

На правах рукописи

**МИРЗОЕВ ФАЙЗАЛИ МУЛЛОДЖОНОВИЧ**

**ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АЛЮМИНИЯ РАЗЛИЧНОЙ  
СТЕПЕНИ ЧИСТОТЫ И СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Al-Si**

Специальность **01.04.07** - физика конденсированного состояния

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

**Душанбе-2019**

Работа выполнена в отделе физики конденсированного состояния НИИ Таджикского национального университета и на кафедре металлургии Таджикского технического университета им. академика М.С.Осими.

**Научные руководители:** **Низомов Зиёвуддин**- кандидат физико-математических наук, доцент;

**Акрамов Мухаммад Бозорович**-кандидат физико-математических наук, доцент.

**Официальные оппоненты:** **Эшов Бахтиёр Бадалович** - доктор технических наук, доцент, директор государственного научного учреждения «Центр исследований инновационных технологий» при АН Республики Таджикистан;

**Шарифов Джумахон Мухторович**- кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теплоэнергетики Евразийского национального университета имени Л.Н. Гумилева (Нур-Султан, Казастан).

**Ведущая организация:** Павлодарский государственный университет имени С.Торайгырова (Павлодар, Казахстан).

Защита состоится «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ **2019** года в \_\_\_\_\_ часов на заседании объединенного диссертационного совета Д999.188.02 по защите докторских и кандидатских диссертаций при Таджикском национальном университете по адресу: 734025, Республика Таджикистан, г. Душанбе, проспект Рудаки, 17, факс (992-372)21-77-11. Зал заседаний Ученого совета ТНУ.

Отзывы направлять по адресу: 734025, г. Душанбе, проспект Рудаки, 17, ТНУ, Диссертационный совет ДМ 999.188.02, 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 «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 г.

Ученый секретарь объединённого диссертационного совета Д 999.188.02, кандидат физ.-мат. наук, СНС

Табаров С.Х.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Теплофизические свойства алюминия и его сплавов, как стратегического материала, представляют собой важнейший раздел физики твёрдого тела, от решения насущных задач которого зависят многие нерешённые до настоящего времени фундаментальные проблемы термодинамики конденсированных сред, особенно если учесть их исключительную важность с научно-технической точки зрения. Исследования в этом направлении необходимы для создания многих новых композиционных материалов на основе алюминия с лучшими и принципиально новыми физическими свойствами.

Однако, к сожалению, до настоящего времени не существует единой теории, удовлетворительно описывающей зависимости теплофизических характеристик металлов от их химического состава. В такой ситуации именно экспериментальное исследование теплофизических свойств металлов, в частности алюминия различных степени чистоты и его сплавов с кремнием, выходит на первый план. Подобные исследования, несомненно, будут способствовать более широкому практическому применению именно отечественного алюминия для нужд народного хозяйства Таджикистана, да и не только. На момент начала настоящей работы в литературе отсутствовали какие-либо сведения о систематических экспериментальных исследованиях зависимостей теплофизических параметров алюминия от степени его чистоты и типов примесей, что лишний раз подтверждает актуальность выбранной темы.

Работа выполнена в соответствии с планами госбюджетных НИР отдела физики конденсированного состояния НИИ Таджикского национального университета и является частью государственных программ «Стратегия Республики Таджикистан в области науки и технологии на 2007- 2015 гг.», «Программа внедрения научно-технических достижений в промышленное производство Республики Таджикистан на 2010-2015 гг.», «Программа инновационного развития Республики Таджикистан на 2011- 2020 гг.».

**В качестве** объекта исследования выбраны лабораторные эталоны

алюминия различных марок и сплавы алюминий-кремний (АК), а также образцы алюминия технической чистоты производства Государственно-унитарного предприятия «Гаджикская алюминиевая компания (ГУП ТАЛКО). Выбор объектов обусловлен широкой перспективой применения отечественного алюминия в различных областях техники и технологии.

**Цель работы** состоит в экспериментальном исследовании теплофизических свойств алюминия различных степени чистоты и сплавов АК в широком интервале температур и установлении закономерностей изменения их теплофизических параметров от степени чистоты и температуры. Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены следующие задачи:

-обоснование правомочности применения метода естественного охлаждения для исследования теплофизических свойств твердых тел в широком интервале температур;

-разработка автоматизированного измерительного комплекса для измерения температуры твердых образцов в автоматическом режиме;

-исследование процесса охлаждения алюминия различных степени чистоты, сплавов АК в интервале температур 293÷873 К и численная оценка вкладов теплового излучения и конвективного теплообмена в процесс;

-установление температурной зависимости теплоемкости и коэффициента теплоотдачи алюминия марки А7 и контроль применимости правила Неймана-Коппа;

-определение закономерности влияния состава на теплофизические характеристики алюминия;

-определение температурных зависимостей молярной теплоемкости, энтальпии, энтропии и энергии Гиббса объектов.

**Научная новизна** работы заключается в том, что впервые:

-**разработана** специальная измерительная установка, осуществляющая автоматизированную регистрацию температуры образцов от времени охлаждения с температурным шагом 0,1 К;

**-выполнено** системное исследование теплофизических свойств алюминия разной степени чистоты и сплавов АК в широком интервале температур;

**-проведена** численная оценка времён релаксации конвективного теплообмена и теплового излучения для алюминия разной степени чистоты и сплавов АК;

**-установлены** температурные зависимости молярной теплоемкости, энтальпии, энтропии и энергии Гиббса для алюминия разной степени чистоты;

**-определены** вклады механизмов теплового излучения и конвективного теплообмена в процессе охлаждения алюминия разной степени чистоты и сплавов АК.

**Практическая значимость** результатов заключается в том, что:

-модифицированный в работе метод охлаждения, в купе с автоматизированным измерительным комплексом с предельно низким температурным шагом (0,1 К) и достаточно широким температурным диапазоном (300-873 К), может быть использован в качестве универсального для исследования теплофизических свойств других металлов и сплавов;

-полученные справочные данные о теплофизических параметрах алюминия и сплавов АК могут быть использованы при расчетах теплофизических характеристик композиционных материалов и тепловых режимов работы металлических конструкций и изделий при высоких температурах;

-результаты по влиянию примесей на теплофизические характеристики алюминия могут стать хорошим подспорьем в развитие макроскопической теории тепловых свойств металлов, а результаты по зависимости коэффициентов конвективной теплоотдачи и теплового излучения, теплоемкости и термодинамических функций от температуры могут быть весомым дополнением к банку справочных данных по теплофизическим свойствам металлов;

-разработанная экспериментальная установка (Малый патент РТ № ТУ 510) реально используется в научных исследованиях и учебном процессе в

Таджикском национальном университете и Таджикском техническом университете им. академика М.С. Осими.

Выносимые на защиту **положения:**

-метод измерения временной зависимости температуры металлов и сплавов при естественном охлаждении, позволяющем выполнять исследования в интервале температур 300-873 К с температурным шагом 0,1 К;

-обоснование правомочности применения метода охлаждения для исследования тепловых характеристик твердых тел в широком интервале температур;

-полученные опытные данные по теплофизическим свойствам алюминия разной степени чистоты и сплавов АК;

-температурные зависимости коэффициентов теплового излучения, конвективного теплообмена, термодинамических функций для алюминия различной степени чистоты и сплавов АК;

-закономерности влияния химического состава и концентрации примесей на теплофизические характеристики алюминия в интервале 293÷873 К.

**Достоверность** полученных результатов подтверждается использованием стандартного калиброванного оборудования с высокими точностью и воспроизводимостью, теоретической обоснованностью, а также хорошим согласием с результатами других авторов.

**Личный вклад** автора заключается в анализе научной литературы по теме диссертационной работы, постановке задач исследования, непосредственном участии в проведении экспериментов, обработке, анализе и интерпретации полученных результатов.

**Публикации.** По результатам исследования опубликовано 23 научных труда, из которых 20 статей, в том числе 6 статей в журналах из Перечня ВАК РФ, 14 статей в материалах международных конференций и 2 Малых патента Республики Таджикистан.

**Апробация работы.** Основные результаты работы доложены на: междунар. НПК «Металлургия Прииртышья в реализации программы форси-

рованного индустриально-инновационного развития «Казахстан-2020» (Павлодар, 2011); междунар. конф. «Современные вопросы молекулярной спектроскопии конденсированных сред» (Душанбе, 2011); IV междунар. НПК «Перспективы развития науки и образования» (Душанбе, 2012); IV междунар. НПК «Наука и образование в XXI веке: динамика развития в евразийском пространстве» (Павлодар, 2016); междунар. конф. «Перспективы развития физической науки» (Душанбе, 2017); междунар. конф. «Современные проблемы физики конденсированного состояния» (Душанбе, 2017); междунар. НПК «Образование и наука в XXI веке: современные тенденции и перспективы развития» (Душанбе, 2018); междунар. НПК «Электроэнергетика: проблемы и перспективы развития энергетики региона». (Душанбе, 2018), International Conference «Scientific research of the SCO countries: synergy and integration» (Beijing, China, 2019).

**Структура и объем диссертации.** Диссертация изложена на 116 страницах компьютерного набора, включает 54 рисунка и 31 таблицу. Диссертация состоит из введения, 3 глав, выводов и библиографического списка из 117 наименований.

**Ключевые слова:** металл, сплав, примесь, температура, охлаждение, теплоотдача, тепловое излучение, теплоёмкость, термодинамические функции.

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и основные задачи работы, отражена научная новизна и практическая значимость работы, приведены основные положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** включает в себя обзор литературы по исследованию влияния примесей на тепловые свойства алюминия и сплавов системы АК. Подчеркнута слабая изученность проблемы и сделан вывод об актуальности её экспериментального исследования в широком диапазоне температур.

**Во второй главе** приводится описание экспериментальной установки для измерения теплофизических свойств твердых тел методом «естественного охлаждения». Приведена методика обработки результатов, анализ по-

грешности полученных данных. Относительная ошибка измерения температуры в интервале от 40 °С до 400 °С составляла  $\pm 1\%$ , а в интервале от 400 °С до 1000 °С  $\pm 2,5\%$ . Вся обработка результатов измерений производилась с помощью специальной программы на MS Excel. Графики строились и обрабатывались с помощью программы Sigma Plot 10. Элементный состав исследованных образцов представлен в табл. 1.

Таблица 1

Элементный состав образцов

№ проб	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ga	Ti	Al
AK-03	5,9	1,17	0,033	0,01	0,02	0,02	0,016	0,009	92,822
AK-79	6,1	0,79	0,01	0,02	0,14	0,02	0,014	0,008	92,898
AK-03	5,5	1,65	0,06	0,02	0,04	0,02	0,017	0,008	92,685
AK-02	6,2	0,76	0,006	0,01	0,09	0,007	0,018	0,008	92,901
AK-01	6,4	1,18	0,04	0,02	0,05	0,02	0,018	0,009	92,263
AK-6.1	8,2	1,76	0,37	0,01	0,22	0,18	0,01	0,03	89,25
AK-6.2	6,2	0,94	0,4	0,01	0,21	0,18	0,01	0,02	92,05
AK-6.3	6,3	1,16	0,37	0,02	0,15	0,18	0,01	0,03	91,81
213	0,15	0,22	0,002	0,006	0,0074	0,01	0,016	0,009	99,61
218	0,17	0,24	0,002	0,007	0,0076	0,01	0,014	0,008	99,57
127	0,18	0,18	0,002	0,008	0,0068	0,01	0,012	0,006	99,62
26	0,21	0,26	0,002	0,009	0,0077	0,01	0,013	0,007	99,51
216	0,14	0,14	0,002	0,006	0,0068	0,01	0,012	0,006	99,70
128	0,15	0,14	0,002	0,006	0,0069	0,01	0,012	0,006	99,69
121	0,14	0,13	0,002	0,007	0,0066	0,01	0,012	0,006	99,71
21	0,27	0,32	0,003	0,008	0,0078	0,01	0,014	0,007	99,39
22	0,22	0,47	0,003	0,009	0,0076	0,02	0,013	0,008	99,28
27	0,20	0,56	0,003	0,009	0,0074	0,02	0,012	0,009	99,21
29	0,19	0,54	0,004	0,009	0,0075	0,02	0,012	0,009	99,24
118	0,21	0,68	0,004	0,01	0,0074	0,02	0,013	0,009	99,07
400	0,276	0,414	0,0035	0,0065	0,006	0,0123	0,0099	0,0113	99,27
800	0,109	0,129	0,0022	0,0045	0,0058	0,012	0,0095	0,0095	99,73
79	0,155	0,176	0,0032	0,0049	0,006	0,0126	0,0098	0,0098	99,63
30300	0,328	1,905	0,0057	0,013	0,0063	0,013	0,0096	0,0105	97,72
0,33	0,096	0,079	0,003	0,0042	0,0067	0,0132	0,0098	0,0094	99,79
407	0,109	0,16	0,003	0,0041	0,0077	0,0137	0,0096	0,0096	99,69
65	0,175	0,254	0,003	0,0056	0,0076	0,0137	0,0098	0,0099	99,53

Все образцы и эталоны были получены из физической лаборатории ГУП ТАЛКО. Химический состав образцов определялся с помощью спектрометра «Spectrolab». Для большей достоверности образцы дополнительно подвергались рентгеноспектральному анализу с помощью рентгеновского аппарата «ТЕРМО ARL-9900» (КЭЗ, Казахстан).

**Третья глава** посвящена изучению температурной зависимости теплофизических свойств исследованных систем и их обсуждению.

Для вычисления теплоемкости алюминия различной чистоты по правилу Неймана-Коппа необходимы данные о температурной зависимости его составляющих. Поэтому, с помощью программы Sigma Plot 10, обрабатывая имеющиеся литературные данные по теплоемкости алюминия, железа, кремния, цинка, меди, магния, марганца и титана при различных температурах, нами получено уравнение температурной зависимости удельной и молярной теплоемкостей, энтальпии, энтропии и энергии Гиббса.

Для удобства пользования полученными закономерностями в инженерных расчетах в дальнейшем применяли зависимости термодинамической функции от переменной  $x = (T - 300)/100$ . Затем, строится график зависимости  $C(T)$  от  $x$ . После статистической обработки графика получили следующую формулу

$$C(T) = a'_1 + b'_1 x + c'_1 x^2 + d'_1 x^3, \quad (1)$$

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

Коэффициенты уравнения (1) приведены в табл. 2. В последнем столбце приведено значение коэффициента регрессии при обработке с помощью программы Sigma Plot 10.

Таблица 2

Значения коэффициентов уравнения (1)

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

В дальнейшем, полученные графики и уравнения для теплоемкости, нами использованы для вычисления теплоемкости по правилу Неймана-Коппа и при объяснении закономерностей влияния примесей на теплофизические свойства алюминия.

При исследовании сплавов на основе алюминия использован первичный алюминий марки А7 прямо из производственного цеха без сертификата на химический состав. В разделе 3.2 диссертационной работы приведены результаты исследования теплофизических свойств эталонного образца алюминия марки А7(1) (состав: Al-99,7; Si-0,15; Fe-0,15; Cu-0,01; Zn-0,04; Ti-0,01) и второго образца алюминия марки А7(2) (состав: Al-99,67; Si-0,12; Fe-0,21; Cu-0,001; Mn-0,002; Mg-0,003; Zn-0,001; Ni-0,005; Cr-0,001; Pb-0,001; Sn-0,001; Ti-0,005; Ga-0,009; Co-0,0025) производства той же компании. Образцы имели цилиндрическую форму диаметром 16 мм и высотой 30 мм.

Экспериментально полученные временные зависимости температуры образцов с достаточно хорошей точностью ( $R$  не менее 0,9998) описываются уравнением вида:

$$T = T_0 + \Delta T_{01} e^{-\frac{\tau}{\tau_1}} + \Delta T_{02} e^{-\frac{\tau}{\tau_2}}, \quad (2)$$

где:  $T_0$  - температура окружающей среды,  $\Delta T_{01}$ ,  $\Delta T_{02}$  - амплитуды изменения температуры первого и второго процессов,  $\tau_1$  и  $\tau_2$  - характерные времена охлаждения образцов. Экспоненциальная зависимость  $T(\tau)$  в формуле (2) показывает, что теплота передается одновременно двумя путями и количество передаваемого тепла пропорционально площади поверхности образца, разности температур тела и окружающей среды, а также соответствующему коэффициенту теплоотдачи при любом механизме переноса теплоты (теплопроводность, конвекция или лучеиспускание). Передача тепла от более нагретого тела к менее нагретому телу - это релаксационный процесс. В

нашем случае нагретое тело передает свое тепло телу с бесконечной теплоемкостью - среде. Поэтому, температуру окружающей среды можно считать постоянной  $T_0$ .

Тогда, уравнение  $Cm dT = -\alpha S(T - T_0) d\tau$  можно записать в виде

$$\frac{d(T - T_0)}{T - T_0} = -\frac{\alpha S}{Cm} d\tau.$$

Считая  $\frac{Cm}{\alpha S} = \tau_1 = const$ , получим закон изменения температуры тела от времени  $\tau$  вида:

$$T = T_0 + \Delta T_{01} e^{-\tau/\tau_1} \quad \text{или} \quad \Delta T = \Delta T_{01} e^{-\tau/\tau_1}, \quad (3)$$

где:  $\Delta T$  - разность температур нагретого образца и окружающей среды,  $\Delta T_{01}$  - разность этих температур в момент начала измерений (при  $\tau = 0$ ),  $\tau_1$  - постоянная, численно равная времени, в течение которого разность температур уменьшается в  $e$  раз. Постоянная  $\tau_1$  пропорциональна произведению массы  $m$  на теплоемкость  $C$  тела и обратно пропорциональна коэффициенту теплоотдачи и общей площади поверхности тела  $S$ . Если считать, что охлаждение происходит за счет конвективного теплообмена и теплового излучения, получим уравнение (2). Дифференцируя (2), для скорости охлаждения получаем

$$\frac{dT}{d\tau} = -\left(\frac{\Delta T_{01}}{\tau_1} e^{-\tau/\tau_1} + \frac{\Delta T_{02}}{\tau_2} e^{-\tau/\tau_2}\right), \quad (4)$$

где:  $\Delta T_{01}/\tau_1$  и  $\Delta T_{02}/\tau_2$  - соответственно, вклады конвективного теплообмена и теплового излучения в скорости охлаждения в начальный момент.

Далее, используя состав образцов, по правилу Неймана-Коппа были вычислены значения теплоемкости. Используя эти значения и экспериментальные величины скорости охлаждения, были вычислены коэффициенты теплоотдачи  $\alpha(T)$  для А7(1) по формуле:

$$|\alpha(T)| = \frac{Cm \left(\frac{dT}{d\tau}\right)}{S(T - T_0)}, \quad (5)$$

где:  $m$  и  $S$  - соответственно, масса и площадь поверхности образца,  $T$  - его температура. На рисунке 1 приведена температурная зависимость коэффици-

ента теплоотдачи для этих образцов. Для вычисления удельной теплоемкости алюминия марки А7(2) использовали данные по коэффициенту теплоотдачи для алюминия А7(1). Далее по формуле:

$$C = \frac{|\alpha(T)|S(T-T_0)}{m\left(\frac{dT}{d\tau}\right)} \quad (6)$$

вычислена величина удельной теплоемкости.

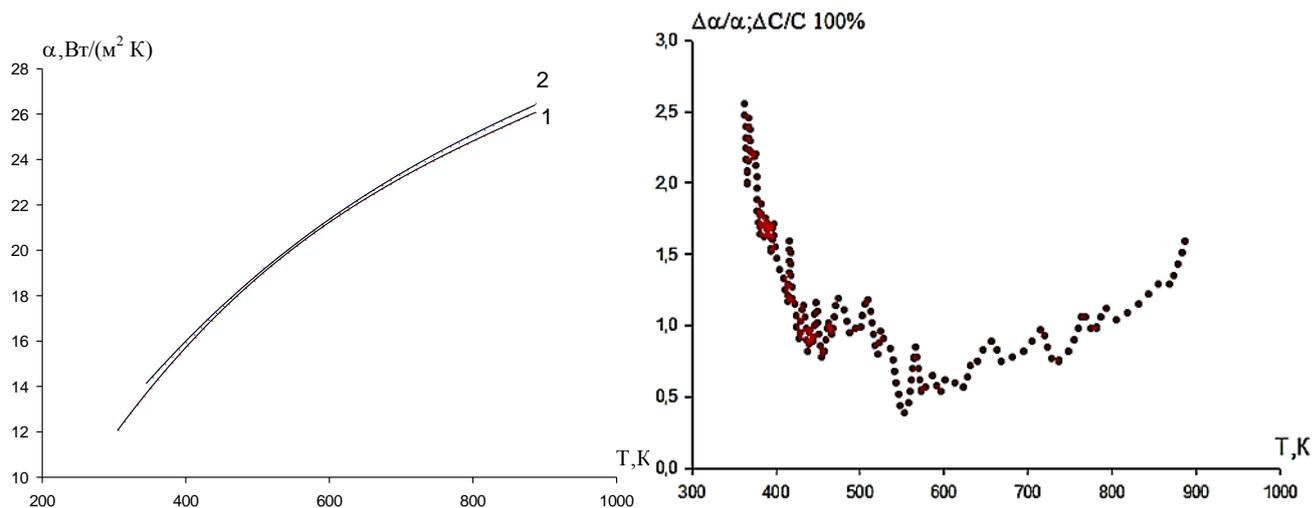


Рис.1. Температурная зависимость коэффициента теплоотдачи алюминия марки А7(1)-1 и А7(2)-2.

Рис. 2. Зависимость относительной разницы значения теплоемкостей и коэффициентов теплоотдачи для А7(1) и А7(2) от температуры.

На рис. 2 приведена зависимость относительной разницы значения теплоемкостей и коэффициентов теплоотдачи для А7(1) и А7(2) от температуры. Сравнение показывает, что максимальное расхождение между значением теплоемкости и коэффициента теплоотдачи для эталона и выпускаемый ГУП ТАЛКО алюминия марки А7 составляет менее 3 %. Полученные результаты свидетельствуют об обоснованности выбранной методики для исследования теплофизических свойств сплавов. Поэтому, при определении теплоемкостей алюминия разной чистоты использовали коэффициент теплоотдачи алюминия марки А7.

Раздел 3.3 диссертации посвящен исследованию влияния примесей на теплофизические свойства алюминия различной степени чистоты и сплавов АК. В табл. 3 приведены значения величин  $\Delta T_{01}$ ,  $\tau_1$ ,  $\Delta T_{02}$ ,  $\tau_2$ ,  $\Delta T_{01} / \tau_1$ ,  $\Delta T_{02} / \tau_2$

Таблица 3

Экспериментальные значения  $\Delta T_{01}$ ,  $\tau_1$ ,  $\Delta T_{02}$ ,  $\tau_2$ ,  $\Delta T_{01} / \tau_1$ ,  $\Delta T_{02} / \tau_2$ 

проба	$\Delta T_{01}, K$	$\tau_1, c$	$\Delta T_{02}, K$	$\tau_2, c$	$\Delta T_{01} / \tau_1, K/c$	$\Delta T_{02} / \tau_2, K/c$	$T_0, K$
AK-6.4	290,97	625	274,60	217,60	0,466	1,260	297,2
AK-6.2	310,99	588,24	253,37	204,08	0,529	1,240	297,5
AK-5.9	305,07	588,24	259,10	204,08	0,519	1,270	297,1
AK-5.5	315,79	555,56	252,27	188,68	0,565	1,340	298,1
AK -8.2	295,41	588,24	283,31	204,08	0,502	1,388	291,9
AK-6.1	309,91	588,24	250,97	204,08	0,527	1,230	297,7
AK-6.2	323,87	588,24	237,50	196,08	0,551	1,210	292,8
AK-6.3	315,48	588,24	266,94	208,33	0,536	1,281	292,9
213	383,13	625	222,31	227,27	0,613	0,978	298,9
218	381,37	625	228,03	222,22	0,610	1,026	299,2
127	383,11	588,24	227,58	212,77	0,651	1,069	299,4
26	353,83	666,67	256,48	238,09	0,531	1,077	298,1
216	375,22	625	235,73	227,27	0,600	1,037	298,4
128	388,78	588,24	223,02	204,08	0,661	1,093	299,2
121	384,12	625	225,42	227,27	0,615	0,992	299,1
21	388,64	588,24	220,09	208,33	0,661	1,060	299,7
22	378,63	588,24	234,45	208,33	0,644	1,125	298,5
27	391,66	588,24	215,33	200,00	0,666	1,077	300,1
29	386,28	588,24	226,41	208,33	0,657	1,087	299,3
118	375,98	625	231,05	238,09	0,602	0,970	298,5
400	388,47	588,24	225,43	204,08	0,660	1,105	288,7
0,33	345,50	666,67	262,20	270,27	0,518	0,970	294,1
79	407,38	588,24	201,64	208,33	0,692	0,968	296,8
407	420,31	588,24	195,24	212,77	0,714	0,918	288,8
800	374,32	625,00	230,72	238,10	0,599	0,969	293,4
30300	353,40	666,67	244,04	238,10	0,530	1,025	292,5

уравнений (2) и (4) для исследованных проб алюминия и сплавов АК.

На рис. 3 и 4 приведены временные зависимости  $\Delta T_1$  ( $\Delta T_1 = \Delta T_{01} \exp^{-(\tau/\tau_1)}$ ),  $\Delta T_2$  ( $\Delta T_2 = \Delta T_{02} \exp^{-(\tau/\tau_2)}$ ) и скорости охлаждения пробы 0,33 для конвективного теплообмена и теплового излучения.

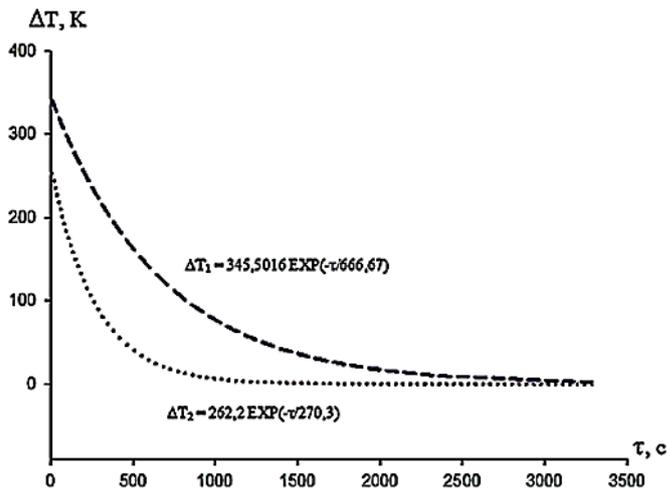


Рис.3. Зависимость температуры алюминия пробы 0,33 от времени при охлаждении для первого и второго процессов.

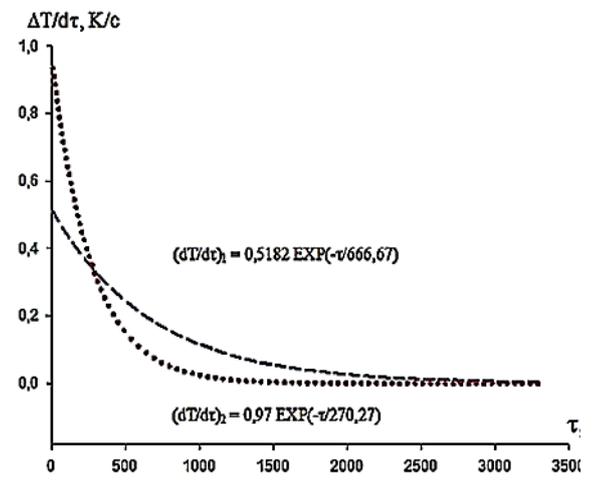


Рис.4. Зависимость скорости охлаждения алюминия пробы 0,33 от времени для первого и второго процессов.

Как видно из табл. 3 и рис. 3 и 4, значения времён релаксации этих процессов отличаются. Охлаждение за счет конвективного теплообмена протекает медленно, а за счёт теплового излучения очень быстро.

В разделе 3.4 работы анализируются температурные зависимости отношения коэффициента теплоотдачи к теплоемкости для алюминия разной степени чистоты. Нужно отметить, что с использованием экспериментальных значений скорости охлаждения можно определить только отношение коэффициента теплоотдачи к теплоемкости образца:

$$\alpha(T)/C(T) = \frac{m(dT/d\tau)}{S(T-T_0)}. \quad (7)$$

На рис. 5 приведены температурные зависимости этих отношений для алюминия разных марок. Как видно из рисунка, с увеличением содержания алюминия в образце отношения коэффициента теплоотдачи к теплоёмкости уменьшается. Это свидетельствует о том, что с ростом содержания алюминия теплоемкость увеличивается быстрее, чем коэффициент теплоотдачи.

На рис.6 и 7 приведены зависимости  $\alpha/C$  от температуры для проб алюминия разной чистоты и сплавов системы Al-Si.

В разделе 3.5 диссертации приведены результаты исследования теплофизических свойств алюминия марок А8, А7, А6, А5 и А0. В качестве при

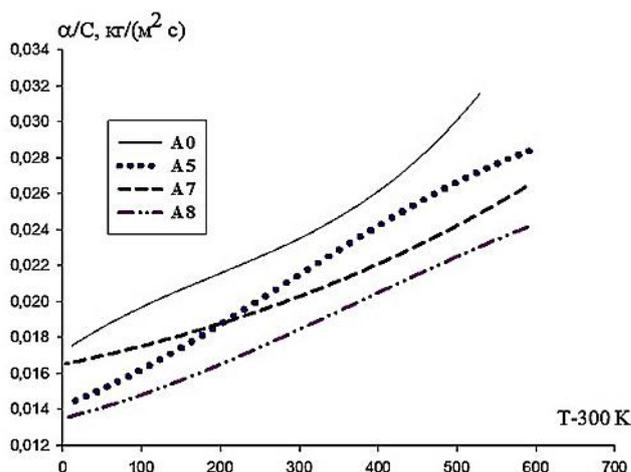


Рис. 5. Зависимость  $\alpha/C$  от температуры для разных марок алюминия.

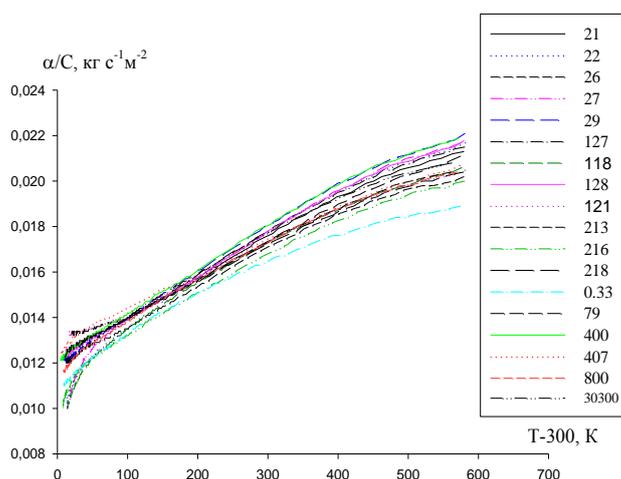


Рис. 6. Зависимость  $\alpha/C$  от температуры для алюминия разной чистоты.

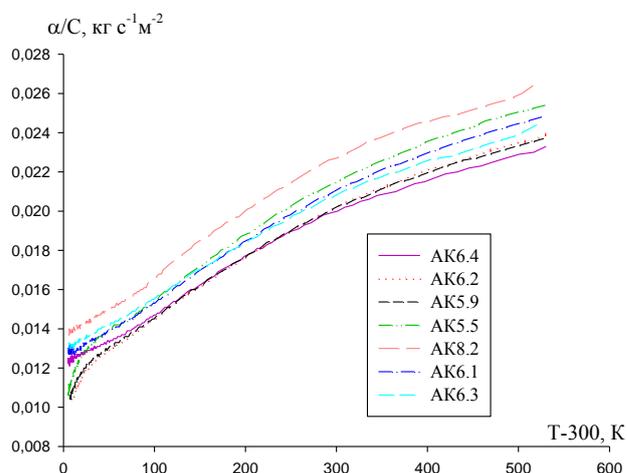


Рис.7. Зависимость  $\alpha/C$  от температуры для сплавов системы Al-Si.

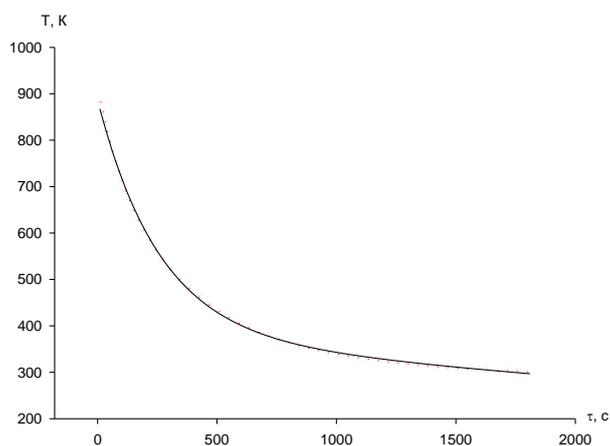


Рис.8. Зависимость температуры алюминия марки А5 от времени охлаждения.

мера на рис. 8 приведена кривая охлаждения алюминия марки А5. Полученные экспериментальные результаты хорошо описываются уравнением (2).

В табл. 4 приведены значения постоянных уравнений (2) и (4) для алюминия разных марок.

Таблица 4

Коэффициенты уравнений (2) и (4) для алюминия разных марок

Сплав	$T_1 - T_0, K$	$\tau_1, c$	$T_2 - T_0, K$	$\tau_2, c$	$(T_1 - T_0)/\tau_1, K/c$	$(T_2 - T_0)/\tau_2, K/c$	$T_0, K$
А0	468,9	416,7	66,0	90,1	1,12	0,73	311,3

A5	412,7	454,5	199,5	122,0	0,91	1,64	296,1
A7	523,3	417,0	90,7	110,0	1,25	0,82	292,6
A8	455,0	526,3	162,8	154,0	0,86	1,06	295,0

По значениям скорости охлаждения и литературным данным по теплоемкости алюминия разных марок были вычислены коэффициенты конвективной теплоотдачи  $\alpha_1(T) = \frac{Cm(dT/d\tau)_1}{S(T-T_0)}$  и излучения  $\alpha_2(T) = \frac{Cm(dT/d\tau)_2}{S(T-T_0)}$ .

На рис. 9 и 10, соответственно, приведены временные зависимости приращения температуры при охлаждении и его скорости за счет конвективного теплообмена и теплового излучения для алюминия А0.

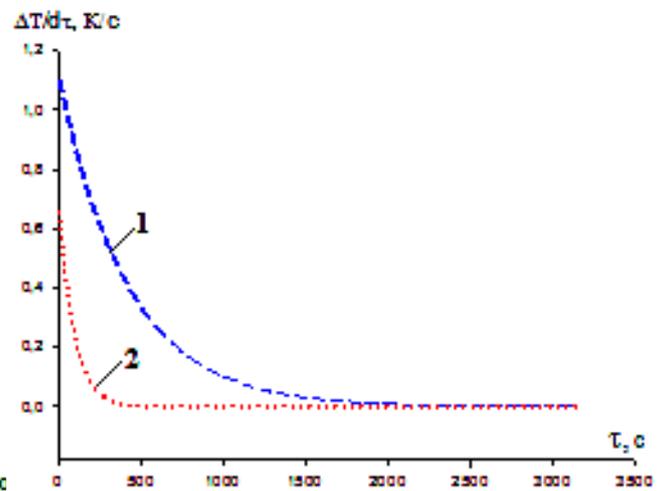
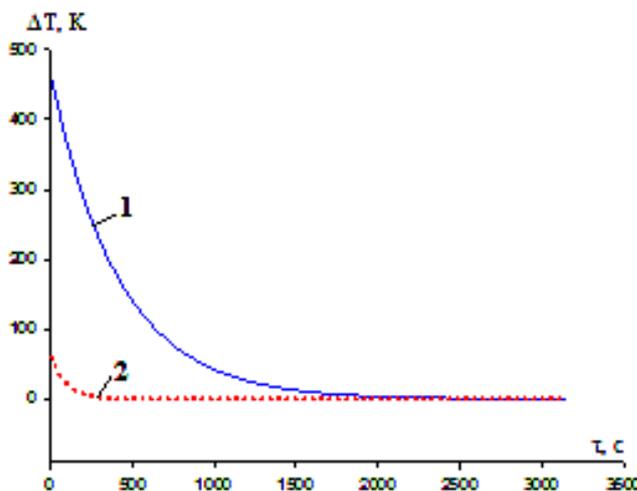


Рис.9. Зависимость приращения температуры алюминия марки А0 от времени при охлаждении для конвекции (1) и излучения (2).

Рис.10. Зависимость скорости охлаждения алюминия марки А0 от времени для конвекции (1) и излучения (2).

На рис. 11 в качестве примера приведена температурная зависимость коэффициентов теплоотдачи  $\alpha_1$  и излучения  $\alpha_2$  для алюминия марки А5. Как видно из рисунка, естественное воздушное охлаждение имеет небольшой коэффициент теплообмена (10 - 20 Вт/(м<sup>2</sup>·К) и очень слабо уменьшается с температурой. По формуле  $x = \frac{\alpha_2}{\alpha} 100 \%$ , где:  $\alpha = \alpha_1 + \alpha_2$ , оценивает долю теплового излучения в общей теплоотдаче. Выявлено, что с повышением температуры при естественном воздушном теплоотводе доля теплового излучения увеличивается. Например, для алюминия марки А7 при 870 К тепло-

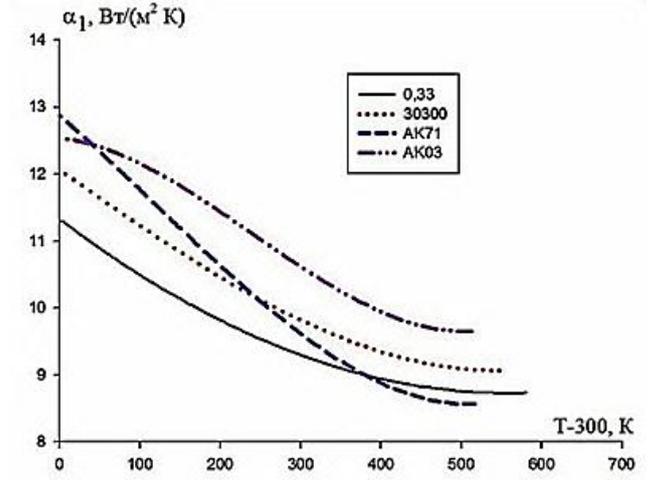
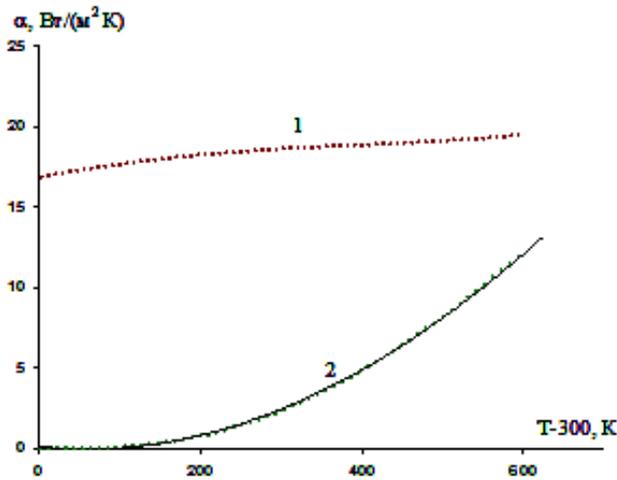


Рис. 11. Зависимость  $\alpha_1(1)$  и  $\alpha_2(2)$  от температуры для алюминия марки А5. | Рис. 12. Зависимость  $\alpha_1$  от температуры для образцов алюминия.

ное излучение составляет 36,4 % от общей теплоотдачи. При понижении температуры до 500 К оно составляет 4,3 %, а при 400 К - 0,84 %.

Используя вычисленные по правилу Неймана-Коппа теплоемкости алюминия А5 и экспериментально полученные величины скоростей охлаждения, нами вычислены коэффициенты теплоотдачи  $\alpha(T)$  по формуле (5).

Для алюминия А5 ( $R=0,9998$ ) температурная зависимость коэффициента теплоотдачи имеет вид:

$$|\alpha(T)| = -27.6531 + 0.1497T - 1.1229 \cdot 10^{-4}T^2 + 2.1491 \cdot 10^{-8}T^3.$$

В разделе 3.6 диссертации приведены значения теплоемкости и термодинамических функций для алюминия различной степеней чистоты. В ряде теоретических и экспериментальных работ показано, что на величину теплоемкости твердых тел существенное влияние могут оказывать присутствующие в них примеси. Влияние примесей проявляется в изменении электронного и фононного спектров металла. Наибольшее влияние оказывают примеси, существенно отличающиеся по массе и потенциалу взаимодействия от атомов основного вещества.

Используя экспериментально найденные величины скорости охлаждения ( $dT/d\tau$ ) и температурную зависимость коэффициента теплоотдачи  $\alpha(T)$  для алюминия марки А7 и, полагая, что он не зависит от концентрации примесей,

нами определена теплоемкость исследованных систем по формуле (6).

На рис. 12 в качестве примера приведена зависимость удельной теплоемкости алюминия пробы 30300 от температуры.

В таблице 5 для исследованных систем приведены значения коэффициентов в уравнения  $C(T - 300) = a_0 + b_0x + c_0x^2 + d_0x^3$ , где:  $x = (T - 300)/100$ .

Для расчета молярной энтальпии, энтропии и энергии Гиббса использовали интегралы от молярной теплоемкости. Для температурных зависимостей получены следующие уравнения термодинамических функций:

$$H(T - 300) = a_1 + b_1x + c_1x^2 + d_1x^3. \quad (8)$$

$$S(T - 300) = a_2 + b_2x + c_2x^2 + d_2x^3 \quad (9)$$

$$G(T - 300) = a_3 + b_3x + c_3x^2 + d_3x^3 \quad (10)$$

Таблица 5

Значения коэффициентов  $a_0$ ,  $b_0$ ,  $c_0$  и  $d_0$

Металл, сплав	$a_0$ , Дж/(кг К)	$b_0$ , Дж/(кгК <sup>2</sup> )	$-c_0$ , Дж/(кгК <sup>3</sup> )	$d_0$ , Дж/(кгК <sup>4</sup> )
AK01	886.0888	48,95	5	0.85904
AK02	888.7101	48.90	5	0.85743
AK03	885.4103	48.76	5	0.86235
AK03 (2)	887.0758	48.83	5	0.86012
AK79	888.6624	48.87	5	0.85710
AK71	878.3526	49.31	5	0.85536
AK6.2 (1474)	885.3674	48.76	5	0.85448
AK6.3 (1551)	884.2731	48.80	5	0.85595
213	901.9869	47.40	4	0.86461
218	901.8624	47.41	4	0.86468
127	902.1033	47.40	4	0.86441
26	901.7066	47.42	4	0.86472
216	902.3458	47.39	4	0.86429
128	902.3293	47.39	4	0.86427
121	902.3939	47.39	4	0.86424
21	901.3288	47.44	4	0.86490

22	900.6919	47.43	4	0.86562
27	900.3213	47.43	4	0.86604
29	900.4346	47.43	4	0.86597
118	899.6767	47.44	4	0.86647
400	900.7347	47.44	4	0.86515
0,33	902.5725	47.37	4	0.86394
79	902.0283	47.39	4	0.86429
407	902.1837	47.38	4	0.86427
800	902.3334	47.38	4	0.86416
30300	893.8240	47.55	4	0.87160

В табл. 6-7 приведены значения коэффициентов уравнений (8-9). Как видно из таблицы для сплавов системы алюминий-кремний только для АК71 наблюдается отклонение значений коэффициентов от средних величин. Для алюминия пробы 0,33 значение коэффициентов отличается от остальных.

Таблица 6

Значения коэффициентов  $a_1, b_1, c_1, d_1$  уравнения (8)

для исследованных систем

	$a_1, \frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$	$b_1, \frac{\text{кДж}}{\text{моль } K}$	$c_1, \frac{\text{кДж}}{\text{моль } K^2}$	$d_1, \frac{\text{кДж}}{\text{моль } K^3}$
AK01	6.484	2.44	0.053	0.002
AK02	6.491	2.44	0.053	0.002
AK03	6.486	2.44	0.052	0.002
AK03(2)	6.492	2.44	0.053	0.002
AK79	6.495	2.44	0.053	0.002
AK71	6.370	2.37	0.042	0.001
AK6,2 (1474)	6.490	2.44	0.055	0.001
AK6,3 (1551)	6.488	2.44	0.054	0.002
213	6.580	2.46	0.044	0.002
218	6.580	2.46	0.044	0.002
127	6.580	2.46	0.044	0.002
26	6.579	2.46	0.044	0.002
216	6.583	2.46	0.044	0.002
128	6.581	2.46	0.044	0.002
121	6.581	2.46	0.044	0.002

21	6.579	2.46	0.045	0.003
22	6.578	2.46	0.044	0.002
27	6.579	2.46	0.045	0.002
29	6.558	2.44	0.038	0.002
118	6.576	2.46	0.044	0.002
400	6.578	2.46	0.045	0.002
0,33	6.484	2.44	0.053	0.002
79	6.580	2.46	0.044	0.002
407	6.581	2.46	0.044	0.002
800	6.582	2.45	0.045	0.002
30300	6.575	2.45	0.049	0.002

Таблица 7

Значение коэффициентов уравнения (9)

	$a_2, \frac{\text{Дж}}{\text{моль}}$	$b_2, \frac{\text{Дж}}{\text{моль К}}$	$-c_2, \frac{\text{Дж}}{\text{моль К}^2}$	$d_2, \frac{\text{Дж}}{\text{моль К}^3}$
AK01	111.608	7.84	0.777	0.053
AK02	111.763	7.83	0.778	0.053
AK03	111.865	7.84	0.778	0.054
AK03(2)	111.8274	7.84	0.778	0.053
AK79	111.883	7.84	0.780	0.054
AK71	110.684	7.79	0.809	0.056
AK6,2 (1474)	110.684	7.79	0.809	0.056
AK6,3 (1551)	111.650	7.88	0.797	0.056
213	114.181	7.83	0.768	0.050
218	114.169	7.83	0.767	0.050
127	114.176	7.83	0.767	0.050
26	114.153	7.83	0.766	0.050
216	114.238	7.83	0.767	0.050
128	114.179	7.83	0.768	0.050
121	114.200	7.83	0.766	0.050
21	114.117	7.83	0.768	0.050
22	114.111	7.83	0.767	0.050
27	114.102	7.84	0.769	0.050
29	114.598	8.16	0.712	0.050
118	114.048	7.83	0.764	0.050
400	114.095	7.84	0.773	0.051
0,33	114.623	8.16	0.719	0.051

79	114.189	7.83	0.767	0.050
407	114.099	7.80	0.771	0.051
800	114.200	7.86	0.780	0.052
30300	113.788	7.92	0.799	0.055

Из-за не разработанности теории, описывающей возможные изменения термодинамических функций веществ в зависимости от его состава количественные оценки и качественные объяснения полученных данных еще преждевременны. Наиболее сильное влияние на теплоемкость и термодинамические функции оказывают примеси, существенно отличающиеся по массе и потенциалу взаимодействия от атомов основного вещества. Сильное влияние на изменение теплоемкости за счет примесей оказывает степень анизотропии кристаллической решетки.

Раздел 3.7 работы посвящен оценке вкладов теплового излучения и конвективного теплообмена в коэффициент теплоотдачи алюминия различной чистоты при естественном воздушном теплоотводе. Исследована зависимость температуры образцов от времени в диапазоне температур от 300 до 873 К.

Используя значения скорости охлаждения и теплоемкости (табл. 6), вычислены коэффициенты конвективной теплоотдачи и теплового излучения.

Зависимость коэффициента теплоотдачи при конвективном обмене  $\alpha_1$  и коэффициента излучения  $\alpha_2$  от температуры описывается уравнением:

$$\alpha = a + b(T - 300) + c(T - 300)^2 + d(T - 300)^3 . \quad (11)$$

В табл. 8 приведены значения  $a$ ,  $b$ ,  $c$  и  $d$  уравнения (11) для  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ .

Таблица 8

Значения  $a$ ,  $b$ ,  $c$  и  $d$  для исследованных образцов.

Образец		$a$	$b$	$c \cdot 10^{-5}$	$d \cdot 10^{-8}$
Al-30300	$\alpha_1$	12,0685	-0,0086	-0,1215	0,8191
	$\alpha_2$	0,0000	0,0210	4,9393	6,1534
AK-71	$\alpha_1$	12,8710	-0,0104	-0,9075	2,5311

	$\alpha_2$	0,0000	0,0374	7,1833	-1,3429
AK-03	$\alpha_1$	12,5382	-0,0013	-2,9086	4,0279
	$\alpha_2$	0,0000	0,0284	8,3123	-1,1549
Al-0.33	$\alpha_1$	9,4191	-0,0050	1,1327	-0,8498
	$\alpha_2$	8,2305	0,0268	-0,7205	-0,2749

Для сравнения на рис. 12 и 13 приведены вклады теплового излучения и конвективного теплообмена для исследованных образцов. Как видно из рисунков, естественное воздушное охлаждение имеет низкий коэффициент конвективного теплообмена – до 9 - 13 Вт/(м<sup>2</sup>·К), уменьшается с температурой и с ростом чистоты алюминия, а также концентрации кремния.

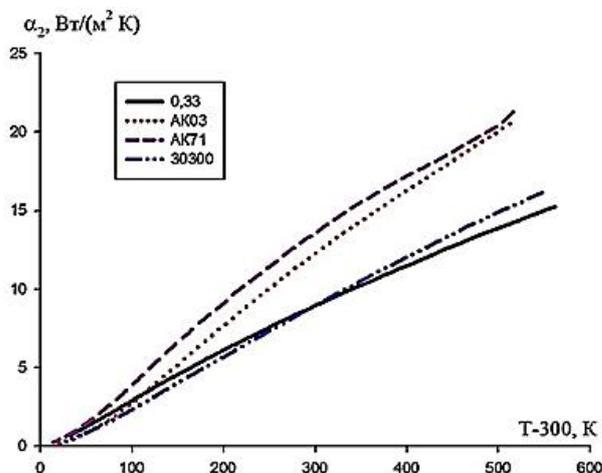


Рис.13. Зависимость коэффициента теплового излучения от температуры для алюминия различной степени чистоты.

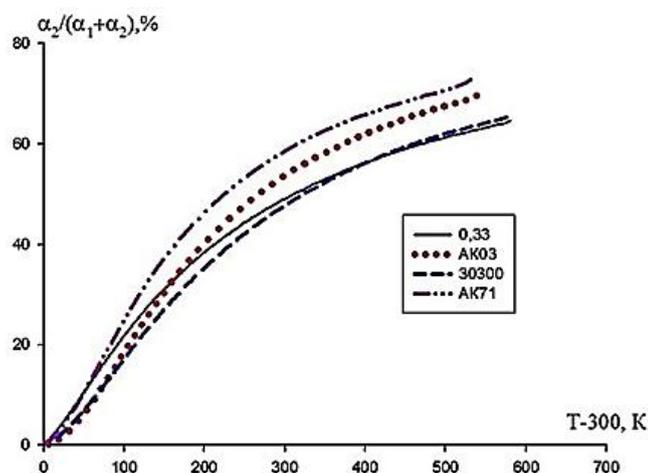


Рис.14. Температурная зависимость доли теплового излучения в охлаждении алюминия разной чистоты.

Коэффициенты теплового излучения для пробы 0,33 и 30300 близки, а для сплавов АК с ростом концентрации кремния увеличиваются.

По формуле  $x = \frac{\alpha_2}{\alpha} 100\%$ , где  $\alpha = \alpha_1 + \alpha_2$ , оценена доля теплового излучения в общей теплоотдаче.

На рис. 14 приведена температурная зависимость доли теплового излучения в охлаждении алюминия разной степени чистоты. Как видно, с повышением температуры при естественном охлаждении доля теплового излучения увеличивается. Например, для алюминия марки АК71 при 870 К теп-

ловое излучение составляет около 70 % от общего охлаждения. При понижении температуры до 500 К оно составляет 40 %, а при 400 К – 20 %.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ**

1. Разработана и собрана специальная измерительная установка, позволяющая производить автоматическую регистрацию и обработку зависимостей температуры металлов и сплавов от времени охлаждения в широком интервале с шагом 0,1 К.
2. Проведено систематическое исследование теплофизических свойств алюминия разной степени чистоты и сплавов АК в широком интервале температур и показана высокая эффективность и информативность предложенного метода исследования.
3. Показано, что процесс охлаждения образцов алюминия и сплавов на его основе во всех случаях осуществляется по конвективному и излучательному механизмам теплообмена с окружающей средой, обладающим характерными временами релаксации. Проведена численная оценка времён релаксации конвективного теплообмена и теплового излучения для алюминия разной степени чистоты и сплавов АК. Выявлены отличия между этими величинами.
4. Впервые определены коэффициенты конвективного теплообмена и теплового излучения для металлов, оценены вклады теплового излучения и конвективного теплообмена в процессе охлаждения алюминия разной степени чистоты и марок и сплавов АК. Установлено, что с ростом температуры доля теплового излучения в общем коэффициенте теплоотдачи увеличивается, а коэффициент конвективного теплообмена с температурой несколько уменьшается.
5. Путём компьютерной обработки (Sigma Plot 10) литературных экспериментальных данных для железа, кремния, цинка, меди, магния, марганца и титана, входящих в алюминий в виде примеси, получено уравнение температурной зависимости их удельной теплоемкости, успешно примененное впо-

следствии для вычисления теплоемкости по правилу Неймана-Коппа и объяснения механизма влияния примесей на теплофизические свойства алюминия.

6. Установлено, что концентрационное изменение удельной теплоемкости образцов качественно подчиняется правилу Неймана-Коппа. С использованием температурной зависимости скорости охлаждения и коэффициента теплоотдачи алюминия марки А7 и приближением о его независимости от концентрации примесей определена теплоемкость исследованных систем. На этой основе вычислены температурные зависимости молярных термодинамических функций.

7. Показано, что на величины теплофизических параметров алюминия разной чистоты и марки существенное влияние оказывают, в основном, присутствующие в них железо и кремний. Примеси в металлах в той или иной степени ухудшают их теплофизические свойства, откуда следует, что свойства относительно чистых металлов характеризуется не содержанием основного металла, а количеством конкретных примесей.

8. Установлены температурные зависимости молярной теплоемкости алюминия разной степени чистоты, на основании которых получены температурные зависимости молярных термодинамических функций в том же интервале температур. Для удобства использования их в инженерных расчетах все уравнения приведены в виде переменной  $x = (T - 300)/100$ . Определены коэффициенты в полиномах, описывающих температурные зависимости теплофизических свойств исследованных систем, что позволяет в дальнейшем более полно представить особенности изменений в структуре алюминиевых сплавов, происходящих на микроскопическом уровне.

## Публикации по теме диссертации

1. Низомов З., **Мирзоев Ф.М.**, Гулов Б.Н. Оценка вклада теплового излучения и конвективного теплообмена в коэффициент теплоотдачи алюминия различной чистоты при естественном воздушном теплоотводе // Доклады АН Республики Таджикистан, 2017.-Т.60.-№11-12.-С.575-582.
2. Низомов З., **Мирзоев Ф.М.**, Акрамов М.Б., Саидов Р.Х. Температурная зависимость теплофизических свойств алюминия марки А5 // Доклады АН Республики Таджикистан, 2015.-Т.57.-№2.-С.140-144.
3. Низомов З., **Мирзоев Ф.М.**, Гулов Б.Н. Исследование теплофизических свойств алюминия разных марок и чистоты // Вестник Таджикского национального университета. Серия естественных наук, 2018.-№1.-С.109-113.
4. Низомов З., **Мирзоев Ф.М.**, Гулов Б.Н. Термодинамические функции различных марок алюминия и сплавов Al-Si // Вестник Таджикского национального университета. Серия естественных наук, 2017.-№1-4.-С.81-87.
5. Низомов З., **Мирзоев Ф.М.** Температурная зависимость теплоемкости и термодинамические функции алюминия, железа, кремния, цинка, меди, магния, марганца и титана // Вестник Таджикского национального университета. Серия естественных наук, 2019.-№1.-С.81-87.
6. Гулов Б.Н., **Мирзоев Ф.М.**, Иброхимов Н.Ф., Саидов Р.Х., Низомов З. Сравнение температурной зависимости теплоемкости и коэффициента теплоотдачи алюминия марки А7 // Вестник Таджикского технического университета, 2011.-№1(13).-С.8-12.
7. Nizomov Z. Thermophysical properties of aluminum of different purity/ Z. Nizomov, F.M. Mirzoev. - Scientific research of the SCO countries: synergy and integration- International Conference.- Beijing, China, 2019.- P.213-223.
8. Мирзоев Ф.М. Влияние металлических примесей на теплофизические свойства алюминия/ Ф.М. Мирзоев, З. Низомов, М.Б. Акрамов.- X International correspondence scientific specialized conference “International scientific review of the problems of natural sciences end medicine”- Boston. Massachusetts printed in the United States of America, 2019.- P. 16-24.
9. Низомов З., **Мирзоев Ф.М.**, Гулов Б.Н. Термодинамические свойства различных марок алюминия // Материалы международной конференции

«Образование и наука в XXI веке: современные тенденции и перспективы развития». Душанбе: Изд-во ТНУ, 2018.-С.34-38.

10. Низомов З., **Мирзоев Ф.М.**, Гулов Б.Н. Влияние примеси на теплоёмкость различных марок алюминия // Матер. межд. конф. «Перспективы развития физических наук». Душанбе: Изд-во ТНУ, 2017.-С.219-220.

11. Низомов З., **Мирзоев Ф.М.**, Саидов Р.Х., Акрамов М.Б. Влияние примеси на теплофизические свойства различных марок алюминия // Матер. II межд. науч. конф. «Химия алифатических и циклических производных глицерина и аспекты их применения». Душанбе: Изд-во ТНУ, 2016.-С.109-115.

12. Низомов З., **Мирзоев Ф.М.**, Гулов Б.Н., Саидов Р.Х., Акрамов М.Б., Саидов Р.Х., Имнатшоева Н.Д. Термодинамические свойства алюминия марки А5 // Матер. IV межд. НПК «Наука и образование в XXI веке: динамика развития в евразийском пространстве». Павлодар: Инновационный Евразийский университет, 2016.- С.99-102.

13. **Мирзоев Ф.М.**, Акрамов М.Б., Низомов З. Рентгеноспектральный анализ образцов алюминия технической чистоты // Матер. межд. конф. «Современные вопросы молекулярной спектроскопии конденсированных сред». Душанбе: Изд-во ТНУ, 2011.-С.56-59.

14. **Мирзоев Ф.М.** Температурная зависимость теплоемкости алюминия, железа, кремния, цинка, меди, магния, марганца и титана// Матер. межд. НПК «Электроэнергетика: проблемы и перспективы развития энергетики региона». Душанбе: Изд-во ТТУ им. акад. М.С. Осими, 2018.-С.200-202.

15. Низомов З., Гулов Б., Саидов Р., Обидов З., **Мирзоев Ф.**, Авезов З., Иброхимов Н. Установка для измерения теплоемкости твердых тел // Малый патент Республики Таджикистан №ТJ510. Приоритет изобретения от 03.10.2011 г.

16. Низомов З., Иноятов М.Б., Турахасанов И.Т., **Мирзоев Ф.**, Насимов Дж., Саидов Р.Х. Установка для исследования температурной зависимости электропроводности металлов и сплавов // Малый патент Республики Таджикистан №ТJ 667. Приоритет изобретения от 27.11.2013 г.