэффициент излучательной теплоотдачи поверхности образца. Так как в нашем случае воздух сухой, то его излучением можно пренебречь. Формула для расчета коэффициента излучательной теплоотдачи принимает вид

$$\alpha_{и} = \varepsilon 0,0567 \left( \frac{T}{100} \right)^3. \quad (11)$$

На рис. 24 приведены зависимости вычисленных и экспериментальных значений  $\alpha_{и}$  от температуры поверхности алюминия. Они близки, если поверхность алюминия считать оксидированной.

На основе экспериментальных данных о коэффициенте излучательной теплоотдачи, полученных по формуле (11), была определена степень черноты для алюминия марки А5N при различных температурах. На рис. 25 показана зависимость степени черноты, рассчитанной по формуле (11), от температуры.

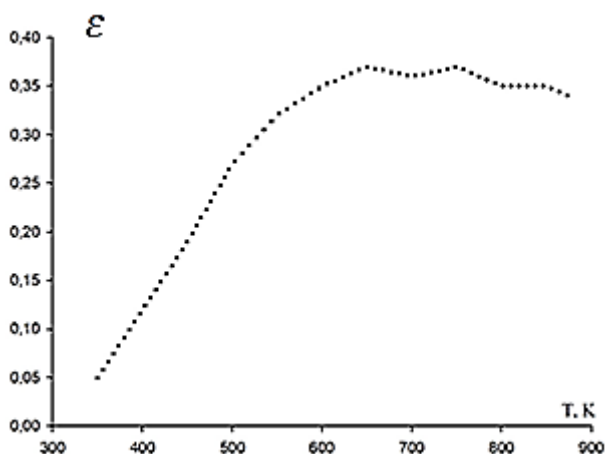


Рис. 25. Зависимость степени черноты от температуры для алюминия марки А5N.

Как можно заметить, с ростом температуры степень черноты сначала возрастает, а затем остаётся практически неизменной.

Результаты эксперимента по кинетике охлаждения и коэффициентов теплоотдачи соответствуют теоретическим положениям, касающимся конвективного и излучательного теплообмена.

## **ВЫВОДЫ**

1. Проведено исследование временной зависимости температуры цилиндрических и сферических образцов в широком температурном диапазоне при естественном охлаждении. 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 теплообменов. 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 лучистой теплоотдач в зависимости от температуры. В результате удалось обнаружить различия между этими коэффициентами.
4. Проведено исследование закономерностей влияния размера образцов на их теплофизические свойства алюминия. Установлено, что с увеличением диаметра как цилиндрических, так и сферических образцов, коэффициенты теплоотдачи уменьшаются. 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. Показано, что с повышением температуры коэффициент излучательной 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.

### ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Низомов, З. Влияние размера образцов из алюминия на кинетику их охлаждения и процессов теплоотдачи/ З. Низомов, **И.Т. Турахасанов**, М.Р. Файзиева // Вестник Таджикского национального университета. Серия естественных наук, 2022.-№1.-С.165-177.
2. Низомов, З. Влияние диаметра цилиндрических образцов из алюминия различных марок на кинетику охлаждения/ З. Низомов, **И.Т. Турахасанов**, Р.Х. Саидзода // Вестник Таджикского национального университета. Серия естественных наук, 2024.-№1.- С.88-99.
3. **Турахасанов, И.Т.** Влияние размера цилиндрических образцов из алюминия марки А5 на время и скорость охлаждения / **И.Т. Турахасанов** // Ученые записки Худжандского государственного университета имени академика Б. Гафурова. Серия естественных наук, 2022.- №1(60).-С.14-19.
4. **Turakhasanov, I.T.** Effect of A5N Cylindrical Aluminum Specimens on the Cooling Kinetics/ **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://www.preprints.org/manuscript/202211.0390/v1). - [https://doi.org/10.48048 tis.2022.3536](https://doi.org/10.48048/tis.2022.3536). P. 1-11.
5. Nizomov, Z. Influence of the diameter of cylindrical samples made of different grades of aluminum on the cooling kinetics /Z. Nizomov, **I.T. Turakhasanov**, R. Kh. Saidzoda // Bulletin of the Tajik national university. Series of natural sciences/ 2024. No.1. [https://doi.org /10.62965 /tnu.sns.2024.1.8](https://doi.org/10.62965/tnu.sns.2024.1.8), - P. 69-77.



6. Nizomov, Z. Effect of Size on Cooling Kinetics of Spherical Samples from Different Grades of Aluminum/ Z Nizomov, **I.T. Turakhasanov**, R. Kh. Saidzoda, D Nematov // Engineering Science & Technology – 4117.-V.512.- P.418-426. 2024-04-30, <https://doi.org/10.37256/est.5220244117>.
7. Турахасанов, И.Т. Влияние размера цилиндрических образцов из алюминия марки А6 на времени и скорости охлаждения/ И.Т. Турахасанов, З. Низомов, М.Б. Акрамов, Ш.С. Содатдинов // Вестник технического колледжа, 2022.- № 1(1).-С.46-52.
8. Турахасанов, И.Т. Влияние размера цилиндрических образцов из алюминия марки А0 на времени и скорости охлаждения/ И.Т. Турахасанов, З. Низомов // Вестник технического колледжа, 2022.-№1(1).-С.53-58.

#### **Публикации в материалах Международных научных конференций**

1. **Турахасанов, И.Т.** Исследование кинетики охлаждения сферических образцов из алюминия марки А5/ **И.Т. Турахасанов**, З. Низомов, Р.Х. Саидзода. - Матер. VIII Межд. конф. «Современные проблемы физики». Душанбе, 2022. - С. 206-209.
2. **Турахасанов, И.Т.** Зависимость кинетики охлаждения сферических образцов из алюминия марки А6 от их размера/ **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.
3. Низомов, З. Влияние величины диаметра сферических образцов из различных марок алюминия на кинетику их охлаждения/ З. Низомов, **И.Т. Турахасанов**, Р.Х. Саидзода. - Матер. Межд. науч. конф. «Современные проблемы физики конденсированного состояния». - Душанбе: Издательство ТНУ, 2023. - С. 94-98.
4. Низомов, З. Вклад тепловое излучение в охлаждении алюминия марки А5N/ З. Низомов, Дж.Г. Шарипов, Б.Н. Гулов, **И.Т. Турахасанов**. - Матер. Межд. НПК «Роль химии и химической промышленности в ускоренной

- индустриализации страны». – Душанбе: Изд-во ТТУ им. акад. Осими М.С., 2024. – С.301-303.
5. **Турахасанов, И.Т.** Исследование кинетики охлаждения сферических образцов из алюминия марки АВ 98 / **И.Т. Турахасанов**, З. Низомов, Ш.С. Содатдинов. - Матер. Симпозиума по естественным, точным и математическим наукам. - Душанбе. - 2022. - Т.3. - С. 494-497.
  7. Низомов, З. Влияние масштабного фактора на охлаждение образцов из алюминия / З. Низомов, **И.Т. Турахасанов**. – Матер. Симпозиума физиков Таджикистана. - Душанбе: «Дониш», 2022. - С.111-114.
  8. Малый патент Республики Таджикистан № ТЈ 667 Установка для исследования температурной зависимости электропроводности металлов и сплавов/ З. Низомов, М.Б. Иноятов, **И.Т. Турахасанов**, Дж. Насимов, Р.Х. Саидов Р.Х. / Приоритет изобретения от 27.11.2013 г.
  9. 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/ Z. Nizomov, F.M. Mirzoev, Z.I. Avezov, **I.T. Turakhasanov**. - International Scientific-practical journal. Endless light in science, 2022. - Pp. 131-140. DOI 10.24412/2709-1201-2022-1-29-38.
  10. **Turakhasanov, I.T.** Effect of the size of AV 98 aluminum cylindrical specimens of the cooling kinetics/ **I.T. Turakhasanov**, Z. Nizomov, Sh.S. Sodatdinov, F.M. Mirzoev. - “Science and technologies” IV International Scientific and Practical conference. Materials. Endless light in science, 2022. -Pp. 113-119. DOI -10.24412/2709-1201-2022-123-129.