

**НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК ТАДЖИКИСТАНА  
ИНСТИТУТ ВОДНЫХ ПРОБЛЕМ, ГИДРОЭНЕРГЕТИКИ И  
ЭКОЛОГИИ НАНТ**

**На правах рукописи**

**УДК 536.12.24:33**



**ДЖУМАЕВ Саиджахфар Сафаралиевич**

**ВЛИЯНИЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК НА ИЗМЕНЕНИЕ  
ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ И ТЕПЛОЕМКОСТИ ХЛАДАГЕНТОВ ПРИ  
РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ И ДАВЛЕНИЯХ, ВКЛЮЧАЯ  
КРИТИЧЕСКУЮ ОБЛАСТЬ**

**Специальность- 01.04.14 - Теплофизика и теоретическая теплотехника**

**ДИССЕРТАЦИЯ**

**на соискание учёной степени кандидата технических наук**

**Научный руководитель:**

**Заслуженный деятель науки и техники Таджикистана,  
академик МИА, академик ИАРТ академик МАХ, доктор  
технических наук, профессор**

**Сафаров Махмадали Махмадиевич**

**Душанбе –2022**

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ.....	5
ВВЕДЕНИЕ.....	6
ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.....	14
ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИССЛЕДУЕМЫХ ВЕЩЕСТВ.....	16
1.1. Обзор литературных данных по теплофизическим свойствам хладагентов и наночастиц.....	16
1.1.1. Изобутан (2-метилпропан).....	16
1.1.2. -н-Бутан (C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> ).....	17
1.1.3. Основные характеристики углеродных нанотрубок.....	21
1.2. Математическое моделирование тепловых процессов в углеродных нанотрубках и фуллеренах.....	21
ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ, ТЕПЛОЕМКОСТИ РАСТВОРОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ДАВЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ.....	37
2.1. Экспериментальная установка для измерения теплопроводности жидкостей и растворов при различных давлениях и температурах.....	37
2.2. Методика измерения теплопроводности растворов и наножидкостей при различных температурах и давлениях....	44
2.3. Расчетное уравнение для вычисления теплопроводности на основе данных опыта. Проверка прибора на отсутствие конвекции.....	44
2.4. Экспериментальная установка для измерения температуропроводности жидкостей при различных температурах и давлениях (Патент РТ №ТJ292,2010).....	49
2.5. Методика измерения температуропроводности растворов и жидкостей при различных температурах и давлениях (Патент РТ № TJ 292, 2010).....	51
2.6. Расчет погрешности измерения теплопроводности, температуропроводности веществ по методу цилиндрического бикалориметра регулярного теплового режима первого и второго рода.....	53
2.7. Метод численного определения изобарной теплоемкости исследуемых растворов при различных температурах и давлениях.....	58

ГЛАВА 3.	ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ ПО ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ И ТЕПЛОЕМКОСТИ СИСТЕМЫ ХЛАДАГЕНТОВ И УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ И ДАВЛЕНИЯХ.....	60
3.1.	Теплофизические (теплопроводность, теплоемкость) свойства системы хладагентов (н-бутан, изобутан) + углеродные нанотрубки (ОУНТ, МУНТ) при различных температурах и давлениях.....	60
3.1.1.	Теплопроводность исследуемых образцов при различных температурах и давлениях.....	60
3.1.2.	Теплопроводность н-бутана +ОУНТ.....	61
3.1.3.	Теплопроводность изобутана +ОУНТ.....	68
3.1.4.	Теплопроводность н-бутана +МУНТ.....	75
3.1.5.	Теплопроводность изобутана (2-метилпропан) +МУНТ..	82
3.2.	Влияние наночастиц ОУНТ на изменение теплопроводность изобутана (2-метилпропан) (после добавки наночастиц в течение 50 часов).....	88
3.3.	Влияние наночастиц ОУНТ на изменение теплопроводности изобутана (2-метилпропана) в критической области.....	104
3.4.	Теплоемкость хладагентов системы (н-бутан, изобутан (2-метилпропан)) при различных температурах и давлениях.	107
3.5.	Использование теплопроводности и теплоемкости для инженерных расчетов исследуемых хладагентов (х.ч. изобутан (2-метилпропан) + одностенные углеродные нанотрубки) в зависимости от температуры.....	119
3.6.	Расчет теплопроводности исследуемых растворов при различных температурах и давлениях (модели Максвелла и Дульнева).....	120
3.7.	Влияние одностенных углеродных нанотрубок на изменение теплоемкости жидкого хладагента (2-метилпропан).....	122
ГЛАВА 4.	ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПО ТЕПЛО-ПРОВОДНОСТИ И ТЕПЛОЕМКОСТИ ИССЛЕДУЕМЫХ КОЛЛОИДНЫХ РАСТВОРОВ СИСТЕМЫ ИЗОБУТАНА.....	125
4.1.	Обобщение экспериментальных данных по теплопроводности и теплоемкости хладагентов в зависимости от температуры и давления.....	125

4.2.	Взаимосвязь между теплопроводностью и теплоемкостью исследуемых наножидкостей при атмосферном давлении.	132
4.3.	Аппроксимационные зависимости по теплопроводности исследуемых хладагентов при атмосферном давлении и различных температурах.....	134
4.4.	Обработка экспериментальных данных по теплопроводности исследуемых хладагентов в критической области.....	138
4.5.	Численное моделирование температуры изгиба до и после критической температуры.....	143
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ .....	153
	ПРИЛОЖЕНИЕ .....	178

## ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)

$C_p$ - удельная изобарная теплоемкость, Дж/(кг· К)

$\tau$  – время, с

$T$  – температура, К

$Q$ - количество теплоты, Дж

$Fo$  – критерий Фурье

$P$ - давление, Па

$\Delta T$ - разность значений температур, К

$Pr$ - критерий Прандтля

$Gr$ - критерий Грасгофа

$\rho$  – плотность, кг/ м<sup>3</sup>

УНТ- углеродные нанотрубки,

$\alpha$  –доверительная вероятность

$\alpha_p$  – коэффициент теплового расширения, 1/К

$\beta_T$ - изотермическая сжимаемость, 1/Па

$P_i$ - внутреннее давление, Па

$C_V$ - изохорная теплоемкость, Дж/(м<sup>3</sup>· К)

$M$  - молярная масса, кг/ моль

$m$ - темп регулярного охлаждения, 1/с

$U$ - показания потенциометра, мВ

$\alpha$ - коэффициент теплоотдачи излучением

$\varepsilon$  –степень черноты

$\nu$  –коэффициент кинематической вязкости, м<sup>2</sup>/с

$d$ - диаметр ядра бикалориметра, мм

$G_j$ -масса ядра, кг

ТФС – теплофизические свойства

АУ – адсорбционная установка

ТТУ- Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими

НАНТ-Национальная Академия Наук Таджикистана

## ВВЕДЕНИЕ

*Актуальность темы.* Проведение исследований в области теплофизических свойств (теплопроводность, удельная изобарная теплоемкость) веществ носит многолетний характер. Производительность и интенсификация технологических процессов напрямую имеет зависимость от направленности потоков тепла и массы, а также и от правильной постановки выполнения химических взаимодействий.

С целью развития техники, технологии и оптимизации соответственных процессов, протекающих в них необходимо обладать, обоснованной научными положениями, достоверной информацией, пригодной для инженерно-конструкторских расчетов, а подобная информация в свою очередь нуждается в сведениях о теплофизических свойствах рабочего вещества, охватывающих значительный диапазон изменения параметров состояния. Исходя из этого следует, что дальнейшее развитие исследовательских работ в изучении теплопроводности и теплоемкости рабочих веществ закладывает основу для совершенствования соответственных процессов и позволяет обеспечить надежность конструктивных разработок.

Получение каких-либо материалов с предварительно заложенными параметрами и свойствами, требуемых для дальнейшей разработки и модернизирования большинства отраслей народного хозяйства, а также и интенсификации научно-технического прогресса, в условиях отсутствия соответствующей информации об их свойствах маловероятно. Отсутствие подобных знаний может негативно влиять на качество конечного продукта, а от степени их достоверности зависит эффективность последующих исследований. К наиболее значимым свойствам теплофизических характеристик веществ, входят: теплопроводность и теплоёмкость веществ.

Растворы, включая растворы хладагентов либо жидких, либо газообразных во всем своем многообразии, представляют собой достаточно распространенные рабочие тела во многих отраслях современной техники в качестве теплоносителей и химических реагентов.

Среди прочих, относительно значимых параметров газов и жидкостей, от которых зависят решения большинства теоретических и прикладных задач, принято считать теплопроводность и теплоемкость. Наиболее весомый вклад они вносят в расчетах тепло- и массообмена большинства теплотехнических и теплотехнологических устройств, способствующих логическому объяснению происходящих в них процессов.

Главным источником теплофизических (теплопроводность и теплоемкость) характеристик хладагентов (изобутана), и в чистом виде, и с различным содержанием наночастиц, на сегодняшний день считаются экспериментальные данные. Экспериментально полученная информация носит практический и прикладной характер не только для производства, но и для науки при совершенствовании и разработке новых расчетно-теоретических способов изучения теплофизических характеристик.

Значения теплоемкости и теплопроводности чистого изобутана и его смесей, т.е. с добавлением разной концентрации наночастиц, обеспечивают надежное развитие и создание передовых технологий, а также и современной теории двухфазных систем; способствует установлению механизма межмолекулярного взаимодействия в чистых жидких веществах и с добавкой в них наночастиц других материалов, которые позволяют дать разумное объяснение множеству физико-химических и термических явлений, зависящих от молекулярного переноса.

Самыми точными на сегодняшний день данными по теплопроводности и теплоемкости технически важных веществ являются те, которые получены экспериментальным путем.

Изобутан применяется:

- в качестве теплоносителя в модельных образцах авиационных компрессионных двигателях;
- в качестве хладагента в конденсированных системах современных автомобилей;
- в качестве теплоносителя космических летательных аппаратов;

- в качестве теплоносителя в рефрижераторных и комбинированных установках.

Как известно инженерные расчеты нуждаются в достоверных сведениях по теплоемкости и теплопроводности рабочих тел, в нашем случае изобутана в жидкой и газовой состояниях, от которых в свою очередь зависит степень точности результатов расчетов аппаратов, узлов и систем создания модернизированных технологических процессов и устройств химического производства и летательных аппаратов.

Несмотря на то, что чистый изобутан и с добавлением одно- и многостенных нанотрубок представляет собой достаточно распространенный технически важный материал, по его теплофизическим характеристикам информации очень мало. Одним из основных путей интенсификации процессов теплообмена является улучшение теплопроводных и теплоемкостных характеристик используемых теплоносителей. С этой целью добавляют наночастицы твердых веществ, обладающих относительно большей теплопроводностью.

На сегодняшний день исследованием характеристик наноматериалов, в частности наножидкостей, широко занимаются многие исследовательские группы в таких передовых странах, как Россия, США, Корея, КНР, Япония, Франция и др. Количество публикаций, в которых показаны результаты исследований по наножидкостям, интенсивно увеличивается. В силу сказанного выше мы изучили теплопроводность и теплоемкость чистого изобутана в виде газа и жидкости, а также и с добавлением разной концентрации углеродных одно- и многостенных нанотрубок.

**Степень разработанности темы исследования:** вопросами исследования ТФС химически чистых жидких веществ и их растворов с добавками различных наночастиц и без них, а также под влиянием различных температур и давлений занимались и занимаются как зарубежные, так и отечественные ученые и исследователи. К таковым относятся экспериментальные работы Гусейнова К.Д., Рудяка В.Я., Терехова В.М., Чои, и др. и теоретические Гамильтона, Кроссера,



Хашина–Штрикмана, Максвелла, Леннарда-Джонса, Вика–Чендлера–Андерсена и др.

Понятие критической точки известно еще с 19 века, а точки фазового перехода еще раньше, но работы, посвященные практическому использованию явлений проходящих в области выше критической точки и фазового перехода начали появляться во второй половине 20 века.

Теоретическим основам явлений в сверхкритической области посвящены работы Ландау Л.Д., Левщитца Е.М., Анисимова М.А., Пакровского В.Д., Жузе Т.П., Абдулагатова И.М., Усманова А.Г., Амирхонова Д.Т., Кислева С.Б., и др.

Исследованию теплопроводности жидкостей при различных фазовых переходах посвящен ряд работ, в том числе Гобулова Д.М., Нагащими Т.С., Ахундова, Мустафоева Р.А., Гусейнова К.Д., Сафарова М.М., Маджидова Х.М., Тарзиманова А.А., Родель Дж.Н., Таузина Р.П., и др. (справочник по теплопроводности жидкостей и газов (под. Ред Н.Б.Варгафтика. М. Энергоатомиздат, 1990,-352с)).

Таким образом, процесс теплопереноса частично изучен, однако до сих пор остаются большое количество неизученных вопросов касательно изменения свойств отдельных классов органических жидкостей как с добавкой, так и без добавки наночастиц.

С учетом изложенного выше, нами выполнен ряд экспериментальных исследований по изучению теплопроводности и теплоемкости изобутана в жидкой и газовой фазах при изменении температуры, давления и концентрации нанодобавок (ОСУНТ и МСУНТ).

**Диссертационная работа:** выполнена по плану координации научно – исследовательских работ в области естественных и общественных наук НАНТ на 2015-2021 годы по теме «Теплофизические свойства веществ» по проблеме 1.9.7– «Теплофизика».

**Объект исследования:** изобутан в газовом и жидком состоянии, одно- и многостенные углеродные нанотрубки.

**Цель диссертационной работы:** на основе комплекса экспериментальных исследований получение данных по теплопроводности и теплоемкости системы изобутан (жидкий и газообразный) + одно- и многостенные углеродные нанотрубки (до 2,5 %) в интервале температур (280-630)К и давлений (0,101-49,01) МПа.

**Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:**

1. Создание более совершенного варианта экспериментальной установки для непосредственного исследования теплопроводности, теплоемкости растворов при различных значениях параметров состояния.

2. Получение на основе экспериментальных исследований данных по теплопроводности и теплоемкости растворов изобутана с одностенными и многостенными углеродными нанотрубками в пределах изменения температуры (280-630)К и давления (0,101-49,01)МПа.

3. Установление зависимости теплопроводности и изобарной теплоемкости исследуемого чистого изобутана и его смесей с нанотрубками от температуры, давления, массовой концентрации одностенных и многостенных углеродных нанотрубок (до 2,5 %).

4. Получение эмпирических выражений, которые устанавливают связь между изменением температуры, давления, структурными особенностями образцов с их теплопроводностью и теплоемкостью.

5. Изучение переноса теплоты в рассматриваемых веществах (изобутан и одно-, многостенные углеродные нанотрубки) и связанных с ними процессов.

**Научная новизна работы заключается в следующем:**

1. Проведены опытные исследования по теплопроводности ( $\lambda$ ), теплоемкости ( $C_p$ ) образцов системы изобутан с добавкой одно- и многостенных углеродных нанотрубок (до 2,5%) в интервале изменения температуры (280-630)К и давлений (0,101-49,01)МПа.

2. Получены эмпирические и корреляционные зависимости  $\lambda = f(C_p)$ ,  $P-\lambda-T$ .

3. По итогам опытных исследований и с помощью аппроксимационных зависимостей были реализованы тепловые расчеты парогенераторов и холодильных установок.

**На защиту выносятся:**

1. Результаты, полученные по итогам опытов по теплопроводности, теплоемкости растворов (изобутан и одно-, многостенные углеродные нанотрубки) при изменении диапазона исследуемых температур (280-630)К и давлений (0,101–49,01)МПа, способствующие описанию математической модели.
2. Параметризация результатов расчета теплопроводности образцов (модель Максвелла и Дульнева), а также анализа процесса переноса тепла в них.
3. Аппроксимационные зависимости, служащие для расчета теплопроводности и теплоемкости подобных систем (изобутан с углеродными нанотрубками) в сравнительно большом интервале изменения параметров состояния.

**Основные методы научных исследований.** Для проведения научного исследования мы воспользовались методом цилиндрического бикалориметра для изучения теплопроводности, а теплоемкость исследована на установке М.М.Сафарова и его учеников.

**Теоретическая и практическая значимость работы:**

1. Составлены подробные таблицы ТФС технически важных веществ (растворов изобутана) при температурах от 293К и до 630К, а также изменении давления от 0,101МПа и до 49,01МПа, которые предложены для применения проектным организациям в различных химико-технологических процессах в теплоэнергетической и машиностроительной промышленности.
2. Результаты проведенных исследований по теплопроводности и теплоемкости растворов изобутана внедрены в Институте промышленности Министерства промышленности и новых технологий Республики Таджикистан при выполнении расчетов модельных реакторов и технологических процессов при создании холодильных установок, а результаты опытов представлены в качестве справочных.

3. Предложенные установки для измерения теплоемкости и теплопроводности растворов используются в научной и учебной лабораториях кафедры «Теплотехника и теплоэнергетика» Таджикского технического университета имени академика М.С.Осими, на кафедре общей физики Таджикского государственного педагогического университета имени С. Айни различными деятелями разных уровней науки при выполнении диссертационных работ и студентами при выполнении дипломных, курсовых, а также и лабораторных работ (акты внедрения прилагаются).

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность проведенных опытных работ обеспечивается:

-использованием испытанных и апробированных измерительных устройств, обладающих хорошей воспроизводимостью опытных результатов, а также и согласованностью опытных данных, как с литературными, так и с результатами расчетных исследований;

-согласием полученных данных с известными параметрами, которые получены по итогам независимых исследований с применением других методик физико-химического анализа;

-полным метрологическим снабжением опытных устройств, адекватным применением теории измерений, теории погрешностей, использованием традиционных устройств; повторимостью полученных результатов; соответствием расчетных данных теплопроводности и теплоемкости с экспериментальными данными;

-корректной математической моделью, отражающей физические процессы и проверенным математическим аппаратом, с помощью которого выполняется численное решение дифференциальных уравнений процесса тепло- и массопереноса;

**Личный вклад автора** заключается в установлении задач, выборе соответствующих методик при их решении, выявлении основных закономерностей протекающих процессов на момент исследования выбранных образцов, выполнении экспериментов на разработанных и апробированных

устройствах по получению данных по их теплоемкости и теплопроводности. Кроме того автор выполнил соответствующую обработку и анализ полученных экспериментальных данных по вышеназванным параметрам, на основе чего сформулировал основные выводы по объему работы и подготовил соответствующие статьи и тезисы к публикации.

Все результаты настоящей работы получены автором под руководством научного руководителя - заслуженного деятеля науки и техники Таджикистана, доктора технических наук, профессора М.М. Сафарова.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

1. Международная научно-техническая конференция студентов, молодых ученых и специалистов “Энергосберегающие технологии и эффективность в технических системах”, Тамбов,(2019);

2. Международной конференции “Фазовые переходы, критические и нелинейные явления в конденсированных средах”, Махачкала, (2019);

3. Rostoc-2020,Germany,(2020);

4. 3 Международная конференция СПТЭ-2020. Москва, НИУ-МЭИ, (2020);

5. IARIA, 2CFP, ICQNM-2020,15-19 November, 2020,Ispane,Valenciya, (2020);

6. Республиканская научно-теоретическая конференция на тему «Основы развития и перспективы химической науки в Республике Таджикистан», посвященная 60-летию химического факультета и памяти д.х.н., профессора, академика АН РТ Нуманова Ишанкула Усмановича (12-14 сентября 2020);

7. Республиканская научно-практическая конференция, посвященная «20 летию изучения и развития естественных и математических наук», ТНУ, (2020).

8. 3 Международный Косыгинский форум, Москва, (2021,);

9. Республиканская научно-практическая конференция (с международным участием), ТГУ им. акад. М.С. Осими (2021г).

10.12-я Международная теплофизическая школа, Тамбов, (2021г);

**По теме диссертации опубликовано 27 статей, из них 6 статей в журналах, включённых в список, рецензируемых ВАК при Президенте РФ, 20 тезисов докладов и один малый патент.**

**Соответствие паспорту специальности.** По тематике, методам исследования, предложенным новым научным положениям диссертация соответствует паспорту специальности научных работников 01.04.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника» в части п. 5 «Экспериментальные и теоретические исследования однофазной, свободной и вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и геометрических параметров теплопередающих поверхностей», в части п. 7 «Экспериментальные и теоретические исследования процессов совместного переноса тепла и массы в бинарных и многокомпонентных смесях веществ, включая химически реагирующие смеси», в части п. 9 «Разработка научных основ и создание методов интенсификации процессов тепло- и массообмена».

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, выводов, списка использованной литературы и приложения. Работа изложена на 185 страницах компьютерного текста, содержит 79 рисунков, 44 таблиц, 193 наименований использованной литературы, 11 страниц приложения.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** представлены основные положения работы: актуальность настоящего исследования, установленная цель работы, образцы исследования, задачи, научная новизна и практическая ценность.

**Первая глава** отведена обзору, соответствующему изложенной и разрабатываемой тематике, результатов теоретико-экспериментальных исследований *N*-бутана, изобутана, одно- и многостенных углеродных нанотрубок.

**Во второй главе** дано полное описание схем, принципов и методик работ, основных и вспомогательных элементов опытных устройств, применяемых для

соответствующих экспериментальных исследований. Также в главе изложена полная методика расчета погрешности измерений предложенных экспериментальных установках.

***В третьей главе*** приведены результаты экспериментов по теплопроводности и теплоемкости чистых н-бутана и изобутана, а также с некоторым содержанием одно- и многостенных углеродных нанотрубок в широкой области изменения параметров состояния (Т,Р).

***В четвертой главе*** представлена обработка полученных результатов экспериментов, соответствующие методы и способы, на основе которых и выполнена данная обработка.

***В приложении*** приведен табулированный вариант результатов сравнения экспериментов и расчетов, выполненных с помощью эмпирических уравнений, полученных на основе анализа и обработки опытных данных по методикам и способам, описанным в четвертой главе настоящей диссертации. Также в приложении работы приведены акты внедрения, подтверждающие возможность практической реализации теплофизических свойств рабочего вещества в широкой области изменения параметров состояния.

***Работа выполнена в Институте водных проблем, гидроэнергетики и экологии НАН Таджикистана.***

## ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИССЛЕДУЕМЫХ ВЕЩЕСТВ

### 1.1. Обзор литературных данных по теплофизическим свойствам хладагентов и наночастиц.

#### 1.1.1. Изобутан (2-метилпропан).

Информация о свойствах хладагента (изобутана), представлена в справочниках [1-15,156], в которых представлены данные по теплопроводности, плотности, теплоемкости, вязкости изобутана при различных параметрах состояния, включая и линию насыщения. Теплопроводность изобутана в жидком состоянии около линии насыщения представлена в таблице 1.1. Теплопроводность изобутана (2-метилпропан) в жидком и газовом состояниях приводятся в таблицах 1.2 - 1.3.

Таблица 1.1. Теплопроводность ( $\lambda \cdot 10^3$ , Вт/(м К)), жидкого изобутана (2-метил-пропан) вблизи линии насыщения.

T, К	120	140	160	180	200	220	240	250
$\lambda$	164	153	150	143	135	126	117	113
Погрешность данных составляет 3%.								

Таблица 1.2. Теплопроводность ( $\lambda \cdot 10^3$ , Вт/(м К)) изобутана при различных температурах и давлениях [1,13,156].

T, К	$\lambda \cdot 10^3$ , Вт/(м·К), $\lambda 10^3$ , Вт/(м К), при P, МПа							
	0,1	2,5	5	10	20	50	80	100
300	16,1	92,7	94,4	97,2	103	122	136	144
400	28,5	-	-	71,0	80,0	98,2	112	121
420	31,2	-	-	67,5	77,5	95,4	109	118
440	33,9	37,3	-	-	74,7	93,0	107	116
460	36,6	39,2	46,0	62,4	72,8	91,2	105	114
480	39,2	42,0	46,6	61,0	71,5	90,2	104	113
500	42,1	44,4	47,0	60,2	70,7	89,2	103	112
520	44,9	47,0	49,5	60,4	70,4	88,5	103	111
540	47,8	50,0	52,5	60,5	71,0	88,4	102	110
560	50,7	52,8	55,0	62,4	72,1	88,4	-	-
580	53,8	55,5	57,6	64,3	73,4	89,5	-	-
600	56,8	58,5	60,4	66,6	75,0	90,9	-	-



630	<b>61,4</b>	63,1	65,0	70,0	78,0	94,3	-	-
-----	-------------	------	------	------	------	------	---	---

Таблица 1.3. Теплопроводность ( $\lambda \cdot 10^4$ , Вт/(м К)) паров изобутана при атмосферном давлении на линии насыщения в зависимости от температуры [1,12-14,156].

T, К	300	360	440	500	580	630
$\lambda \cdot 10^4$ , Вт/(м· К)	16,1	23,2	33,9	42,1	53,8	61,4

Основные характеристики изобутана представлены в таблице 1.4.

Таблица 1.4. Основные характеристики изобутана при T=293 К [3,130].

Химическая формула	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>
Молярная масса $\mu$ , кг/моль	0,058
Плотность $\rho_4^{20}$ , кг/м <sup>3</sup>	560
Показатель преломления $n_D$	1,3514
Нормальная температура кипения T <sub>кип</sub> , К (при p=760 мм.рт.ст.)	261,3
Критическая температура T <sub>кр</sub> , К	408,1
Температура плавления T <sub>пл</sub> , К	113,8
Критическая плотность $\rho_{кр}$ , кг/м <sup>3</sup>	221
Критическое давление P <sub>кр</sub> , МПа.	3,53
Давление насыщенных паров P, МПа	4,962

Теплопроводность изобутана (2- метилпропан) при высоких давлениях измерена в двух работах в [9] при p=0,1-50 МПа и T=193-569К, в [13] p=0,1-100 МПа и T=298-630 К. Между результатами этих работ имеется расхождение до 10-12 %, погрешность составляет 4%. Следует сказать о том, что в работе [13] подробно изложены результаты опытов по теплопроводности изобутана в критической области на изотермах 410,1; 412,4; 416,1; 416,5; 447,3К.

### 1.1.2. н-Бутан (C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>)

В работе [5] показан обзор большого спектра работ, выполненных до 1976г., в которых приведены результаты опытного исследования теплопроводности н-бутана. В статье [8] автор поделился полученными результатами опытов при p=0.2÷70МПа и T= 298÷602К, для чего автор использовал метод коаксиальных

цилиндров. Автор подробно исследовал теплопроводность н-бутана в критической области (изотермы 428,8; 431,4; 436,0; 454,2; 480,0; 518,2К), основные характеристики которого сведены в таблице 1.5.

Таблица 1.5. Основные характеристики н-бутана при  $T=293\text{K}$ [3,130].

Химическая формула	$\text{C}_4\text{H}_{10}$
Молярная масса $\mu$ , кг/моль	0,058
Плотность $\rho_4^{20}$ , кг/м <sup>3</sup>	580
Показатель преломления $n_D$	1,3326
Нормальная температура кипения $T_{\text{кип}}$ , К (при $p=760$ мм.рт.ст.)	272,5
Критическая температура $T_{\text{кр}}$ , К	425,2
Температура плавления $T_{\text{пл}}$ , К	135,0
Критическая плотность $\rho_{\text{кр}}$ , кг/м <sup>3</sup>	228
Критическое давление $P_{\text{кр}}$ , МПа	3,68
Давление насыщенных паров $P$ , МПа	0,36

Таблица 1.6 при повышенных давлениях составлена по данным теплопроводности, приведенных в работе [8,156]. Результаты опытов работы [9] существенно отличаются от данных других исследователей и поэтому в работе [1] не приведены.

Таблица 1.6. Рекомендуемые значения теплопроводности ( $\lambda \cdot 10^3$ , Вт/(м К)) н-бутана при различных температурах и давлениях [9, 156].

Т, К	$\lambda \cdot 10^3$ , Вт/(м·К), $\lambda 10^3$ , Вт/(м К), при P, МПа							
	0,1	2	5	10	20	30	50	70
280	13,8	115	117	121	126	132	142	-
300	16,1	106	108	113	118	124	135	-
320	18,4	98,3	100	105	111	118	129	-
340	20,9	91,1	93	98,8	105	112	123	-
360	23,3	84,2	86,2	92,3	98,8	107	119	129
370	24,5	81,2	83,2	89,4	96,0	104	116	126
380	25,7	78,0	80,1	86,2	93,7	102	114	124
390	27,1	-	77,5	83,3	91,6	99,5	112	122

400	28,4	-	74,8	80,7	89,6	97,5	110	120
410	29,7	-	72,6	78,8	87,5	95,8	108	118
420	31,0	-	-	-	86,5	94,6	106	116
430	32,4	-	-	-	86,0	93,5	105	115
440	33,8	38,3	-	-	85,3	92,5	104	114
450	35,2	39,4	-	72,8	84,6	91,4	103	112
460	36,6	40,3	51,4	71,0	82,8	89,8	102	110
480	39,5	42,2	51,1	68,2	80,1	87,5	100	108
500	42,4	45,0	51,6	65,2	77,6	85,4	99	107
520	45,5	47,8	52,1	64,3	76,6	84,0	98,6	106
540	48,6	50,7	53,9	64,4	76,1	83,5	98,2	106
560	51,7	53,5	56,0	65,2	76,5	83,5	97,8	106
580	54,9	56,5	58,7	66,5	77,3	83,9	97,5	106
600	58,0	59,7	61,5	68,0	78,7	84,3	97,2	106

Значение теплопроводности газообразного н-бутана при  $p=0,1$  МПа вычислены по следующим уравнением (таблица 1.5) [1,156];

$$\frac{\lambda}{\lambda_{\tau=0,8}} = -0,441 + 1,1\tau + 0,924\tau^2 - 0,0456\tau^3 \quad (1.1)$$

Существующие данные опытных исследований разных авторов показаны в следующих координатах  $\left(\frac{\lambda}{\lambda_{\tau=0,8}}\right)$  от  $\tau = \frac{T}{T_{кр}}$  теплопроводности соединений данного ряда веществ при  $\tau = 0,8$  (это значение было выбрано с той целью, чтобы максимально охватить исследуемый ряд веществ). На приведенных координатах опытные данные для паров н-алканов, начиная от этана и заканчивая октадеканом с удовлетворительной оценкой укладываются на общей кривой, соответственно описываемый выражением (1.1).

Данное выражение (1.1) пригодно для расчета теплопроводности газов лишь в диапазоне  $\tau=0,6-2,2$ , которое нами и было применено при соответствующей обработке теплопроводности ряда веществ [62-93,156].

Исследование теплопроводности ряда веществ, которые входят в группу углеродистых газов, связано прежде всего получением возможности выполнить обобщение результатов опытов методом соответственных состояний. В 1983 году

представлены данные экспериментальных исследований теплофизиков из португалии [8] по теплопроводности н-бутана с помощью метода коаксиальных цилиндров в диапазоне изменения температур от 298 до 601 К и изменении давления опыта до 70 МПа, которые в свою очередь хорошо согласуются с данными справочника [1]. При сопоставлении было установлено, что данные справочника [1] с данными работы [8] совпадают с расхождением в 1-1,5%.

В работе [4] для выполнения обобщения результатов экспериментов по изучению теплопроводности паров н-алканов при достаточно большом интервале изменения молекулярных масс (от 30 до 254) был успешно применен метод соответственных состояний. Данный способ способствовал также успешному определению теплопроводности разных групп веществ одного и того же гомологического ряда. Таким образом, был упразднен и анализ температурной зависимости теплопроводности веществ [16-39].

Таким образом, обобщение представленное в работе [16] позволило заложить основу создания таблиц рекомендуемых данных по теплопроводности паров алканов при  $p = 0,1$  МПа, также как и других работ, в том числе в обобщениях наших работ (Сафаров М.М., Зарипова М.А., Гуломов М.М., Тиллоева Т.Р. и др.) [17-27,36,40].

В таблице 1.7. приведены значения теплопроводности жидкого н-бутана при  $p=0,1$  МПа, полученные автором работы [10].

Таблица 1.7. Теплопроводность ( $\lambda \cdot 10^3$  Вт/(м·К)) жидкого н-бутана при  $p=0,1$  МПа[10].

Т, К	$\lambda \cdot 10^3$ Вт/(м·К)	Т, К	$\lambda \cdot 10^3$ Вт/(м·К)	Т, К	$\lambda \cdot 10^3$ Вт/(м·К)	Т, К	$\lambda \cdot 10^3$ Вт/(м·К)
140	178	180	161	220	141	260	121
160	172	200	151	240	131	270	114

Погрешность экспериментальных данных теплопроводности н-бутана при  $p = 0,1$  МПа равна 2-3%, а при повышенных давлениях составляет 4%.

### 1.1.3. Основные характеристики углеродных нанотрубок

Главные показатели углеродных нанотрубок, предоставленных нам из г. Тамбова (ТГТУ) приведены в таблице 1.8 [41-46].

Таблица 1.8. Характеристики одностенных углеродных нанотрубок.

Характеристики	Объем
Наружный диаметр, nm	10÷60
Внутренний диаметр, nm	10÷20
Длина, $\mu\text{m}$	2 и более
Чистота (%), включая аморфный углерод	от 1,50.3÷0.5
Массовая плотность, $\text{г/м}^3$	0.4÷0.5
Удельная геометрическая поверхность, А	120 и более
Термическая стабильность, К	До 700
Средний объем поры, $\text{мм}^3$	0,22
Средний размер поры, А	70

### 1.2. Математическое моделирование тепловых процессов в углеродных нанотрубках и фуллеренах.

В работе [45] показаны как фундаментальные, так и прикладные задачи, посвященные использованию метода элементарных балансов к осуществлению соответственных расчетов нестационарных температурных полей наноструктур. Также изложена принципиальная возможность применения указанного способа, используемого для создания и разработки математических моделей тепловых процессов в наноструктурах и все особенности, связанные с созданием расчетного алгоритма и программного обеспечения, способствующего автоматизации процесса решения задач и выполнения комплексного анализа нестационарных температурных полей данного наноматериала. Выполнены соответствующие мероприятия по налізу результатов экспериментов, на основе которых проводятся оценочные мероприятия касательно работоспособности математического, алгоритмического и программного обеспечения.

В современной нанотехнологии наибольшее применение и развитие получили углеродные нанотрубки (УНТ) и изделия, изготовленные на их основе. Таким образом, в результате разработки новых наноструктурных материалов [47-49] все большее значение приобретает создание таких математических моделей, которые надежно бы способствовали выполнить полноценный анализ нестационарных тепловых процессов, представляющих собой один из ключевых параметров, которые выступают гарантом бесперебойного функционирования датчиков и устройств прецизионных измерительных систем. Результаты экспериментов показали, что континуальные теории сплошных сред значительно эффективнее при характеризовании макро- и микросистем, а также и при соответствующих инженерных расчетах технически значимых устройств, принимающих во внимание многообразие возмущающих факторов. Таким образом, возникает не менее важный вопрос о разработке таких методов, с помощью которых можно реализовать расчет соответствующих температурных полей на наноуровне [45].

В работах [47,50] описана возможность реализации метода элементарных балансов (МЭБ) [45,50,53] для выполнения расчета нестационарных температурных полей в наноструктурированных материалах. Дальнейшее развитие этого метода связано, преимущественно с углеродными нанотрубками, фуллеренами и др. с учетом их специфики.

В основу МЭБ [45, 50] легли законы о сохранении энергии, теплопроводности Фурье, Ньютона о конвективном теплообмене, лучистого теплообмена Стефана-Больцмана. Его сущность состоит из (для твердых веществ) [45, 50] разделения макро- или микроструктур на значительно упрощенные объемы, т.е. элементы с температурой  $T_i(t), i=1,2,\dots, N$  и тепловым источником мощностью  $Q_i$ .

Основываясь на законах теплообмена и уравнения тепловых балансов для вычисления температурного поля был предложен следующий алгоритм [45].

$$T_i(t + \Delta t) = \left[ 1 - \frac{\Delta t}{c_i} (\sum_{j=1}^N q_{ij} + q_{ic}) \right] T_i + \frac{\Delta t}{c_i} (\sum_{j=1}^N q_{ij} T_j + q_{ic} T_{ci} + Q_i), \quad (1.2)$$

где  $T_i(t)$ ,  $T_i(t + \Delta t)$  — температура  $i$ -го элемента в настоящий и последующий моменты времени;  $C_i$  ( $i = 1, \dots, M$ ) — теплоемкость  $i$ -го элемента;  $q_{ij}$  — теплопроводность среди элементов  $i, j$  ( $j = 1, \dots, N$ );  $q_{ic}$  — теплопроводность между  $i$ -м элементом и окружающей средой;  $T_{ci}$  — температура окружающей среды;  $Q_i$  — мощность источника теплоты;  $M$  — количество элементов;  $N$  — количество элементов, состоящих в тепловом контакте с  $i$ -м элементом;  $\Delta t$  — шаг расчета.

В некоторых случаях весьма уместным является применение традиционных способов составления уравнений тепловых балансов в качестве обыкновенных дифференциальных уравнений, а не разностных соотношений:

$$C_i \frac{dT_i}{dt} + \sum_{j=1}^M q_{ij} (T_i - T_j) + q_{ic} (T_i - T_c) = Q_i,$$

$$i=1, \dots, N. \quad (1.3)$$

Подобного рода уравнения отвечают разностному алгоритму (1.3), и представляют собой наиболее удобный способ вычислений при наименьших элементарных объемах (от единиц до десятков) и соответствующего анализа по тепловому состоянию рассматриваемых структур. Наряду с этим, в изучаемых материалах процесс теплообмена рассматривается только теплопроводностью. Наноструктуры представляют собой совокупность наночастиц (молекул, ионов, атомов), которые постоянно движутся, а среди них преобладают силы обоюдного притяжения и отталкивания. Благодаря этим силам и возникают колебания наночастиц, амплитуда которых представляет собой меру температуры, которая также повышается с ее ростом. В соответствии с рекомендациями [45, 46], для первого приближения возможно использование алгоритмов и уравнений (1.2) и (1.3) МЭБ на наноуровне, поскольку МЭБ является численным методом, его алгоритм опирается на основные [50] энергетические выражения, подчиняющиеся законам сохранения энергии, теплообмена Фурье, Стефана-Больцмана, Ньютона.

Однако следует учитывать и реальную структуру наночастиц при выполнении расчетов температурных полей, теплофизических параметров, тепловых мощностей, а также сокращению времени прохождения данных процессов до наноуровня.

Еще одна из особенностей МЭБ заключается в том, что его применение для расчета температурных полей в наноструктурных материалах способствует значительному уменьшению теплопроводимостей в окружающую среду относительно внутренних межчастичных теплопроводимостей по сравнению со своими макрочастицами. Данная особенность позволяет исключить теплообмен с окружающей средой в расчетах температурных полей в них.

Изучаемые наноструктуры являются углеродные нанотрубки (УНТ) [45, 48-50], которые выполнены из графитовой гексагональной сетки, свернутой в виде цилиндра, а их диаметр колеблется от долей нанометров до микрометра. Эти трубки бывают как с открытыми торцами, так и с полусферическими головками, представляющие собой полмолекулы фуллерена [45,48-50].

Графитовая плоскость, или так называемая поверхность образованная правильными шестиугольниками с атомами углерода на своих вершинах свернута в цилиндр с правильной полостью, собственно и называется нанотрубкой. Взаимоориентация гексагональной сетки графита, а также и продольной оси нанотрубки являются важнейшими параметрами, дающими описание соответствующих характеристик данной категории материалов, называемой хиральностью.

Хиральность нанотрубок [43,45,48-52] показана несколькими индексами ( $m$ ,  $n$ ), указывающие координаты вершин шестиугольника, который должен совпадать с другим шестиугольником, оказавшимся в начале данной координаты после сварачивания (рис. 1.1). Другим способом, которым обозначают хиральность является установление угла  $\alpha$  между направлением сварачивания нанотрубки и направлением соединения шестиугольников.



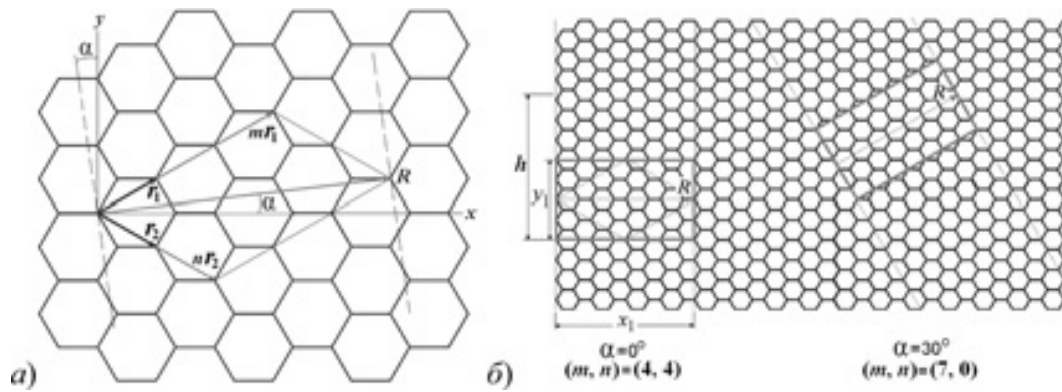


Рисунок 1.1. Хиральность УНТ: а—определение направления  $R$  закручивания нанотрубок; б—плоские развертки нанотрубок с различными хиральностями

Относительно приемлемым методом, который используется для сворачивания нанотрубок, является соединение многоугольника (шестиугольника)  $(m, n)$  с началом координат. Данный способ способствует сохранению структуры. Этим направлениям соответствуют, в частности, углы  $\alpha = 0^\circ$  и  $\alpha = 30^\circ$  (рис. 1.1). Эти конфигурации соответствуют хиральностям  $(m, m)$  и  $(m, 0)$ , которые исследуются далее.

Чтобы сравнить степень влияния хиральности УНТ на какие-либо свойства (теплофизические, термодинамические и т.д.), следует для сравнения выбрать одинаковые по геометрическим показателям нанотрубки. Самыми подходящими по диаметрам считаются нанотрубки с наименьшими хиральностями  $(m_1, m_1) = (4, 4)$  и  $(m_2, 0) = (7, 0)$  или нанотрубки  $(m_1, m_1) = (15, 15)$  и  $(m_2, 0) = (26, 0)$ . В углеродных нанотрубках тепло также распространяется от более нагретых к менее нагретым частичкам по цилиндрической поверхности касательно ее хиральности. В соответствии с законом Фурье вводим  $\lambda_z$ , т.е. эффективную теплопроводность. Представим, что в рассматриваемой группе наночастиц (частный случай - одна частица) существует тепловой источник с заданной мощностью  $Q \text{ [нВт/нм}^2\text{]} = \text{const}$  в группе, например с одного торца. Начиная от источника тепло начинает переходить к менее нагретым частям по ее цилиндрической поверхности. С истечением некоторого времени среди самой нагретой и самой отдаленной частицей относительно источника устанавливается постоянная разница их температур  $\Delta T$ .

Таким образом, значение  $\lambda_3$  для порошка (или другой наноструктуры) согласно [45] с учетом градиента температуры  $\Delta T/\Delta l$  следует записать в виде:

$$\lambda_3 = Q\Delta l / \Delta T, \quad (1.4)$$

где  $\Delta l$  — наименьшее расстояние в отношении направления градиента среди наночастиц с наибольшей и наименьшей температурой. Разность температур  $\Delta T$  вычисляется программным комплексом МЭБ согласно алгоритму (1.3). Например, для УНТ с хиральностями  $(m_1, m_1)$  и  $(m_2, 0)$  выражение (1.4) примет вид:

$$\lambda_{31} = \frac{Q\Delta l_1}{\Delta T_1}; \quad \Delta l_1 = \sqrt{3}m_1 d_0 \sqrt{k_1^2 \pi^2 + \frac{3}{\pi}}; \quad (1.5)$$

$$\lambda_{32} = \frac{Q\Delta l_2}{\Delta T_2}; \quad \Delta l_2 = \sqrt{3}d_0 \sqrt{k_2^2 m_1^2 \pi^2 + \frac{m_2^2}{\pi}}. \quad (1.6)$$

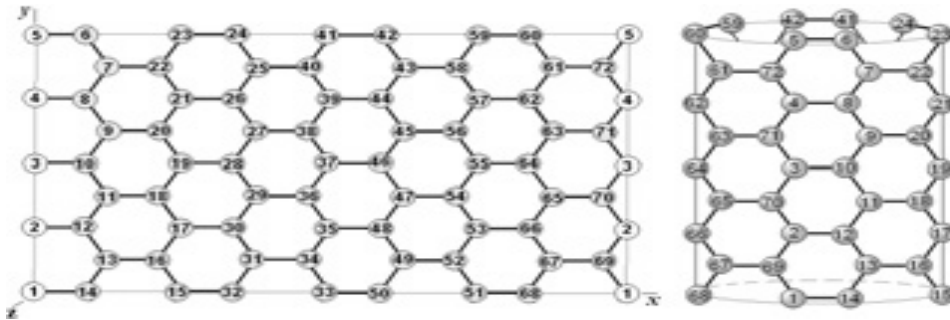


Рисунок 1.2. Плоская развертка и пространственная структура углеродной нанотрубки минимальной конфигурации:  $(m,m)=(4,4)$

Путем применения коэффициента эффективной теплопроводности и метода элементарных балансов становится возможным расчет теплофизических характеристик практически любой наноструктуры, для чего решается обратная задача теплопроводности:

- Путем использования МЭБ вычисляется нестационарное температурное поле, распределенное в наноструктуре и находится ее изменение  $\Delta T$ ;
- Путем применения значения  $Q = \text{const}$  (мощность источника тепла) и геометрических составляющих.

Таким образом, массив из УНТ способен отводить тепло практически от любых тел и различного размера, например, микросхема, микромеханический чип или наночип [42].

Аналогично медным радиаторам матрица из нанотрубок очень хорошо рассеивает теплоту и даже эффективнее, чем радиатор. Ко всему она гораздо легче и хорошо поддается изгибам во всех направлениях.

В указанных наноструктурных материалах изучение течения тепловых процессов требуется для установления характеристик и параметров, наиболее приемлемых для выбора и создания оптимальных радиаторов с заданными характеристиками, способными обеспечить максимальный отвод тепла от микро- и наночипов. Чтобы провести соответствующий анализ, разрабатываются и строятся специальные тепловые модели подобных структур (наноструктур), а также математические модели, созданные на основе алгоритмов и формул (1.2)-(1.6), поддерживаются программным обеспечением, комплексом компьютерных исследований и соответствующими анализами с последующим выбором пакета требуемых параметров.

Подобная модель структуры проиллюстрирована на рисунке 1.2, которая основана на методике элементарных балансов. Предложенные модели с использованием программного обеспечения позволяют рассчитать в наноструктурах нестационарные неоднородные температурные поля, эффективную теплопроводность и др. Исходными принимают данные геометрических и теплофизических свойств и входные данные алгоритма метода элементарных балансов (МЭБ).

Для того, чтобы реализовать эксперимент на компьютере и выполнить соответствующий анализ требуется поставить следующие задачи: выбор УНТ с требуемыми параметрами (хиральностью, геометрическими показателями и др.), которые способны создавать максимально эффективный теплоотвод от нано- и микрочипов с электрическими элементами. Воздействие температурное, в данном случае, оказывается за счет теплового источника, находящегося в одной наночастице, расположенной в относительно крайней точке структуры. Мощность

источника принята постоянной. Подобное размещение теплового источника способствует наибольшему перепаду температуры, что помогает установлению градиента температуры и соответственно эффективной теплопроводности. Затем выполняется вычисление температурного поля изучаемой наноразмерной структуры с введением других показателей (геометрических, теплофизических и т.д.), вычисляются конечные показатели (максимальные и минимальные температуры, ее перепады, эффективная теплопроводность и т.п.). Чтобы выполнить сравнительный анализ, подбираются углеродные нанотрубки с хиральностями (4, 4) и (7, 0), с близкими размерами по длине и диаметром. Показано, что от их хиральности зависит разница в достигнутых температурах и ее перепадах:

- при хиральности (4,4)  $T_{\max} = 19^{\circ}\text{C}$  за 2пс,  $\Delta T = 8^{\circ}\text{C}$ ;

- при хиральности (7,0)  $T_{\max} = 23^{\circ}\text{C}$  за 2пс,  $\Delta T = 12^{\circ}\text{C}$ .

На рисунке 1.3. наглядно представлено максимальное изменение температуры в зависимости от относительной теплопроводности углерода  $\Delta T_{\max} = f(\lambda/\lambda_{\text{ном}})$  для углеродных нанотрубок с разными хиральностями (4,4 и 7,0) и сферобразного фуллерена.

Согласно рисунку при увеличении относительной теплопроводности  $\lambda/\lambda_{\text{ном}}$  изменение температуры подчиняется нелинейному закону. Вследствие того, что максимальная разность температур меньше, а теплопроводность больше, то соответственно самое высокое значение теплопроводности при всех показателях  $\lambda/\lambda_{\text{ном}}$  имеет сферический фуллерен, меньшей теплопроводностью обладает УНТ с хиральностью (4,4), и наименьшей теплопроводностью обладает УНТ хиральности (7,0). Отсюда вытекает, что эффективнее всего для радиаторов будет применение УНТ с хиральностью (m, m), а не УНТ с хиральностью (m, 0).

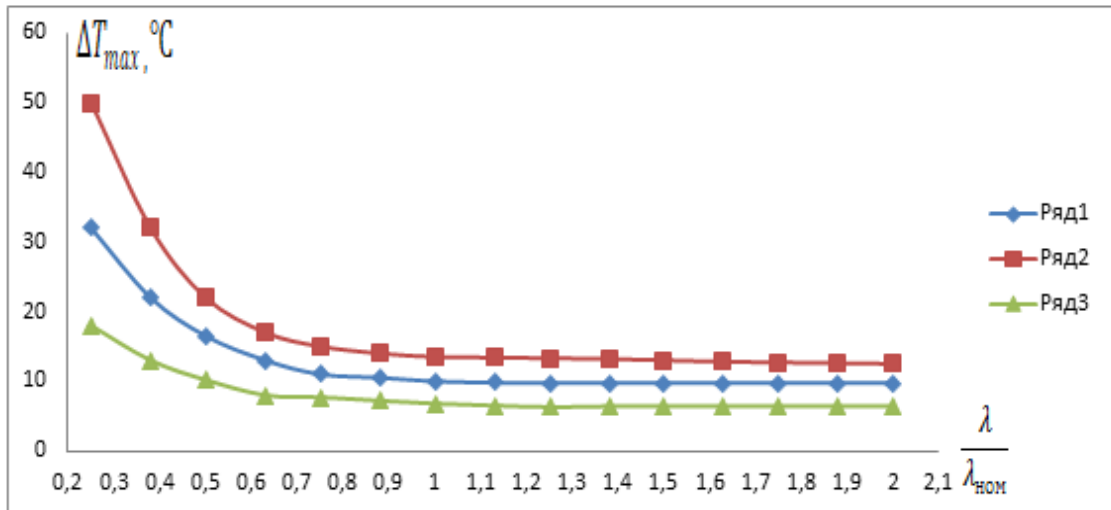


Рисунок 1.3. Зависимость  $\Delta T_{max} = f(\lambda/\lambda_{ном})$ : 1—УНТ хиральности (4,4); 2—УНТ хиральности (7,0); 3—сферообразный фуллерен

Скорость, с которой происходит нарастание температуры  $T(t)$ , в основном зависит от хиральности нанотрубок, а также от относительной теплопроводности  $\lambda/\lambda_{ном}$  и лишь на первом этапе переходных процессов к тому же при малых значениях хиральности УНТ, т.е. до  $(m, m) = (4,4)$ .

После того как все переходные процессы завершаться и будет установлен постоянный режим, то даже и при очень больших хиральностях скорость повышения температуры наночастиц переходит в практически не зависимое состояние от хиральности нанотрубок и даже от относительно теплопроводности.

Учитывая все сказанное, один из самых значимых параметров, которое требует изучения его непосредственного влияния на  $\lambda$ , является хиральность нанотрубок.

На рисунке 1.4 изображены результаты проведенных экспериментальных исследований на компьютере в виде графика зависимости  $\lambda/\lambda_{ном}$  от материала УНТ. Также не мало важным является исследование изменение эффективной теплопроводности в зависимости от влияния длины УНТ с заданной хиральностью.

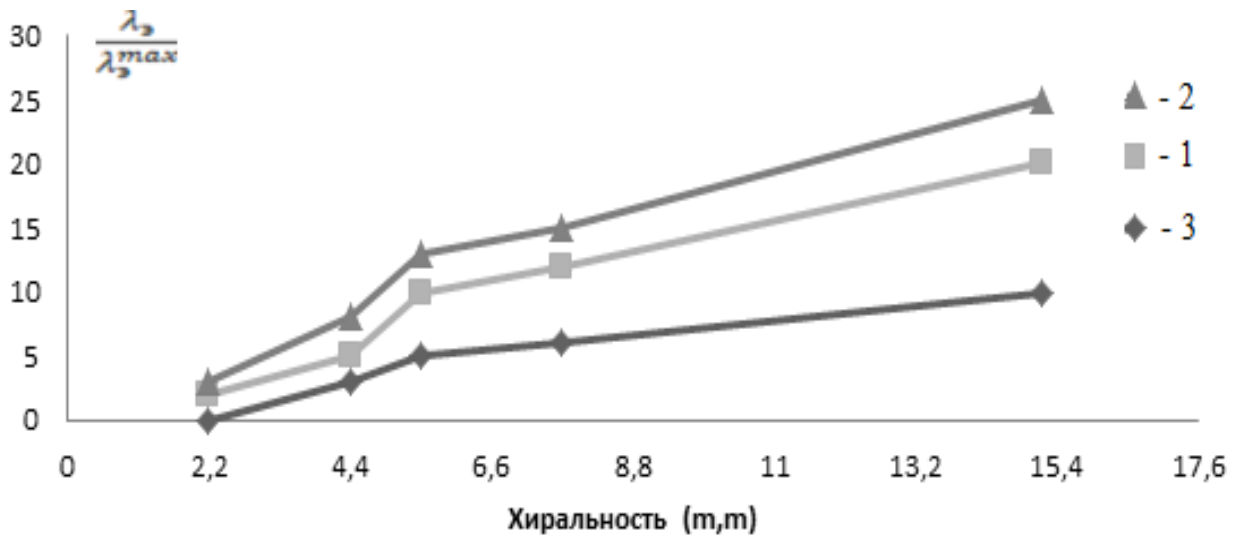


Рисунок 1.4. Зависимости эффективной теплопроводности от хиральности УНТ.

На рисунке 1.5 графически изображены результаты экспериментальных исследований на компьютере в виде зависимости эффективной теплопроводности от относительной длины УНТ с хиральностью (4,4) и при различных значениях  $\lambda/\lambda_{\text{ном}}$  материала УНТ. Согласно рисунку показатель эффективной теплопроводности от длины УНТ имеет линейную зависимость. Было установлено, что эффективная теплопроводность в значительной степени зависит от теплопроводности материала нанотрубки.

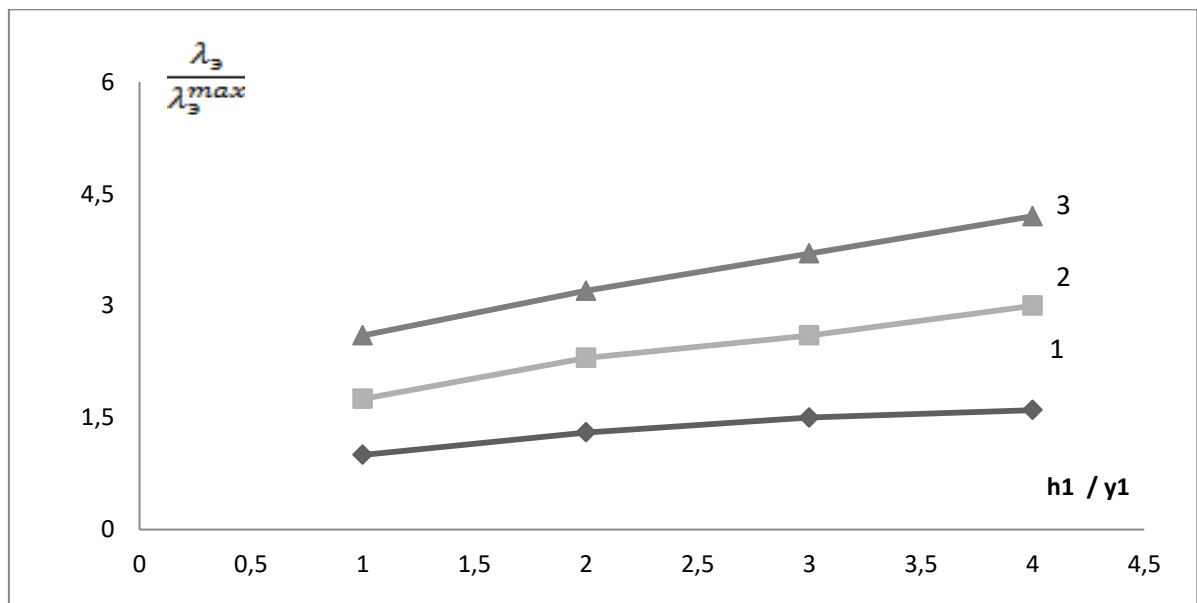


Рисунок 1.5. Зависимость эффективной теплопроводности от длины УНТ.

Анализ рисунка 1.6 показал что:

1. Наиболее рациональным является применение нанотрубок с хиральностью  $(m, m)$  и углом  $\alpha = 0^\circ$ , относительно тех нанотрубок, которые имеют хиральность  $(m, 0)$  с углом  $\alpha = 30^\circ$ . Например, для нанотрубок с хиральностью  $(m, m) = (4, 4)$  эффективная теплопроводность на 53 % больше, чем у нанотрубок с хиральностью  $(m, 0) = (7, 0)$  (средние столбики 4 и 5 диаграммы на рисунке 1.6).

2. За счет того, что торцы нанотрубок закрыты полусферическими молекулами фуллеренов это не столь значимо приводит к росту (на 3%) эффективной теплопроводности нанотрубок (средние столбики 8 и 9 диаграммы на рисунке 1.6). При росте длины УНТ ( $h > y_1$ ) это влияние также снижается.

3. Установлено, что значительнее всего на показатель эффективной теплопроводности относительно изменения длины нанотрубок оказывает изменение ее хиральности.

Таким образом, рост значения хиральности нанотрубки в 3 раза от  $(5, 5)$  до  $(15, 15)$  повышает значение  $\lambda_3$  в 2 раза (средние столбики 8 и 11 диаграммы на рисунке 1.6), а применение трубки длиной в 4 раза больше предыдущей повышает значение  $\lambda_3$  в 1,8 раза (средние столбики 5 и 7 диаграммы на рисунке 1.6).

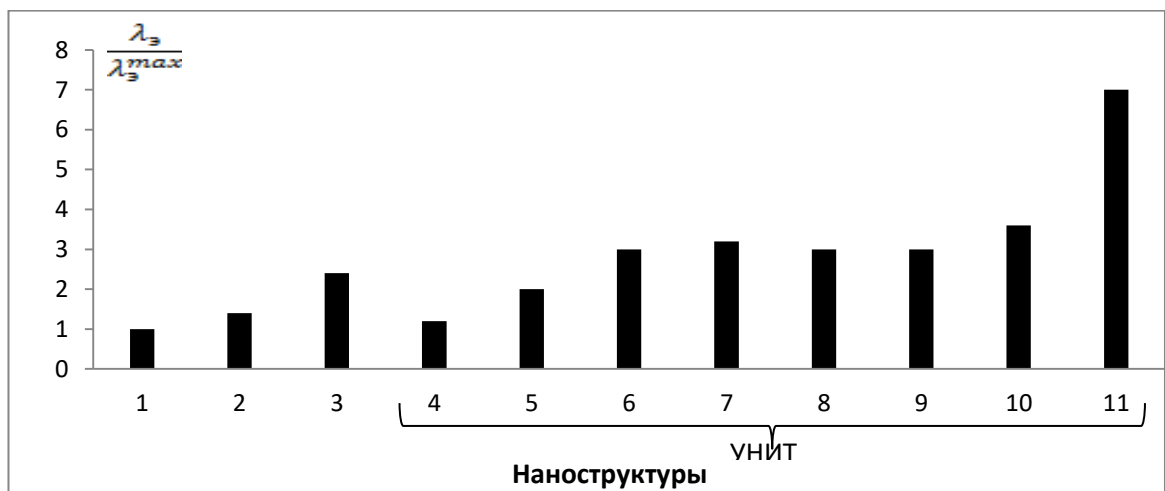


Рисунок 1.6. Диаграмма эффективных теплопроводностей  $\lambda_3/\lambda_3^{\max}$  для наноструктур:—1 алмаз; 2—графит; 3—фуллерен; 4—открытая УНТ  $(m,0)=(7,0)$ , длина  $h=y_1$ ;5 открытая УНТ  $(m,m)=(4,4)$ , длина  $h=y_1$ ; 6—открытая УНТ  $(m,m)=(4,4)$ , длина  $h=2y_1$ ; 7—открытая УНТ  $(m,m) = (4,4)$ , длина  $h=4y_1$ ;8—открытая УНТ  $(m,m)=(5,5)$ , длина  $h=y_1$ ;9—полуоткрытая УНТ $(m,m)= (5,5)$ ,

длина  $h=y_1;10$ —открытая УНТ(m,m)=(7,7), длина  $h=y_{1,11}$ —открытая УНТ (m,m) = (15,15), длина  $h=y_1$

4. Установлено, что при больших значениях длины и хиральности УНТ, эффективная теплопроводность практически в 8 раз больше, чем у алмаза.

Свойства самых простых форм углерода, выполненных в виде нанотрубок имеют существенные различия от характеристик тех же алмазов и графитов, структура которых очень схожа со структурой УНТ. Главной причиной таких различий служит тот факт, что связи у первых являются ортогональными, а у фуллеренов с нанотрубками из-за отсутствия кривизны и наличия сферической и цилиндрической форм эти связи не ортогональны.

Монография А.С. Дмитриева [44] представляет собой одну из самых первых научных работ в мировой практике, в которой были рассмотрены вопросы по тепловым процессам в наноструктурах. Основное внимание было направлено на исследования границ между фазами, размерным эффектам, от которых и зависят такие аномалии в них. Также дана оценка таких областей науки как нанотермогидродинамика и нанотермоэлектричество.

Воспользовавшись фрактальными теориями [42,48], на основе которых даны описания случайных и хаотичных процессов возникновения кластеров и поляризации наночастиц в мезомасштабах. Авторы [44,48], основываясь на данных теориях в своей работе представили фрактальную модель эффективной теплопроводности наножидкостей. Предложенная модель основана на моделях Максвелла, описывающих систему из множества компонентов, которые включают теплопроводность наночастиц в виде случайных кластеров  $\lambda_c(r)$  и имеет форму случайной функции распределения  $f(r)$ :

$$\lambda_{eff} = \lambda_m \frac{(1-\varphi)+3\varphi \int_0^{\infty} \lambda_c(r)f(r)/[\lambda_c(r)+2\lambda_m]dr}{(1-\varphi)+3\varphi \int_0^{\infty} \lambda_m f(r)/[\lambda_c(r)+2\lambda_m]dr}. \quad (1.7)$$

Распределение наночастиц по размеру можно описать следующей функциональной зависимостью (стандарное отклонение  $\sigma=1,5$ ).

$$f(r) = [\sqrt{2\pi} \ln \sigma r]^{-1} \exp - [\ln \left( \frac{r}{r_p} \right)] / [\sqrt{2\pi} \ln \sigma]^2 \quad (1.8)$$



где  $r$ ,  $r_p$  – радиальная координата и средний радиус наночастиц. Применение данной модели в отношении исследования наночастиц CuO, распределенных в деионизированной воде, способствует получению данных, хорошо согласующихся с опытными при выполнении условия  $\varphi < 0.5\%$ .

В работе [44] описана обобщающая модель с относительно большой температурной зависимостью, которая выглядит следующим образом:

$$\lambda_{\text{eff}} = \lambda_m + A\lambda_m [2k_b T / (\pi\eta d_p^2)] \{ \varphi r_b / [\lambda_m (1 - \varphi) r_p] \}, \quad (1.9)$$

где  $A$  – постоянная;  $\eta$  – динамическая вязкость;  $d_p$  – диаметр наночастицы;  $r_b$  – радиус слоя около наночастиц. Однако, необходимо отметить, что согласно анализу формула (1.9), является непригодной для больших концентраций наночастиц.

Данный факт можно охарактеризовать тем, что экспериментальные данные могут не совпадать с расчетными по причине того, что теория Максвелла предполагает полную перемешанность частиц в жидкости, т.е. диспергированность. Однако, как показали многочисленные эксперименты в структуре наночастиц возникает их линейная агрегация, которые выстраиваются в цепочки, значительным образом влияющих на значения теплопроводности материала. Таким образом, с применением многоуровневых моделей эффективной теории теплопроводности было установлено, что образование подобных цепочек в наножидкости способствует значительному повышению ее теплопроводности [59-62]. Благодаря этой модели результаты опытов хорошо согласовались с расчетными в модели фрактальных кластеров.

Согласно опытным данным повышение теплопроводности в наножидкостях описывается уравнением Максвелла-Нана:

$$\frac{\lambda_{\text{eff}}}{\lambda_m} = 1 + 3\varphi. \quad (1.10)$$

Согласно расчетам по данному выражению, было установлено, что добавление 0,1% наночастиц в жидкость приводит к росту эффективной теплопроводности на 0,3%. Различные, выявляемые аномалии в теплопроводности наножидкостей, скорее всего зависят от того, что с применением теорий Максвелла, в них не учитываются кластеризация частиц и выстраивания их в

цепочки. Следует отметить то, что выражение (1.10) для значительно больших аспектных соотношений не имеет совпадения с реальными размерами этих цепочек. Наножидкости основанные на нанотрубках, несмотря на большое аспектное соотношение, в основном граничное термическое сопротивление среди нанотрубок и жидкостью, не принимается во внимание, что в конечном итоге становится следствием высоких теоретических значений теплопроводности.

Авторами [44] изучена степень воздействия размеров наночастиц на теплопроводную способность наножидкости, состоящую из воды с наночастицами  $\text{SiO}_2$ . Способ рентгеновского рассеяния был успешно использован для установления распределения наночастиц по размерам, а также определена линейная корреляция средних фракций наночастиц и самой теплопроводности. Выполненные эксперименты показали противоположность относительно модели упорядоченного слоя в жидкости вблизи наночастиц и их броуновского движения, а результаты удовлетворительно характеризуются классической моделью эффективной среды, в которой учитывается граничное термосопротивление на межфазной границе (частица-жидкость).

Наножидкость, в которой наночастицы обладают наименьшими размерами, но с тем же объемом имеют относительно большую площадь соприкосновения с жидкой фазой. Фактическая теплопроводность подобной наножидкости с наименьшими частицами гораздо меньше, поскольку с ростом количества границ соприкосновения частицы с жидкостью увеличивается граничное термосопротивление. Данное явление заметнее всего проявляется относительно суспензий из нанотрубок, в которых наблюдается относительно большое термосопротивление.

Использование модели Максвелла-Нана [44] на практике показывает удовлетворительное согласие данных с экспериментальными, которое отрицает наличие аномальности теплопроводности наножидкостей.

Применение классической модели Максвелла при численном определении теплопроводности суспензий при условии, что наночастицы сферические и хорошо перемешаны, приводит к следующему выражению:

$$\lambda_{\text{eff}}/\lambda_m = \frac{\lambda_p + 2\lambda_m + 2\varphi(\lambda_p - \lambda_m)}{\lambda_p + 2\lambda_m - \varphi(\lambda_p - \lambda_m)}. \quad (1.11)$$

Следует указать, что по условиям данной модели теплопроводность наножидкости не имеет зависимости ни от температуры и ни от размеров наночастиц. Кроме того, при условии  $\lambda_p \ll \lambda_m \ll 1$  имеем линейное выражение вида  $\lambda_{\text{eff}}/\lambda_m \sim 1 + 3\varphi$ . Несмотря на это некоторые параметры не совпадают с предсказаниями модели Максвелла, а именно:

- весома зависимость теплопроводности от количества добавляемых наночастиц в раствор, т.е. нелинейная зависимость  $\lambda_{\text{eff}}/\lambda_m = (f)\varphi$  ;
- зависимость теплопроводности от формы и размера добавляемых в изучаемую систему наночастиц  $\lambda_{\text{eff}}/\lambda_m = f(d, a)$
- зависимость данного параметра от температуры системы  $\lambda_{\text{eff}}/\lambda_m = f(T)$ .

В процессе выяснения соответствующих механизмов были предложены новые гипотезы и модели, описывающие эти жидкости:

- возникновение броуновского движения наночастиц, а также и наличие микроконвекции, способствующие интенсификации переноса энергии;
- протекание кластеризационных и агломерационных явлений наночастиц в базовой жидкости, а также перколяции и повышения переноса тепла вдоль кластеров;
- образование вокруг наночастицы, свойственного ей, высокоупорядоченного слоя, обладающего значительной теплопроводностью, который приводит к росту объема наночастиц в базовой жидкости.

### **Выводы по первой главе**

1. Представлены экспериментально-теоретические исследования различных авторов в направлении изучения теплопроводности опытных веществ и их основные характеристики.
2. В данной главе показана возможность использования МЭБ при создании моделей для охарактеризования тепловых процессов.

3. По итогам опытов было установлено, что разработка модели требует знания структуры и процессов ее перехода от макро- на наноуровень, от которого зависят теплофизические характеристики, мощность тепловыделения и время прохождения процессов и т.д.

4. Были разработаны и предложены алгоритмы, позволяющие обеспечить в автоматизированном режиме как решение задач, так и анализ нестационарных температурных полей в рассматриваемых наноструктурах. Выполнен ряд экспериментов на компьютере, по результатам которых было установлено, что предложенная модель в математическом, алгоритмическом и программном плане удовлетворяет требования.

## **ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ, ТЕПЛОЕМКОСТИ РАСТВОРОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ДАВЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ**

### **2.1. Экспериментальная установка для измерения теплопроводности жидкостей и растворов при различных давлениях и температурах**

Теплопроводность веществ и материалов, в основном исследуется двумя методами – стационарного и нестационарного теплового режима [3,17,94-99].

Изучение теплопроводности растворов, главным образом, выполняется на основе экспериментальных исследований с помощью стационарных методов и методик, представленных в [3, 93, 100, 101, 103, 104]. Стационарные методы не лишены таких недостатков как продолжительность эксперимента и сложность конструкции установки, что ограничивает их применение на практике. Наоборот, намного эффективнее оказались нестационарные методы, предложенные в свое время А.В. Лыковым [102], Г.М. Кондратьевым [105,106], А.Ф. Чудновским [94], И.Ф. Голубевым [62] и другими, из числа которых чаще всего используют методы регулярного теплового режима первого рода, (Г.М. Кондратьев [106]) и достаточно широко применяются в процессах изучения теплопроводности различных веществ.

Эти методы главным образом зарекомендовали себя тем, что для их реализации не требуется какого-либо сложного оснащения опытных устройств, к тому же не требуется и длительного времени для проведения опыта. Мы также воспользовавшись этим методом собрали опытное устройство для исследования теплопроводности образцов, описание которой представлено ниже.

Разработанная таджикской группой исследователей под руководством профессоров Х. Маджидова и М.М. Сафарова, представляющих общую школу теплофизиков, была разработана и собрана установка для проведения экспериментов по изучению теплопроводности растворов, а также паров жидкостей с содержанием углерода. За основу ее создания установки выбран метод цилиндрического бикалориметра регулярного теплового режима первого

рода, позволяющей изменять температуру опыта [17, 62,106], которая изображена на рисунке 2.1. Следует отметить тот факт, что в Таджикском государственном педагогическом университете имени Т.Г.Шевченко (С. Айни) в лаборатории теплофизики Физического факультета за период научной деятельности этой школы с охватом конца 20-го и начала 21 века были проведены исследования теплопроводности целого комплекса различных технических веществ и материалов, изложенных в таких работах как [27,36,63-65,78-80]-ацетаты, простые эфиры, кетоны, фталаты; [23,66-69] - активные катализаторы на основе гранулированного пористого оксида алюминия; [71-73]- жидкокристаллические вещества; [75,76] – особо чистый алюминий; [17, 83-87, 90]- гидразинзамешенные растворы и их водные смеси; [18-20, 88] - растительные масла и их растворы; [22, 89] - порошки полупроводников; [17, 92] - коллоидные наножидкости; [17, 37,40] наножидкости и многие другие [147, 148, 150-152, 155, 157].

Установка содержит следующие элементы: бикалориметр цилиндрический, сосуд пережимной высокого давления (13), манометр грузопоршневого типа марки МП-2500 (16), приборы измерения электрических параметров, комплекс измерения теплофизических параметров автоматизированный АТК (22). Бикалориметр выполнен в виде медного цилиндра (1), внутри которого установлен в коаксиальном порядке другой также медный цилиндр (2), диаметр которого меньше внешнего, в результате чего образуется пространство, применяемое для размещения опытного образца. Внутренний цилиндр, именуемый ядром устройства имеет измерительный (2) и компенсационный (3) цилиндры.

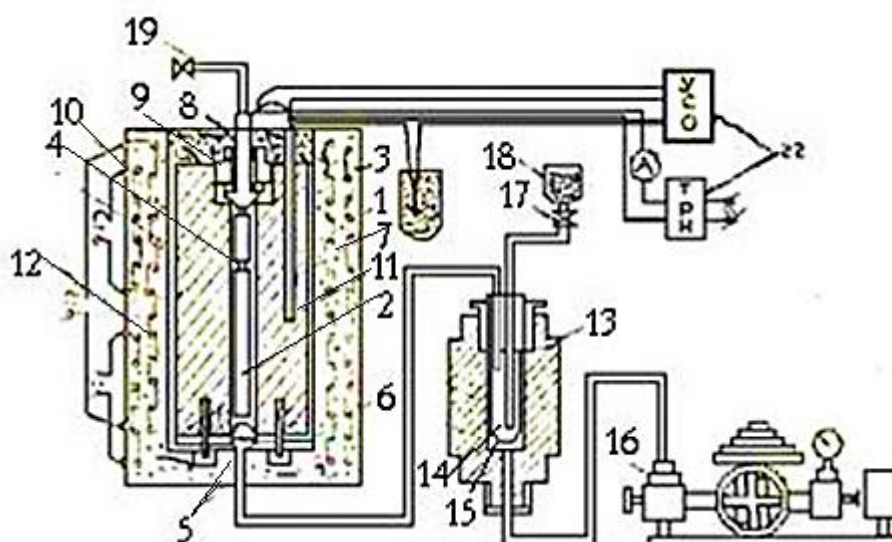


Рисунок 2.1. Схема экспериментальной установки для измерения теплопроводности растворов в зависимости от температуры и давления. 1- внешний цилиндр, 2- измерительный цилиндр, 3- компенсационный цилиндр, 4-ниппель, 5-нижний конус, 6-фланец, 7,11-термопары, 8-конусное уплотнение верхней головки, 9-гайка, 10,12 -электроды, 13-пережимной сосуд, 14- полиэтиленовый мешочек, 15-глицерин, 16-грузопоршневый манометр типа МП- 2500, 17;19-вентили, 18-стакан.

Цилиндр (3) в устройстве необходим для того, чтобы обеспечить отсутствие теплотерь. Другим, не мало важным показателем равномерности распределения температуры является использование медных цилиндров, наружным диаметром внешнего цилиндра 110мм, внутренней полостью 18,1 мм, наружным диаметром внутреннего цилиндра 17,0, с установлением в них измерительного 170мм и компенсационного 50мм цилиндров с образовавшимся пространством между ними в 0,55 мм, в котрое непосредственно и размещается объект исследования.

Оба цилиндра (измерительный и компенсационный) соединены друг с другом с помощью ниппеля на резьбе (4), а компенсационный с центрирующим конусом (8), уплотненного с внешним цилиндром с помощью гайки прижимной (9). В нижней части установлен конус уплотняющий (5), фланцем (6) прижатого к корпусу цилиндра. Он служит для заполнения устройства исследуемым веществом. Ниппель, верхний центрирующий и нижний уплотняющий конусы изготовлены из нержавеющей стали. Для установления термопар (7, 11) сверху наружного цилиндра сделаны отверстия.

Горячий спай измерительной термопары (11), а также нагреватель устанавливаются в бикалориметре таким образом, чтобы он оказался тщательно изолированным от среды с исследуемым веществом и находился под действием атмосферного давления. Для того, чтобы на границах слоя изучаемого вещества возник перепад температур, установка оснащена нихромовым нагревателем, диаметр проволоки которого равен 0,15мм. Он устанавливается в измерительном цилиндре ядра бикалориметра, а его питание осуществляется посредством понижающего трансформатора от сети. Отверстия, о которых ранее было сказано, сделаны минимально возможных размеров для достижения равномерности температурного поля в ядре. Термопара и электронагреватель электрически изолированы стеклотканью, пропитанной клеем БФ-2. Разность температур на границе слоя изучаемого вещества, равна 1,31-0,65К. Толщина слоя и соответственно диаметр цилиндров выбирается таким образом, чтобы удовлетворить требование отсутствия конвекции.

Для центровки цилиндров использовали микроскоп марки МИР-2, а расстояние между ними с помощью микрометра и индикатора (нутромера), либо непосредственным измерением с помощью микрометра. Исключение теплотерь излучением было достигнуто путем полировки и хромирования поверхности цилиндров.

Температура в опытах изменялась с помощью электропечи, состоящей из трех основных узлов (10, 13, 14). Печи придана форма цилиндра диаметром 180x110мм, на внутренней полости которой установлен электронагреватель из нихромовой спирали ( $d=1\text{мм}$ ). Тепловая изоляция печи была выполнена из асбеста. Благодаря своей форме бикалориметр прогревается за значительно короткое время. С использованием стабилизатора напряжения, регулируемого вольтметром подается питание к печи. Разность температур по высоте прибора регулируется термопарой и гальванометром (ГСП-47).

Пережимной сосуд (13) изготовлен из нержавеющей стали (1Х18Н9Т) следующими размерами: диаметр 100x28 мм, длина – 300 мм. Все его основные узлы также сделаны из стальных труб диаметром 6x3мм. В устройстве



предусмотрен полиэтиленовый мешочек (14), применяемый в качестве разделителя рабочей жидкости (15) (глицерин), от опытного вещества. Для фиксирования давления использовались грузопоршневый манометр МП-2500 (16) и образцовый типа МО 600. Данный автоматизированный комплекс подключен к бикалориметру [24,26,107] (рисунок 2.2). Он предназначен для опытного исследования процессов теплопереноса в неоднородных средах при  $T=(293-773)K$ . В него входит ПК (1), устройства сопряжения с объектом УСО (2); усилители для нормирования; блока вентиляторов БВ (3); блока тиристорных регуляторов мощности; установки для измерения ТФС и других параметров, которыми осуществляется охарактеризование процессов теплопереноса.

Подобное техническое решение позволяет следующее:

- сбор, обработка информации по ходу эксперимента;
- формирование и вывод на терминал алфавитно-цифровой и графической информации о ходе протекающего опыта;
- автоматическое изменение и поддержание заданного уровня температуры;
- обеспечение обмена информации между установкой и вычислительной машиной при помощи интерфейса ИРПС.

Данное устройство способно выводит сигналы 4-х термопар (сигналов 0-5) с погрешностью не более 0,1% за максимальное время 150 мкс, преобразование и вывод двенадцати дискретных сигналов типа «открытый коллектор» регулировать мощность до 2 кВт и до 400 Вт.

Точность работы установки устанавливалась контрольными измерениями с помощью эталонов (толуол, воздух), которые проводились при  $T=293$  до  $573 K$  и атмосферном давлении при изменении толщины слоя и времени проведения опыта.

Используя полученные результаты по исследованию теплопроводности, была выведена зависимость в виде графика (рисунок 2.3), на котором отмечены данные [1-4,17,19-21,51]. Согласно рисунку, полученные нами данные во всем исследуемом температурном диапазоне практически не имеют расхождения с приведенными в вышеуказанных источниках.

На рисунке 2.4 также представлены результаты наших исследований и экспериментальные данные авторов [1-4,17,19-21,51] по теплопроводности жидкого толуола. Диапазон изменения температуры опыта варьировался от 290 до 544,8 К, а давление изменялось от 0,098 до 49,06 МПа.

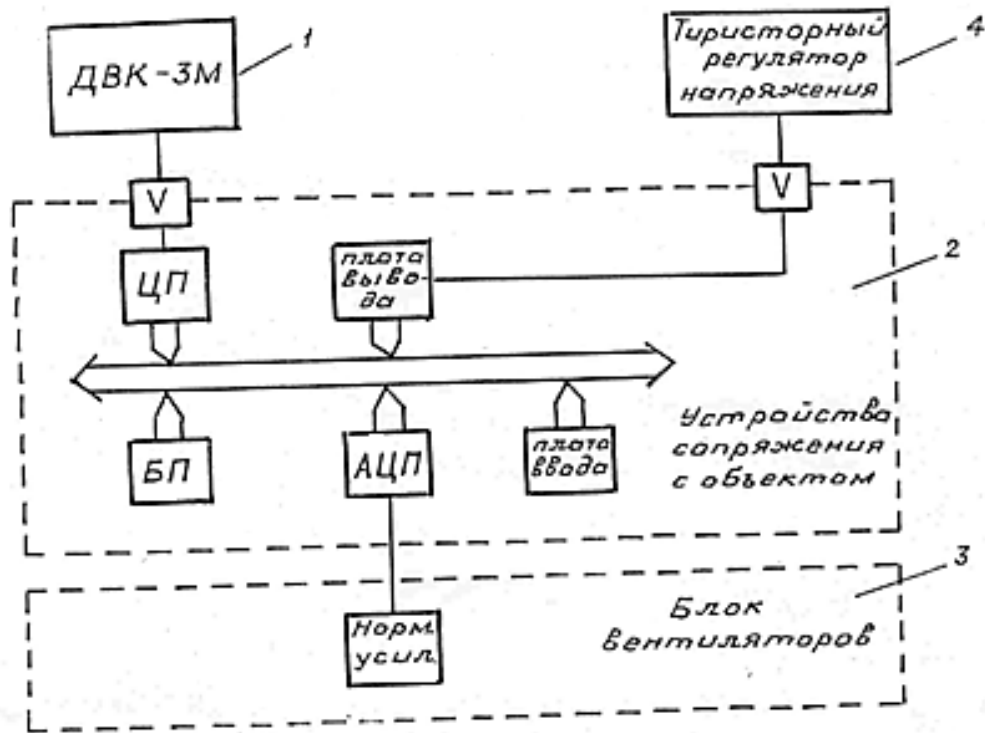


Рисунок 2.2. Блок-схема автоматизированного теплофизического комплекса

Согласно рисункам 2.3 и 2.4, результаты проверочных опытов с воздухом и толуолом по изучению их теплопроводности в рамках допустимой погрешности, которая при доверительной вероятности  $\alpha = 0,95$  составляет не более 4,2% [17,21,34,40], практически не имеют расхождения с результатами исследований теплопроводности, представленными в [1-4,51]. После того как была установлена качественная воспроизводимость результатов экспериментов как с изменением температуры, так и с изменением давления, предложенное устройство было нами использовано для измерения выбранных нами образцов исследования.

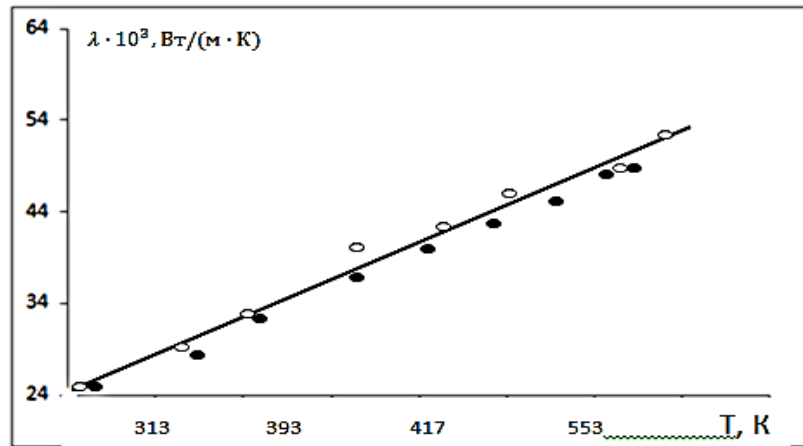


Рисунок 2.3. Сравнение экспериментальных значений теплопроводности воздуха с данными, приведенными в [1-4]: о – данные [1-4]; ● - наши данные

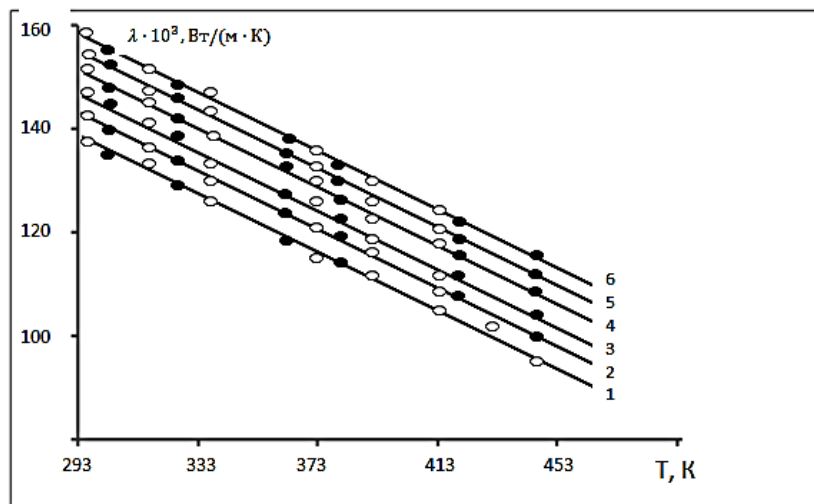


Рисунок 2.4. Сравнение экспериментальных значений теплопроводности толуола при различных температурах и давлениях с данными, приведенными в [1-4,51]; о – данные [1-4,51]; ● - наши данные

Также на разработанной установке была измерена теплопроводность диэтилового эфира с добавкой (ОУНТ) с изменением температуры опыта от 293 до 573К, а диапазон изменения давления составил от 0,101 до 49,01 МПа, результаты которых изложены в [29-33, 108, 150-152, 157].

## 2.2. Методика измерения теплопроводности растворов и наножидкостей при различных температурах и давлениях

Используя стакан 18 вещество опытного назначения заливается в устройство, при этом вентили 17 и 19 должны быть закрытыми. Затем эти вентили открываются, чтобы раствор из стакана мог стечь в полость между цилиндрами бикалориметра, после чего вентили снова переводят в закрытое положение. Непосредственно перед измерением жидкость следует дегазировать при открытом положении вентиля 19. В результате нагрева устанавливается стационарное тепловое состояние в опытном образце при требуемой температуре опыта.

В качестве регулятора давления опыта служит грузопоршневый манометр (МП-2500), имеющий пережимной сосуд. Через 1,5 или 2 минуты после включения нагревателя и достижения разности температур  $\sim 2,5^\circ\text{C}$ , его выключают и наблюдают за переходом в равновесное состояние наружного цилиндра относительно внутреннего через исследуемый слой.

## 2.3. Расчетное уравнение для вычисления теплопроводности на основе данных опыта. Проверка прибора на отсутствие конвекции.

По данным опыта, проводится расчет теплопроводности согласно формуле [17, 22, 24, 62, 93, 106, 109, 110, 141, 148, 150, 151, 152, 155]:

$$\lambda = \frac{R_1^2 C^1 m \gamma \ln R_2 / R_1}{2B_{\text{ц}}} . \quad (2.1)$$

Здесь  $B_{\text{ц}} = \frac{3J_{\text{ц}}}{3J_{\text{ц}} + K_{\text{ц}}}$ ,  $J_{\text{ц}} = \frac{1 + K_{\text{ц}} + K_{\text{ц}}^2}{3K_{\text{ц}}} \cdot \frac{C_{\text{м}}}{C^1}$ ,  $K_{\text{ц}} = \frac{R_1}{R_2 - R_1} \ln \frac{R_2}{R_1}$ , где  $C_{\text{м}}$ ,  $C^1$ ,  $R_1$ ,  $\rho$  – общая и удельная теплоемкость, радиус, плотность материала измерительного цилиндра;  $R_2$  – внутренний диаметр наружного цилиндра;  $C$  – полная теплоемкость исследуемого раствора;  $m$  – темп регулярного охлаждения, определяемый как:

$$m = \frac{\ln \Theta_1 - \ln \Theta_2}{\tau_2 - \tau_1} = \frac{\ln N_1 - \ln N_2}{\tau_2 - \tau_1} , \quad (2.2)$$

где  $\Theta_1$  и  $\Theta_2$  – разница температур на поверхности слоя опытного вещества в начале ( $\tau_1$ ) и в конце ( $\tau_2$ ) отсчета;  $N_1$  и  $N_2$  – также перепад температур по гальванометру. Все указанные величины получают на ПК.

Для слоя образца толщиной 0,55 мм, величина  $K_{ц}$  становится:

$$K_{ц} = 0,974; Ж_{ц} = 15,3; Б_{ц} = 0,981.$$

Для слоя образца толщиной 0,356 мм формула (2.1) преобразуется:

$$\lambda = 0,133 \text{ C}'\text{m}. \quad (2.3)$$

Для слоя образца толщиной 0,556 мм формула (2.1) преобразуется:

$$\lambda = 0,23 \text{ C}'\text{m}. \quad (2.4)$$

При вычислении теплопроводности с помощью (2.1) в нее необходимо внедрить поправки, рассматриваемые индивидуально.

В связи с этим определение теплопроводности и плотности веществ требует внесения поправок на:

- размещение спаев термопары;
- нагрев внешнего цилиндра;
- изменение размеров бикалориметра с учетом изменения температуры;
- изменение размеров бикалориметра с учетом изменения давления [19,23,24];
- излучательную составляющую теплопередачи [23,24];
- поддержание граничных условий;
- отсутствие конвекции в опыте.

С учетом сказанного поправка, вносимая в расчетное уравнение имеет следующий вид:

$$\frac{\delta}{F} = \frac{(R_2 - R_1)}{F} = \frac{(R_2 - R_1)_{t_0}(1 + \alpha \Delta t)^2}{F_{t_0}(1 + \alpha \Delta t)^2} = \frac{(R_2 - R_1)_{t_0}}{F_{t_0}[1 + \alpha(t_{\text{изм}} - 20)]}, \quad (2.5)$$

где,  $\alpha$  – коэффициент линейного расширения металлов цилиндров;  $t_{\text{изм}}$  – температура опыта;  $20^\circ\text{C}$  – температура бикалориметра на момент измерения его размеров, а данное изменение с изменением температуры определяется:

$$\frac{(R_2 - R_1)}{F} = \frac{0,55 \cdot 10^{-3}}{90 \cdot 10^{-4}[1 + 0,000017(400 - 20)]} = 0,0601,$$

которое справедливо при 293К, а поправка в данном случае соответствует величине 0,62%, поскольку опыт реализован при давлении, соответствующий значению 49,01МПа. Таким образом, в расчетное уравнение требуется внесение поправки на габариты устройства с учетом давления.

Радиальные перемещения, которые возникают на внутренней поверхности цилиндра вычисляются [23, 62]:

$$U_{r=r_1} = \frac{P \cdot r_1}{E} \left( \frac{1+K^2}{1-K^2} + \mu_0 \right), \quad (2.6)$$

здесь  $P = 490 \cdot 10^5$  Па;  $k = r_1 / r_2 = 9,05/55 = 0,165$ ;

$$\mu_0 = \frac{E}{2G} - 1 = 0.125; G = 4,8 \cdot 10^{10} \text{Па}; E = 1,08 \cdot 10^{11} \text{Па}.$$

Согласно этим данным радиальное перемещение у внутренней поверхности цилиндров составит

$$U_{r=r_1} = \frac{490 \cdot 10^5 \cdot 9.05 \cdot 10^{-3}}{1.08 \cdot 10^{11}} \left( \frac{1 + 0.02723}{1 - 0.02723} + 0.125 \right) = 0.00485 \cdot 10^{-3} \text{м}$$

Показано, что при  $P=49,01$ МПа, оказываемого на внутреннюю поверхность полого цилиндра его радиус изменяется на 0,054%, а более низкие давления практически не изменяют его.

Излучательная составляющая между цилиндрами с радиусами  $R_1$  и  $R_2$  требует внесения соответствующей поправки [143-146]:

$$\lambda_{\text{луч}} = \alpha_{\text{луч}} (R_2 - R_1), \quad (2.7)$$

где  $\alpha_{\text{луч}}$ —коэффициент теплоотдачи излучением, который соответствует

$$\alpha_{\text{луч}} = 19,52 T^3 \varepsilon_{1,2} \cdot 10^{-8} \text{ккал}/(\text{м}^2 \text{ч.К}) = 22,7 T^3 \varepsilon_{1,2} \cdot 10^{-8}, \text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}. \quad (2.8)$$

Здесь

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{F_1}{F_2} \left( \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}, \quad (2.9)$$

где  $F_1$  и  $F_2$  – площадь поверхностей участвующих в процессе теплообмена, ограничивающих исследуемый слой образца ( $90,8 \cdot 10^{-4}$  и  $1,33 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>);  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  – соответственно степень их черноты.

Так, при температуре  $T = 500$  К  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$  соответствует  $\approx 0,07$ .

Тогда,

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + 0,933 \left( \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)} = 4,28 \cdot 10^{-2} \quad . \quad (2.10)$$

Затем рассчитываем  $\alpha_{\text{луч}}$  при температуре 573 К:

$$\alpha_{\text{луч}} = 22,7 \cdot (573)^3 \cdot 4,28 \cdot 10^{-2} \cdot 10^{-8} = 1,83 \cdot 10^{10} \cdot 10^{-10} = 1,83 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

По формуле (2.7) определяем  $\lambda_{\text{луч}}$ :

$$\lambda_{\text{луч}} = 1,83 \cdot 0,36 \cdot 10^{-3} = 0,66 \cdot 10^{-3} \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}).$$

Значение  $\lambda$  диэтилового эфира при  $T = 373$  К в газовой фазе соответствует  $0,018$  Вт/(м·К), а значение  $\lambda_{\text{луч}}$  соответствует 1,4% от значения  $\lambda$  диэтилового эфира. Вклад лучистой составляющей в рассматриваемом процессе теплообмена и соответствующие поправки к ней нами учтены при исследовании веществ в газовой фазе.

По результатам ИК-спектроскопии [23] отмечено, что в жидких сложных эфирах (ацетаты и пропионаты) интенсивность поглощения в превосходящем количестве полос зафиксировано в более чем 60%, в связи с чем эти вещества можно отнести к сильно поглощающим жидкостям.

Выведение основной формулы базировалось на том, что при исследовании теплопроводности температура окружающей среды бикалориметра принималась в качестве постоянной величины, лишь при высоких параметрах состояния она изменялась не значительно. Эти изменения вносят свой вклад и в темп охлаждения (ускоряют либо тормозят процесс). Этот вклад впервые в своих работах учел М.Ф. Казанский [111]. По итогам опытов, им было отмечено влияние температуры на изменение темпа охлаждения. Таким образом, он установил связь между его истинными и опытными значениями:

$$m_{\text{изм}} = m_{\text{ист}} + K \frac{\Delta\theta_{\text{T}}}{\Delta\theta_{\text{Б}}}, \quad (2.11)$$

где  $\Delta\theta_{\text{T}}$ ,  $\Delta\theta_{\text{Б}}$  – изменение температуры термостата и бикалориметра за время установления темпа охлаждения;  $K$  – постоянная величина, равная  $6,1 \text{ ч}^{-1}$ . Согласно исследованиям Казанского М.Ф. на каждые  $0,01^\circ\text{C}$  соответствует 1% погрешности в определении величины данного показателя. Позже И.Ф. Голубев [62] был представлен значительно упрощенный вариант этого показателя:

$$\frac{m}{m_{\text{изм}}} = \frac{\ln N_1 - \ln N_2 (N_1 - N_2) C_{\text{М}} / \bar{C}_{\text{М}}}{\ln N_1 - \ln N_2}, \quad (2.12)$$

где  $N_1$  и  $N_2$  – деления шкалы гальванометра;  $C_{\text{М}}$  и  $\bar{C}_{\text{М}}$  – полная теплоемкость ядра и внешнего цилиндра.

Голубев также предложил и поправку к данному параметру в бикалориметре:

$$\frac{m}{m_{\text{изм}}} = \frac{\ln\theta_1 - \ln(\theta_1 - \Delta t)}{\ln\theta_1 - \ln\theta_2}, \quad (2.13)$$

где,  $\Delta t$  – изменение температуры среды в течение опыта.

Нами также была принята данная поправка (2.13). Важным условием точности измерений является обеспечение отсутствия конвекции, что уточнялось произведением критериев Грасгофа и Прандтля ( $Gr \cdot Pr$ ) [62], величина которой исследована Н. Крауссольдом [112], согласно которому при  $Gr \cdot Pr \geq 1000$  в жидкости будет возникать конвекция.

Мы данный параметр также оценивали с помощью критериев Грасгофа и Прандтля [143-149]:

$$Gr \cdot Pr = \frac{\delta^3 \beta g \Delta T}{\nu^2} \cdot \frac{\nu \rho C_p}{\lambda}, \quad (2.14)$$

где  $\delta$ ,  $\beta$  – толщина изучаемого слоя (жидкость, раствор) и коэффициент его объемного расширения;  $g$  – ускорение силы тяжести;  $\Delta T$  – температурный перепад между поверхностями;  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости;  $\rho$  – плотность;  $C_p$  – удельная изобарная теплоемкость;  $\lambda$  – теплопроводность (значение вязкости и теплофизические свойства приняты из справочника) [1-4].



Р.В. Шингарев [110] методом нагретой нити исследовал теплопроводность природных газов и в результате пришел к выводу, что при  $Gr \cdot Pr \geq 2500$  в зазоре с большой кривизной ( $\delta = 0,4$  мм) возникает конвекция. Для своих образцов мы также рассчитали данный параметр [1-4]:

$$T = 293 \text{ К}; P = 0,98 \cdot 10^5 \text{ Па}; \delta = 0,55 \text{ мм}; \Delta T = 1,31 \text{ К};$$

$$\beta = 1,38 \cdot 10^{-5} \text{ 1/К}; g = 9,81 \text{ м/с}^2; C_p = 1,67 \cdot 10^3 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$$

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} = \frac{0,586 \cdot 10^{-3}}{866,9} = 6,78 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2 / \text{с}; \lambda = 0,135 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$$

$$C_{02}P_2 = \frac{\sigma^2 \cdot \beta \cdot g \cdot \Delta T}{\nu^2} \cdot \frac{\nu \cdot \rho \cdot C_p}{\lambda} = \frac{\sigma^2 \cdot \beta \cdot g \cdot \Delta T \cdot \rho \cdot C_p}{\nu \cdot \lambda} = 4,68.$$

Так, для воздуха произведение  $Gr \cdot Pr$  при толщине  $\delta=0,36$ , составило 7,23. Отсутствие конвекции регулировалось путем измерения температуры в различных местах изучаемого слоя.

#### **2.4. Экспериментальная установка для измерения температуропроводности жидкостей при различных температурах и давлениях (Патент РФ №ТJ292,2010).**

Температуропроводность и теплоемкость растворов и некоторых азотосодержащих органических жидкостей (диэтилового эфира и хладагентов) + ОУНТ и МУНТ (углеродные одностенные и многостенные нанотрубки) при  $T = (293 \div 473) \text{ К}$  и  $P = (0,101 \div 49,01) \text{ МПа}$  нами были измерены на установке, методологическую основу которой составляет регулярный тепловой режим. Одной из самых ранних версий подобного устройства была разработана и собрана профессором К.М. Колоровым [82, 129].

Главными элементами устройства (рисунок 2.5) служат цилиндрический сосуд (1) с термостатирующей жидкостью (9), в которую в последующем устанавливаются  $\alpha$ -калориметр (13), наружный сосуд (3).

Сосуды отделены изоляцией (2). В устройстве установлены змеевик (5) и нагреватель (6) для охлаждения и для нагрева, термореле (7) и вентиль (8) для слива. Температура измеряется в опытах при помощи термометра (10), а для выравнивания температуры по всему объему в устройстве установлен

контактный термометр (14) и мешалка (11) с электродвигателем (12) для приведения мешалки в действие. Также данное устройство включает гальванометр (15) и электросеть (4) [129, 143-146, 153, 159].

Для обеспечения и поддержания давления, которое необходимо для соответствующих опытов в комплект установки также включен пережимной сосуд высокого давления (18) с грузопоршневым манометром МП-2500 (21), связь которого с устройством обеспечивается при помощи нержавеющей трубок (17). Для обработки полученных значений и расчета коэффициента теплопроводности также необходимы данные по времени опытов, регистрация которого осуществлялась секундомером.

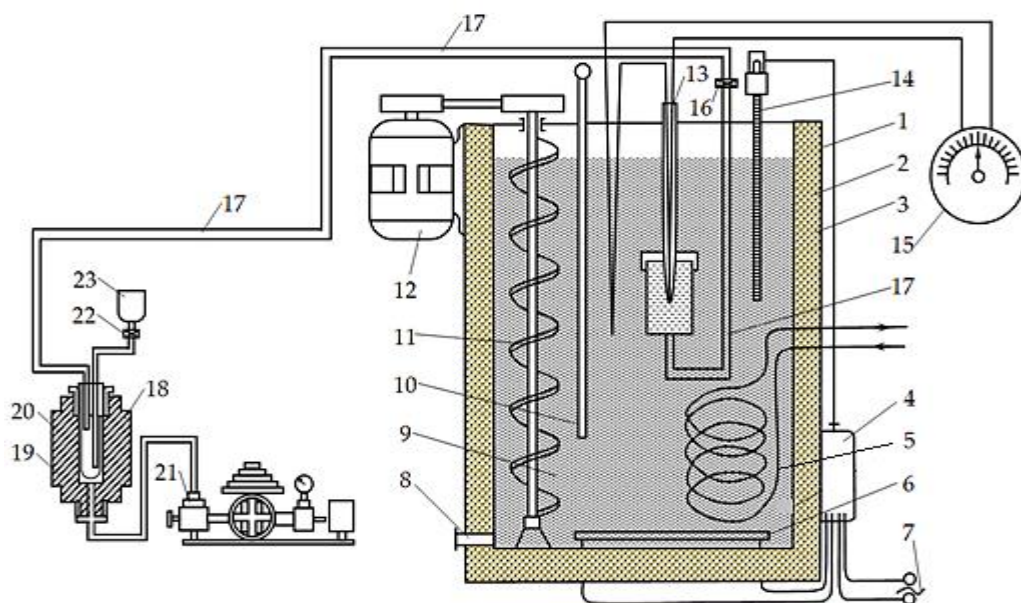


Рисунок 2.5. Схема установки для определения коэффициента температуропроводности при высоких параметрах состояния: 1–цилиндрический сосуд; 2–изоляция; 3–внешний сосуд; 4–электрическая сеть; 5–змеевик для охлаждения; 6–нагреватель; 7–термореле; 9–термостатирующая жидкость; 10–термометр; 11–шнековая мешалка; 12–электродвигатель; 13–а-калориметр; 14–контактный термометр; 15–гальванометр; 8, 16, 22–вентили; 17–нержавеющая металлическая трубка; 18,19– пережимной сосуд; 20–полиэтиленовый мешочек; 21–грузопоршневой манометр МП-2500;23–металлический стакан для заполнения исследуемыми жидкостями или растворами

Для измерения температуры в *a* – калориметре применяли дифференциальную хромель-алюмелевую термопару ( $d=0,15\text{мм}$ ), подключенную к гальванометру (15). Холодный спай был установлен в термостатирующей жидкости, а горячий в центре *a* - калориметра (13) [129, 149, 156].

## 2.5. Методика измерения температуропроводности растворов и жидкостей при различных температурах и давлениях (Патент РТ № ТЈ 292, 2010)

Перед тем как в стакан (23) налить в необходимом количестве исследуемую жидкость, требуется предварительно перевести в закрытое положение вентили (16) и (22) и только после заполнения стакана эти вентили открываются и уже после заполнения  $a$ -калориметра они вновь переводятся в закрытое положение [129]. До начала эксперимента при открытом вентиле высокого давления (23) испытуемая жидкость подвергается нагреву для ее дегазации до соответствующей температуры опыта и грузопоршневым манометром и пережимным сосудом задавалось необходимое давление. Нагретый предварительно образец с  $a$  – калориметром помещают в термостат и наблюдают за выравниванием температуры, регулярно регистрируя ее. Если среда, в которую помещен  $a$  – калориметр обладает постоянной температурой, то график охлаждения в полулогарифмических координатах  $\ln(\Delta T)=f(\Delta \tau)$  подчиняется закону прямой линии, способствующий выяснению показателя охлаждения  $m$  путем [17, 18, 23, 30, 114-124, 129, 143, 146];

$$m = \ln \frac{\Delta T}{\Delta \tau}, \quad (2.15)$$

где  $\Delta T$  – разность температур между образцом и охлаждающей жидкостью, в которую помещается  $a$  – калориметр;  $\Delta \tau$  – время охлаждения.

Установка (рисунок 2.5), ранние версии которой были представлены К.М. Колоровым [113,114], им была использована для исследования молочных продуктов и овощных паст (томат). Предложенный вариант установки позволял измерять температуропроводность лишь при изменении температуры. После соответствующей модернизации нами был собран новый вариант устройства, который стал позволять проводить соответствующие опыты и с изменением давления, для чего согласно [113, 114, 129, 159-162] температуропроводность рассчитывается как:

$$a = \Phi m, \text{ м}^2/\text{с} \quad (2.16)$$

где  $m$  – темп охлаждения,  $1/c$  – определяется согласно той же формуле, что и теплопроводность;  $\Phi$  – величина, зависящая от формы и размера  $a$  – калориметра [113,114]:

$$\Phi = \frac{1}{\left(\frac{2,405}{R}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{l}\right)^2} = 0,34 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2, \quad (2.17)$$

где  $R$  и  $l$  - соответственно радиус цилиндра и его высота.

На предложенном, новом варианте устройства были дополнительно, в качестве контрольных, проведены опыты с водой, позволяющих оценить степень достоверности, получаемых на нем результатов и степень его работоспособности (рисунок 2.5). Результаты были сравнены в виде таблицы 2.1, в которой также представлены и данные других исследователей [1-4, 17, 18].

Таблица 2.1. Результаты экспериментального определения температуропроводности воды (контрольных измерений) в зависимости от температуры при атмосферном давлении с данными источников [1-4,17,18].

Т, К	293	303	313	323	333	343	353
$a_{\text{лит}} 10^8, \text{ м}^2/\text{с}$	14,3	14,9	15,3	15,7	16,0	16,3	16,6
$a_{\text{конт}} 10^8, \text{ м}^2/\text{с}$	14,6	14,7	15,4	15,9	16,5	16,6	16,9
$\sigma, \%$	2,1	1,34	0,65	1,27	3,1	1,84	1,81

После сравнительного анализа было выявлено, что погрешность в исследованиях температуропроводности при  $\alpha = 0,95$  соответствует 1,73%.

После удовлетворительной оценки работоспособности установки путем ее контрольного испытания эталонными веществами, мы исследовали на ней температуропроводность азотосодержащих и кислородосодержащих топлив при  $T = (293 \div 573) \text{ К}$ ,  $P = (0,101 \div 49,01) \text{ МПа}$  и различной концентрации наночастиц металлов и их окисей [30,31,115-126]. Также данное устройство послужило нам в измерениях температуропроводности хладагента (изобутан и бутан) и в чистом виде и с добавлением одностенных и многостенных углеродных нанотрубок при

изменении температуры от 280 до 630 К и давления от 0,101 до 29,42 МПа [160-А, 161-А, 163-А].

## 2.6. Расчет погрешности измерения теплопроводности, температуропроводности веществ по методу цилиндрического бикалориметра регулярного теплового режима первого и второго рода

Погрешность опытов нами оценена согласно [17,18-25,33,35,36,40,62,64, 66,93,127,128,129].

Среднеарифметическая погрешность (выборочное среднее)  $\bar{X}$  нескольких опытов

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (2.18)$$

где  $n$  – число наблюдений;  $X_i$  – результат  $i$  – го измерения.

Абсолютная ( $S$ ) и относительная ( $S_{\text{отн}}$ ) величины среднеарифметической погрешности одного опыта:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}, \quad (2.19)$$

$$S_{\text{отн}} = \frac{S}{\bar{X}} \cdot 100\%. \quad (2.20)$$

Абсолютная ( $S_{\bar{X}}$ ) и относительная ( $S_{\text{отн}}$ ) величины среднеарифметической погрешности нескольких опытов

$$S_{\bar{X}} = \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (2.21)$$

$$S_{\bar{X}_{\text{отн}}} = \frac{S_{\bar{X}}}{\bar{y}} \cdot 100\% \quad (2.22)$$

Случайная погрешность измерений  $\Delta X_{\text{сл}}$  при доверительной вероятности

$$\Delta X_{\text{сл}} = S_{\bar{X}} \cdot t_{n-1, 1-\alpha/2}, \quad (2.23)$$

где  $\varepsilon = 1 - \alpha$ ,  $\alpha$  – доверительная вероятность, принятая 0,95.

Систематическая погрешность при доверительной вероятности по итогам одного измерения  $\Theta$  вычисляется

$$\Theta = K \sqrt{\sum_{j=1}^m O_j^2}, \quad (2.24)$$

где  $\theta_j$ —граница  $j$  – й составляющей неисключённой систематической погрешности;  $K$  – коэффициент, равный 1,1, соответствующий доверительной вероятности  $\alpha = 0,95$  принимает значение 1,1.

Доверительную границу погрешности измерений рассчитывают как

$$\Delta = t_{\Sigma} \cdot S_{\Sigma}. \quad (2.25)$$

Отношение случайной и неисключённой погрешностей описывается коэффициентом  $t_{\Sigma}$ :

$$t_{\Sigma} = \frac{\Theta + S_x \cdot t_x}{S_v + S_x}, \quad (2.26)$$

где  $t_{\bar{x}}$  – коэффициент Стьюдента, подобранный в соответствии с доверительной вероятностью  $\alpha$  и численностью опытов  $n$ .

Среднеквадратичное несоответствие неисключённых систематических и случайных погрешностей

$$S_{\Sigma} = \sqrt{S_x^2 + S_v^2}, \quad (2.27)$$

где  $S_v^2 = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^m \Theta_j^2$  – среднее квадратичное отклонение суммы неисключённых систематических погрешностей.

Погрешность косвенных измерений согласно функции  $y = F(y_1, y_2, \dots, y_n)$  при  $\alpha = 0,95$ , определяется

$$\Delta y = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial y_1}\right)^2 (\Delta y_1)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial y_2}\right)^2 (\Delta y_2)^2 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial y_n}\right)^2 (\Delta y_n)^2}, \quad (2.28)$$

где  $\Delta y_1, \Delta y_2, \dots, \Delta y_n$ —доверительная граница погрешности измеренных величин  $y_1, y_2, \dots, y_n$ .

учитывая вышеизложенное, относительная погрешность определяется:

$$\sigma = \frac{\Delta X}{\bar{X}} \cdot 100\% . \quad (2.29)$$

Согласно (2.1) погрешность измерения теплопроводности вычисляется:

$$\Delta\lambda = \sqrt{\left(\frac{\partial\lambda}{\partial C^1}\right)^2 (\Delta C^1)^2 + \left(\frac{\partial\lambda}{\partial\gamma}\right)^2 (\Delta\gamma^2) + \left(\frac{\partial\lambda}{\partial m}\right)^2 (\Delta m)^2 + \left(\frac{\partial\lambda}{\partial C}\right)^2 (\Delta C)^2 + \left(\frac{\partial\lambda}{\partial C_m}\right)^2 (\Delta C_m)^2 + \left(\frac{\partial\lambda}{\partial R_1}\right)^2 (\Delta R_1)^2 + \left(\frac{\partial\lambda}{\partial R_2}\right)^2 (\Delta R_2)^2}, \quad (2.30)$$

$$\text{где } \frac{\partial\lambda}{\partial C_1} = \frac{\gamma m R_1^2 \ln(R_2 / R_1)}{2} \left[ 1 + \frac{CK_{\text{ц}}^2}{C_m(1 + K_{\text{ц}} + K_{\text{ц}}^2)} \right] = 0,29 \cdot 10^{-4};$$

$$\frac{\partial\lambda}{\partial\gamma} = \frac{C^1 m R_1^2 \ln(R_2 / R_1)}{2} \left[ 1 + \frac{CK_{\text{ц}}}{C_m(1 + K_{\text{ц}} + K_{\text{ц}}^2)} \right] = 0,13 \cdot 10^{-6};$$

$$\frac{\partial\lambda}{\partial m} = \frac{C^1 \gamma R_1^2 \ln(R_2 / R_1)}{2} \left[ 1 + \frac{CK_{\text{ц}}}{(1 + K_{\text{ц}} + K_{\text{ц}}^2)} \right] = 7,64;$$

$$\frac{\partial\lambda}{\partial C} = \frac{C^1 K_{\text{ц}}^2 \gamma m R_1^2 \ln(R_2 / R_1)}{2(1 + K_{\text{ц}} + K_{\text{ц}}^2) C_m} = 80,6 \cdot 10^{-6};$$

$$\frac{\partial\lambda}{\partial C_m} = \frac{m C C^1 K_{\text{ц}}^2 \gamma R_1^2 \ln(R_2 / R_1)}{2 C_m^2 (1 + K_{\text{ц}} + K_{\text{ц}}^2)} \left[ (1 + K_{\text{ц}} + K_{\text{ц}}^2) C_m + CK_{\text{ц}} \right] = -27,4 \cdot 10^{-6};$$

$$\frac{\partial\lambda}{\partial R_1} = \frac{C^1 m \gamma / 2 R_1 \ln(R_2 / R_1) - 1/}{2(1 + K_{\text{ц}} + K_{\text{ц}}^2) C_M} \left[ (1 + K_{\text{ц}} + K_{\text{ц}}^2) C_M + CK_{\text{ц}} \right] = -1873;$$

$$\frac{\partial\lambda}{\partial R_2} = \frac{C \gamma m R_1^2 (1/R_2)}{2(1 + K_{\text{ц}} + K_{\text{ц}}^2) C_M} \left[ (1 + K_{\text{ц}} + K_{\text{ц}}^2) C_M + CK_{\text{ц}} \right] = 20,13.$$

Методическая погрешность измерения температуры и инструментальная были определены в соответствии с рекомендациями [17, 25, 105, 106, 147-152]. Пример расчета погрешностей представлен ниже.

Методическая погрешность  $\Delta_t(x)$  состоит из двух слагаемых:

$$\Delta_t(x) = t_s(x) - t_o(x) = \Delta_L(x) + \Delta_B(x), \quad (2.31)$$

где  $t_o(x)$ ,  $t_s(x)$  – действительная и измеренная температуры тела на расстоянии  $x$ . Первое слагаемое  $\Delta_L(x)$  зависит от степени погруженности термопары  $L$ , разности температур  $t_{\text{п}}$  и  $t_{\text{в}}$  (поверхность тела и окружающая среда), а второе температурный перепад в самом образце. В нашем случае  $\Delta_B(x) = 0$ .

Первая составляющая равна

$$\Delta_L(x) = -\frac{t_{\text{п}} - t_{\text{в}}}{1 + F} \cdot \frac{\theta \text{ch} \theta (1 - \beta) + \xi \text{Sh} \theta (1 - \rho)}{\theta \text{ch} \theta + \xi_s \text{Sh} \theta} \quad (2.32)$$

Здесь

$$\theta = \beta L; \beta = \sqrt{\frac{K}{\varepsilon^s}}; K \approx \left( \frac{1}{\alpha_0} + \frac{h_3}{\lambda_3} + \frac{R}{4\lambda_{\text{ЭП}}} \right)^{-1}; \xi_{\varepsilon} = \frac{K_{\varepsilon} L}{\lambda_{\varepsilon}}; \rho = \frac{\theta}{L}; \alpha = \frac{\lambda_0}{R};$$

$$F = \frac{L_B}{L} \frac{\theta S h \theta + \xi_3 c h \theta}{\theta c h \theta + \xi S h \theta} \frac{\theta}{\omega h \omega}; \omega = \sqrt{\frac{K_B P}{\varepsilon^s} L_B};$$

где  $\lambda_0$ ,  $\lambda_{\varepsilon}$ ,  $\lambda_{\text{ЭП}}$ ,  $\lambda_3$  – теплопроводность материала калориметра, термопары продольного и поперечного межцилиндрического пространства (воздух);  $L_B$  – выступ термопары, участвующий в конвективном и лучистом теплообмене;  $h_3$  – расстояние от стенки цилиндра до спая термопары;  $R$ ,  $P$ ,  $S$  – радиус, периметр и площадь поперечного сечения спая термопары.

Численно они равны:

$$h = 0,11 \text{ м}; R = 0,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}; L_B = 0,1 \text{ м}; h_3 = 5,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \lambda_3 = 356 \text{ Вт/(м·К)};$$

$$\lambda_{\varepsilon} = 0,049 \text{ Вт/(м·К)}; \lambda_{\text{ЭП}} = \lambda_{\varepsilon} = 23 \text{ Вт/(м·К)}; P = 1,88 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$S = 0,28 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2; \varepsilon = 0,1 \text{ м}.$$

Подставляя их в формулы (2.30) и (2.31), получим:

$$\Delta_L(x) = -1,49^{\circ}\text{C}; \varepsilon = 5,76; \beta = 51,5 \text{ 1/м}; K = 9,1 \text{ Вт/(м·К)}; \xi = 0,043;$$

$$\rho = 0,91; \alpha = 121,7 \cdot 10^3 \text{ Вт/(м·К)}; F = 1; \omega = 10,9.$$

Относительная погрешность при  $400^{\circ}\text{C}$  будет равна:

$$\delta = \frac{\Delta_t(x)}{t} \cdot 100 \% = 1,2 \%.$$

Инструментальная погрешность потенциометра при измерении термо ЭДС термопары

$$\Delta U = \pm (50 U + 0,04) \cdot 10^{-6} \text{ В},$$

где  $U$  – показания потенциометра.

Для нашего потенциометра  $\sigma_{U_{\text{ср}}} = \pm 0,01\%$ .

Поскольку предел погрешности автокомпенсатором установлен в пределах  $\sigma_{\text{АК}} = 1\%$ , то для потенциометра ( $\sigma_U$ ):

$$\sigma_u = \sigma_{U_{\text{ср}}} + \sigma_{\text{АК}} = 0,01\% + 1,0\% = 1,01\%.$$

В таблице 2.2 приведена необходимая информация для количественной оценки погрешности измерения теплопроводности аналогичным методом.



Таблица 2.2. Исходные данные для количественной оценки доверительной границы погрешности измерения теплопроводности

№ n/n	Наименование	Величина
1	Диаметр ядра бикалориметра $d$ , м	$1,72 \cdot 10^{-2}$
2	Погрешность определения радиуса ядра (микрометром) $\Delta d$ , м	$5 \cdot 10^{-5}$
3	Внутренний диаметр бикалориметра $d_2$ , м	$1,81 \cdot 10^{-2}$
4	Погрешность определения диаметра бикалориметра $\Delta d_2$ , м (нутромер индикаторный НИ-50А)	$5 \cdot 10^{-5}$
5	Длина ядра бикалориметра $L$ , м	$17 \cdot 10^{-2}$
6	Погрешность определения длины ядра $\Delta l$ , м	$1 \cdot 10^{-3}$
7	Удельная теплоемкость материала измерительного цилиндра $C_{я}^1$ , Дж/(кг·К)	391
8	Погрешность определения удельной теплоемкости измерительного цилиндра $\Delta C_{я}^1$ , Дж/(кг·К)	4,5
9	Общая теплоемкость ядра (измерительного цилиндра) $C_{я}$ , Дж/К	172,0
10	Погрешность определения общей теплоемкости (измерительного цилиндра) $\Delta C_{я}$ , Дж/К	4,2
11	Общая теплоемкость исследуемого слоя $C_{сл}$ , Дж/К	0,34
12	Погрешность определения теплоемкости исследуемого слоя $\Delta C_{сл}$ , Дж/К	0,03
13	Время регулярного охлаждения $\tau$ , с	35
14	Погрешность определения времени охлаждения $\Delta \tau$ , с	0,2
15	Масса ядра $G$ , кг	0,44
16	Погрешность измерения массы ядра $\Delta G_{я}$ , кг	$1 \cdot 10^{-4}$
17	Масса слоя $G$ , кг	0,004
18	Погрешность определения массы слоя $\Delta G$ , кг	$1 \cdot 10^{-4}$
19	Коэффициент $K_{ц}$	0,974
20	Погрешность определения коэффициента $\Delta K_{ц}$	0,03
21	Критерий $Ж$	15,2
22	Погрешность определения критерия $\Delta Ж$	0,05
23	Плотность материала измерительного цилиндра $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	8590
24	Погрешность определения плотности материала измерительного цилиндра $\Delta \rho$ , кг/м <sup>3</sup>	25

25	Темп регулярного охлаждения $m$ , 1/с	$14,710^{-3}$
26	Погрешность определения темпа регулярного охлаждения $\Delta m$ , 1/с	$0,6 \cdot 10^{-3}$
27	Давление опыта $P$ , МПа (грузопоршневый манометр типа МП-2500)	49,05
28	Погрешность измерения давления $\Delta P$ , МПа	0,005
29	Значение теплопроводности толуола $\lambda$ , Вт/(м · К)	0,132
30	Доверительная граница погрешности измерений в относительной форме при $\alpha = 0,95$ , %	1,2
31	Методическая погрешность, %	1,2
32	Инструментальная погрешность, %	1,8
33	Общая относительная погрешность измерений, %	4,2

## 2.7. Метод численного определения изобарной теплоемкости исследуемых растворов при различных температурах и давлениях

Известно, что коэффициент теплопроводности материалов (твердых, жидкостных, газовых, сплавов, композиционных, нити, наножидкостей и др.) определяется с помощью следующей зависимости [105, 106, 147-152, 155, 157];[153,159,156-162].

$$\lambda(p,T) = C_p(p,T) \cdot \rho(p,T) \cdot a(p,T), \text{ Вт/(м·К)} \quad (2.33)$$

где  $\lambda(p,T)$ - эффективная теплопроводность материала изучаемого вещества при изменении температуры и давления, (Вт/(м·К));  $C_p(p,T)$ - удельная изобарная теплоемкость материала вещества также при различных температурах и давлениях, (Дж/(кг·К));  $\rho(p,T)$ - плотность, насыпная плотность (для сыпучих материалов) в зависимости от температуры и давления, (кг/м<sup>3</sup>);  $a(p,T)$ - температуропроводность, (м<sup>2</sup>/с).

Из уравнения (2.32):

$$C_p(p,T) = \frac{\lambda(p,T)}{\rho(p,T) \cdot a(p,T)}, \text{ Дж/(кг·К)} \quad (2.34)$$

Чтобы вычислить удельную изобарную теплоемкость образцов, требуются значения всех трех параметров правой части уравнения (2.33). В нашем случае, для получения достоверных данных по теплопроводности  $\lambda(p,T)$  и температуропроводности  $a(p,T)$  образцов (н-бутан и изобутан с добавкой многостенных и

одностенных углеродных нанотрубок) была использована экспериментальная установка, описание которой дано в настоящей главе, т.е. главе 2.

Плотность изучаемых хладагентов и углеродных нанотрубок в условиях атмосферного давления нами экспериментально исследована методикой гидростатического взвешивания, которая успешно была использована и авторами [11, 17-19, 21, 24-26, 30, 35, 66].

Плотность жидкостей, растворов и коллоидных наножидкостей также можно вычислить при помощи уравнения типа Тейга, для чего требуются значения температуры и атмосферного давления. Также, зная эти параметры можно выполнить расчет динамической вязкости и теплопроводности. Подобным расчетам посвящены работы [11, 17-19, 21, 24-27, 34, 35, 37, 51, 100, 124] и [166-А,...,175-А], [176-А, 177-А, 189-А].

Задачи расчета удельной изобарной теплоемкости изучаемых растворов, изложены в третьей главе настоящей исследовательской работы.

### **Выводы по второй главе**

1. По результатам анализа существующих методик экспериментальных исследований теплофизических параметров (теплопроводность и температуропроводность) нами был выбран метод регулярного теплового режима первого и второго рода.
2. В данной главе приведено полное описание экспериментальных устройств методика, на которой они основаны и соответствующий расчет погрешности.
3. Учитывая недостатки ранних версий экспериментальных установок, а именно их ограниченные возможности, внесены соответствующие изменения, позволяющие расширить возможность данных установок.
4. Предложена иная методика расчета теплоемкости образцов (н-бутан, изобутан + одностенные и многостенные углеродные нанотрубки) при различных параметрах состояния.

### **ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ ПО ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ И ТЕПЛОЕМКОСТИ СИСТЕМЫ ХЛАДАГЕНТОВ И УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ И ДАВЛЕНИЯХ**

На экспериментальных установках, позволяющих изменять параметры состояния в больших диапазонах и описанных во второй главе настоящей работы, нами был выполнен комплекс исследований, включая теплопроводность (рисунок 2.1), температуропроводность (рисунок 2.5) и плотность (рисунок 2.6), а по их результатам и удельная изобарная теплоемкость (численно) хладагентов с добавлением в них углеродных нанотрубок.

#### **3.1. Теплофизические (теплопроводность, теплоемкость) свойства системы хладагентов (н-бутан, изобутан) + углеродные нанотрубки (ОУНТ, МУНТ) при различных температурах и давлениях**

##### **3.1.1. Теплопроводность исследуемых образцов при различных температурах и давлениях**

На разработанной профессором И.Ф. Голубевым (продублированной профессором Маджидовым Х. - ТГПИ имени Т.Г. Шевченко (имени С. Айни)) экспериментальной установке (рисунок 2.1) была выполнена серия измерительных мероприятий касательно исследования теплопроводности н-бутана, изобутана и в чистом виде, и с добавкой некоторых наночастиц (одностенных и многостенных углеродных нанотрубок) от 0,1% до 2,5% (с интервалом 0,1-0,5%) при разных параметрах состояния  $T=(280-630)K$  и  $P=(0,101-29,42)MPa$  (таблицы 3.1-3.16 и рисунки 3.1-3....) [65, 66, 151, 153, 155], а температуропроводность была измерена с помощью установки, разработанной и запатентованной профессором М.М. Сафаровым и его учениками (Малый патент РТ №ТJ 292,2010).[167-А, 168-А, 172-А, 174-А, 175-А, 176-А, 177-А, 179-А, 180-А, 183-А, 184-А, 185-А, 189-А, 190-А, 191-А, 192-А].

### 3.1.2. Теплопроводность н-бутана +ОУНТ

Ранее теплопроводность наножидкости системы диэтиловый эфир с добавлением одностенных углеродных нанотрубок при различных параметрах состояния экспериментально была изучена к.т.н. М.М. Гуломовым [29, 34, 35, 108, 131-137].

Как было выше отмечено, экспериментальными методами (метод цилиндрического бикалориметра) нами была исследована теплопроводность коллоидных наножидкостей системы н-бутан, изобутан (2-метилпропан) и одностенные, многостенные углеродные нанотрубки при различных температурах (280-630) К и давлениях (0,101-29,42) МПа.

Результаты полученных данных по теплопроводности газообразных и жидких исследуемых растворов в виде таблиц и графиков приведены в таблицах 3.1-3.15 и на рисунках 3.1-3.13.

При составлении графиков, показанных на рисунках 3.1-3.13, для н-бутана и изобутана (2-метилпропан) нами заимствованы данные, приведенные в Справочнике Н.Б. Варгафтика, опубликованного в 1990г. [1]. Концентрация наночастиц (одностенных и многостенных углеродных нанотрубок) в опытах изменялась в интервале (0 до 2,5 %) [166-А, 167-А, 168-А, 172-А, 174-А, 175-А, 176-А; 177-А, 179-А, 180-А, 183-А, 184-А, 185-А, 190-А, 193-А].

Таблица 3.1. Теплопроводность ( $\lambda \cdot 10^3$ , Вт/(м К)), системы (н-бутан+1,0% ОУНТ) при различных температурах и давлениях (газообразная и жидкая фазы).

Т, К	Давление Р, МПа					
	0,101	1,96	4,96	9,82	19,61	29,42
280	17,8	119,0	121,2	126,3	130,8	136,7
300	20,2	111,1	112,4	117,3	122,0	128,3
320	22,4	102,3	104,5	109,0	115,6	122,4
340	24,8	95,2	97,2	102,8	110,4	116,3
360	27,3	88,2	90,1	96,3	102,8	111,0
370	28,5	85,2	87,4	93,4	100,0	108,3

380	29,7	82,0	84,5	90,2	97,7	106,0
390	31,1	-	81,8	87,3	95,6	103,5
400	32,4	-	78,8	84,7	93,5	101,5
410	33,7	-	76,6	82,8	91,6	99,8
420	35,0	-	-	-	90,0	98,6
430	37,4	-	-	-	89,3	97,5
440	37,8	42,6	-	-	87,8	96,4
450	39,2	43,5	-	76,8	88,6	95,4
460	40,6	45,4	55,4	75,0	86,8	93,8
480	43,5	42,3	55,1	72,2	84,1	91,5
500	46,4	49,5	55,6	69,3	81,6	89,4
520	49,5	51,3	56,1	68,3	80,6	88,0
540	52,6	54,2	57,9	68,4	80,1	87,5
560	55,7	57,5	60,1	69,3	80,5	87,5
580	59,9	60,5	62,7	70,4	81,3	87,9
600	62,0	63,7	65,5	72,5	81,7	88,3

Таблица 3.2. Теплопроводность ( $\lambda \cdot 10^3$ , Вт/(м К)), системы (н-бутан +1,5% ОУНТ) при различных температурах и давлениях (газообразная и жидкая фазы).

Т, К	Давление Р, Мпа					
	0,101	1,96	4,96	9,82	19,61	29,42
280	22,8	124,0	126,2	131,3	135,8	141,7
300	25,2	116,1	117,4	122,3	127,0	133,3
320	27,4	107,3	109,5	114,0	120,6	127,4
340	29,8	100,2	102,2	107,8	115,4	120,3
360	32,3	92,2	95,1	101,3	107,8	116,0
370	33,5	90,2	92,4	98,4	105,0	113,3
380	34,7	87,0	89,5	95,2	102,7	111,0
390	36,1	-	86,8	82,3	100,6	108,5

400	37,4	-	83,8	89,7	98,5	106,5
410	38,7	-	81,6	87,8	96,6	104,8
420	40,0	-	80,0	-	95,0	102,6
430	42,4	-	-	-	94,3	102,5
440	42,8	47,6	-	-	93,8	101,4
450	44,2	48,5	-	81,8	92,6	100,4
460	45,6	50,4	60,4	80,0	90,8	98,8
480	48,5	47,3	60,1	77,2	89,1	96,5
500	50,4	54,5	60,6	74,3	86,6	94,4
520	54,5	56,3	60,7	72,3	85,6	93,0
540	57,6	59,2	62,9	72,4	85,1	92,5
560	60,7	62,5	65,1	74,3	85,5	92,5
580	64,9	65,5	67,7	75,4	84,3	93,9
600	67,0	68,7	70,5	77,5	82,7	93,3

Таблица 3.3. Теплопроводность ( $\lambda \cdot 10^3$ , Вт/(м К)), системы (н-бутан+ 2,0% ОУНТ) при различных температурах и давлениях (газообразная и жидкая фазы).

Т, К	Давление Р, МПа					
	0,101	1,96	4,96	9,82	19,61	29,42
280	28,8	130,0	132,2	137,3	141,8	147,7
300	31,2	122,1	123,4	128,3	133,0	139,3
320	32,4	113,3	115,5	120,0	126,6	133,4
340	35,8	106,2	108,2	113,8	121,4	126,3
360	38,3	98,2	103,1	107,3	113,8	122,0
370	39,5	96,2	98,4	104,4	111,0	119,3
380	40,7	93,0	95,5	101,2	108,7	117,0
390	40,1	-	91,8	88,3	106,6	114,5
400	43,4	-	89,8	94,7	104,5	112,5
410	44,7	-	90,6	93,8	101,6	110,8

420	46,0	-	87,0	-	101,0	108,6
430	48,4	-	-	-	100,3	108,5
440	48,8	53,6	-	-	96,8	107,4
450	50,2	54,5	-	87,8	98,6	106,4
460	51,6	56,4	66,4	86,0	96,8	104,8
480	54,5	53,3	66,1	83,2	95,1	102,5
500	56,4	60,5	66,6	80,3	92,6	100,4
520	60,5	62,3	66,1	76,3	91,6	99,0
540	63,6	65,2	68,9	76,4	91,1	98,5
560	66,7	68,5	71,1	80,3	91,5	98,5
580	70,9	73,5	75,7	81,4	90,3	99,9
600	73,0	74,7	76,5	83,5	88,7	99,3

Таблица 3.4. Теплопроводность ( $\lambda \cdot 10^3$ , Вт/(м К)), системы (н-бутан + 2,5 % ОУНТ) при различных температурах и давлениях (газообразная и жидкая фазы).

Т, К	Давление Р, Мпа					
	0,101	1,96	4,96	9,82	19,61	29,42
280	35,5	137,0	139,2	144,3	148,8	152,7
300	38,2	129,1	130,4	135,3	140,0	146,3
320	39,4	120,3	122,5	127,0	133,6	140,4
340	42,8	113,2	115,2	120,8	128,4	133,3
360	43,3	105,2	110,1	114,3	120,8	129,0
370	46,5	101,2	105,4	111,4	118,0	126,3
380	47,7	100,0	102,5	108,2	115,7	124,0
390	47,1	-	98,8	102,3	112,6	124,5
400	50,4	-	96,8	101,7	111,5	119,5
410	51,7	-	99,6	100,8	107,6	117,8
420	53,0	-	95,5	-	108,0	115,6
430	55,4	-	-	-	107,3	115,5



440	55,8	60,6	-	-	106,8	114,4
450	57,2	61,5	-	94,8	105,6	113,4
460	58,6	61,4	73,4	86,0	101,8	111,8
480	62,5	60,3	73,1	90,2	102,1	109,5
500	63,4	67,5	73,6	87,3	99,6	107,4
520	67,5	69,3	73,1	83,3	98,6	106,0
540	70,6	72,2	75,9	83,4	98,1	105,5
560	73,7	73,5	78,1	87,3	98,5	105,5
580	77,9	80,5	82,7	88,4	97,3	106,9
600	80,0	81,7	83,5	90,5	96,7	106,3

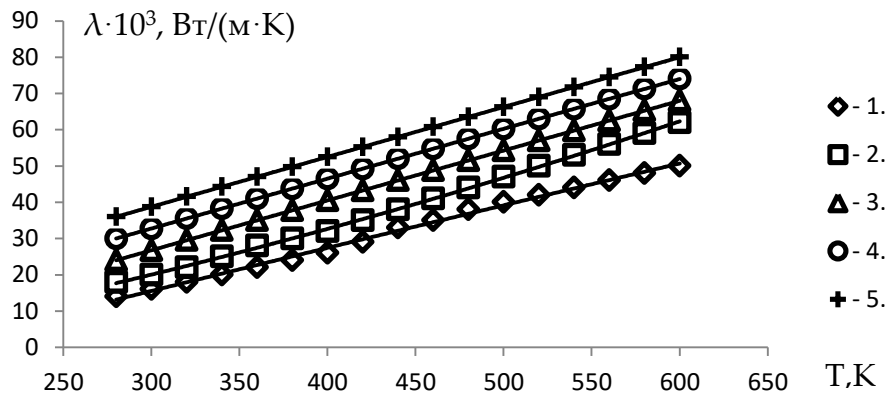


Рисунок 3.1. График зависимости коэффициента теплопроводности газобразного н-бутана ( $p = 0,101 \text{ МПа}$ ) с различной концентрацией одностенных углеродных нанотрубок (ОУНТ) от температуры: (Образец №1 - н-бутан); (Образец №2 - (н-бутан+1.0% ОУНТ)); (Образец №3 - (н-бутан +1.5% ОУНТ)); (Образец №4 - (н-бутан+2.0% ОУНТ)); (Образец №5 - (н-бутан+2.5% ОУНТ))

График, приведенный на рисунке 3.1, построен на основе экспериментальных и литературных данных для газобразного н-бутана при различных температурах, концентрациях одностенных углеродных нанотрубок и атмосферном давлении. Как видно из таблиц 3.1-3.4, по которым нами составлен график на рисунке 3.1, теплопроводность данной системы с ростом температуры и концентрации ОУНТ растет по экспоненциальному закону. С добавкой ОУНТ коэффициент эффективной теплопроводности коллоидных наножидкостей растет таким образом: добавка 0,4% одностенных углеродных нанотрубок в химически чистый н-бутан при температуре 280К увеличивает эффективную

теплопроводность растворов хладагентов. Например, при  $T=280\text{K}$ , 1,38 раз повышается теплопроводность газообразного хладагента н-бутана; при  $450\text{K}$  теплопроводность раствора растет на 56,2%, при  $T=600\text{K}$ , это увеличение достигает 42,3% [166-А, 167-А, 168-А, 172-А, 174-А, 175-А, 176-А; 177-А, 179-А, 180-А, 183-А, 184-А, 185-А, 190-А].

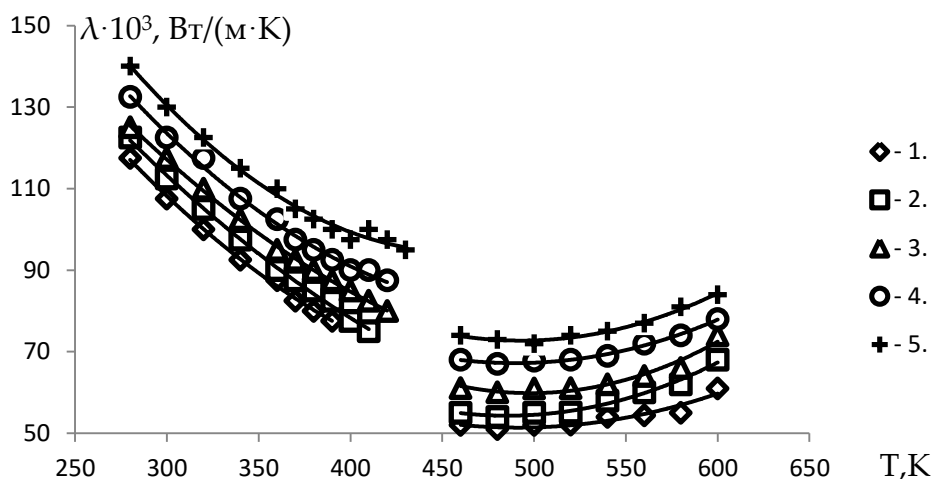


Рисунок 3.2. График зависимости коэффициента теплопроводности жидкого н-бутана ( $p=4,96$  МПа) при различной концентрации одностенных углеродных нанотрубок (ОУНТ) от температуры: (Образец №1-н-бутан); (Образец №2-(н-бутан+1.0% ОУНТ)); (Образец №3-(н-бутан+ 1.5%ОУНТ)); (Образец №4-(н-бутан+2.0% ОУНТ)); (Образец №5-(н-бутан+2.5% ОУНТ))

На рисунке 3.2 и таблицах 3.1 и 3.4 представлен и показан график зависимости коэффициента эффективной теплопроводности коллоидных наножидкостей системы н-бутана с добавкой разной концентрации одностенных углеродных нанотрубок (ОУНТ) (0-2,5%) при различных температурах и давлении ( $p=4,96$ МПа).

Как видно, из данного графика при постоянном давлении ( $p=4,96$ МПа) теплопроводность исследуемых наножидкостей, т.е. системы н-бутана и одностенных углеродных нанотрубок в жидкой фазе, с повышением температуры до  $410\text{K}$  уменьшается почти по линейному закону, а далее при увеличении температуры более чем  $460\text{K}$ , теплопроводность рассматриваемой системы повышается согласно экспоненциальному закону, это свидетельствует о том, что при данном температурном интервале раствор находится в газовой фазе. Показано, что с ростом концентрации добавок (ОУНТ) плотность растворов также растет. Находясь в жидком состоянии в интервале температуры от  $280$  до  $400\text{K}$

теплопроводность системы изменяется следующим образом: при добавке в хладагент 2,5%. УНТ и  $T=280\text{K}$  теплопроводность системы повышается на 20,1%, при  $T=390\text{K}$  на 28,6%, а при  $T=410\text{K}$  она увеличивается до 36,1%. Было установлено, что в жидкой фазе добавка ОУНТ в хладагент приводит к повышению теплопроводности растворов, а в паровое состояние хладагента (н-бутана) к понижению теплопроводности. В интервале температур (460-600) К теплопроводность уменьшается по следующим закономерностям:  $T=460\text{K}$ , теплопроводность растет на 41,3%, при  $T=520\text{K}$ , теплопроводность растет на 40,9%, при  $T=600\text{K}$  это изменение соответствует 39,9% [166-А, 167-А, 168-А, 172-А, 174-А, 175-А, 176-А, 177-А, 179-А, 180-А, 183-А, 184-А; 185-А, 190-А, 191-А, 192-А, 193-А].

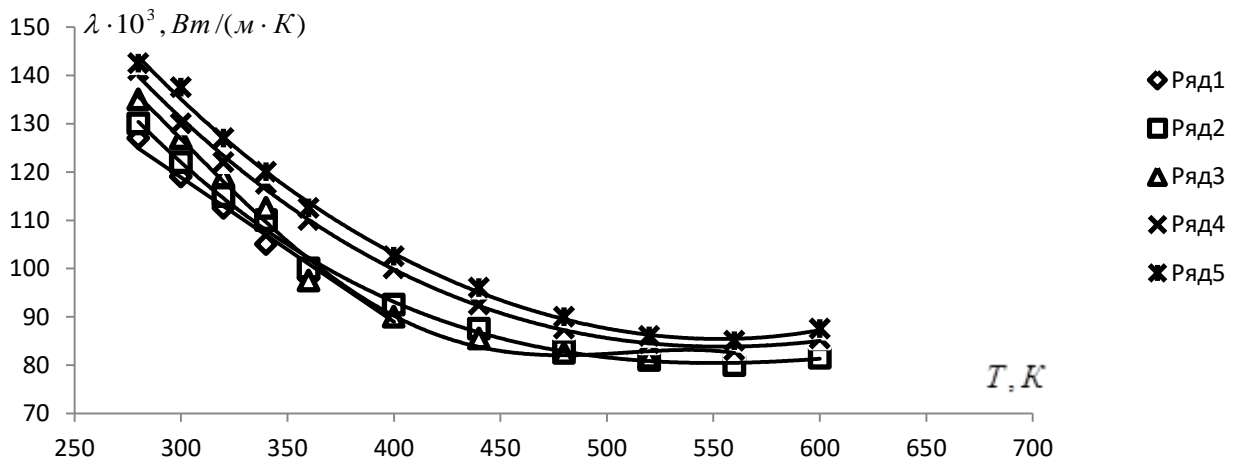


Рисунок 3.3. График зависимости коэффициента теплопроводности жидкого н-бутана ( $p=19,61$  МПа) при различной концентрации одностенных углеродных нанотрубок (ОУНТ) от температуры: (Образец №1-н-бутан); (Образец №2-(н-бутан+1.0% ОУНТ)); (Образец №3-(н-бутан +1.5%ОУНТ)); (Образец №4-(н-бутан+2.0% ОУНТ)); (Образец №5-(н-бутан+2.5% ОУНТ))

На рисунке 3.3 и таблицах 3.1 и 3.4 представлены и показан график зависимости коэффициента эффективной теплопроводности коллоидных наножидкостей системы н-бутана и одностенных углеродных нанотрубок (ОУНТ) разной массовой концентрации (0-2,5%) при различных температурах и давлении ( $p=19,61$  МПа). Как видно, из данного графика при постоянном давлении ( $p=19,61$  МПа) теплопроводность исследуемых наножидкостей (н-бутан и

одностенные углеродные нанотрубки) с повышением температуры, находясь в жидкой фазе до температуры 410 К уменьшается почти по линейному закону, а далее при росте температуры выше показателя 460К теплопроводность увеличивается по экспоненциальному закону, т.е. в этом температурном диапазоне наножидкость переходит в газовое состояние. Повышение концентрации (ОУНТ) приводит к увеличению теплопроводности коллоидных наножидкостей. В жидкой фазе в интервале температуры (280-600)К, теплопроводность изменяется по следующим закономерностям. При температуре 280К, с введением до 2,5% одностенных углеродных нанотрубок, теплопроводная способность системы повышается на 16,7%, при T=400К она повышается на 22,7%, при T=500К на 26,9%, а при T=600 К этот показатель увеличивается на 26,1%. В жидкой фазе добавка ОУНТ приводит к повышению теплопроводности растворов, а добавка ОУНТ в паровое состояние хладагента (н-бутан) к понижению теплопроводности исследуемых наножидкостей. В интервале температур (450-600)К теплопроводность уменьшается следующим образом: при T=450К теплопроводность растет на 25,3%, при T= 530К, теплопроводность растет на 31,6 %, а при T=600К это изменение будет равным 25,2% [166-А, 167-А, 168-А, 172-А, 174-А, 175-А, 176-А, 177-А, 179-А, 180-А, 183-А, 184-А, 190-А, 191-А, 192-А, 193-А].

### 3.1.3. Теплопроводность изобутана +ОУНТ

На рисунке 3.5 и таблицах 3.5 - 3.8 представлена зависимость коэффициента эффективной теплопроводности коллоидных наножидкостей системы изобутана (2-метилпропан) и одностенных углеродных нанотрубок (ОУНТ) в пределах изменения концентрации (0-2,5%), температуры при давлении ( $p=19,61$ МПа). Результаты исследования теплопроводности системы изобутана (2-метилпропан) при T=(300÷630)К и P=(0,101) МПа в паровой, а в жидкой фазе до P= (29,42МПа).

**Таблица 3.5.** Теплопроводность ( $\lambda \cdot 10^3$ , Вт/(м К)), системы (изобутан (2-метилпропан) + 0,1% ОУНТ) при различных температурах и давлениях

(газообразная и жидкая фазы) [166-А, 167-А, 174-А, 175-А, 176-А, 177-А, 179-А, 180-А, 183-А, 184-А, 190-А, 191-А, 193-А].

Т,К	Давление Р, МПа					
	0,101	1,96	4,96	9,82	19,61	29,42
300	22,2	95,4	100,4	104,3	109,0	115,3
400	34,4	-	-	79,0	86,6	122,4
420	37,8	-	-	74,5	83,4	88,3
440	39,9	43,2	-	-	80,8	85,0
460	42,5	45,2	52,0	68,4	76,8	81,3
480	45,7	48,0	52,6	67,2	77,5	82,0
500	48,1	50,4	53,0	67,3	77,7	83,5
520	50,9	53,0	56,5	66,4	76,4	81,6
540	53,8	56,0	58,6	66,5	77,0	82,4
560	56,7	57,8	61,0	68,4	78,1	83,4
580	60,8	62,3	63,7	70,3	79,4	86,5
600	62,7	64,5	66,4	72,6	81,0	85,4
630	67,4	70,1	71,1	76,3	84,6	89,0

**Таблица 3.6.** Теплопроводность ( $\lambda \cdot 10^3$ , Вт/(м К)), системы (изобутан (2-метилпропан)+0,2 % ОУНТ) при различных температурах и давлениях (газообразная и жидкая фазы).

Т,К	Давление Р, МПа					
	0,101	1,96	4,96	9,82	19,61	29,42
300	29,2	112,4	116,4	120,3	125,0	131,3
400	41,4	-	-	94,2	102,6	112,4
420	43,8	-	-	90,5	99,4	104,3
440	46,9	59,2	-	-	96,8	101,0
460	47,5	61,2	68,0	84,4	94,8	97,3
480	52,7	64,0	68,6	83,2	92,5	98,0
500	53,1	66,4	69,0	83,3	93,7	99,5
520	57,9	69,0	72,5	83,4	91,4	97,6
540	60,8	72,0	74,6	81,5	94,0	99,4
560	63,7	76,8	77,0	84,4	94,1	99,4
580	67,8	78,3	80,7	86,3	95,4	102,5

600	69,7	79,5	83,4	88,6	97,0	101,4
630	74,4	82,6	86,1	92,3	94,6	105,0

**Таблица 3.7.** Теплопроводность ( $\lambda \cdot 10^3$ , Вт/(м К)), системы (изобутан (2-метилпропан)+0,3% ОУНТ) при различных температурах и давлениях (газообразная и жидкая фазы).

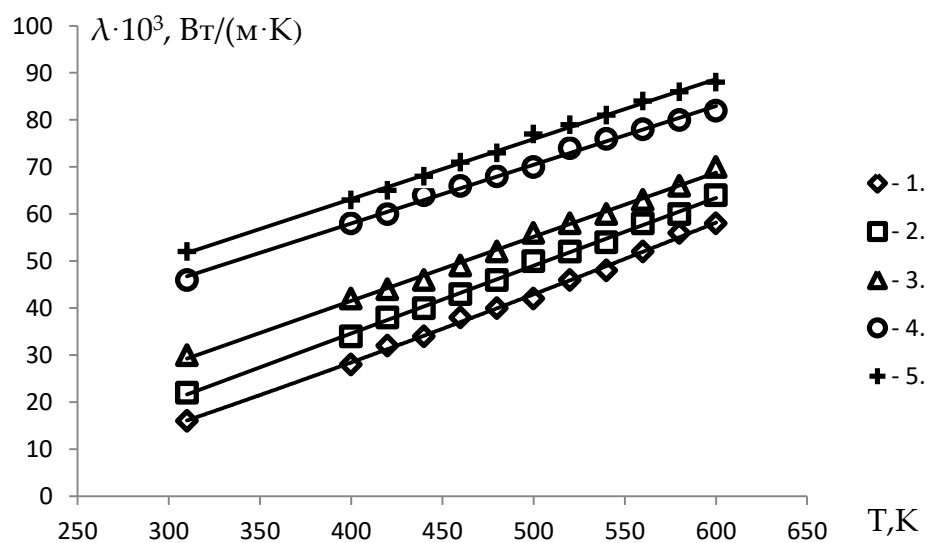
Т,К	Давление Р, МПа					
	0,101	1,96	4,96	9,82	19,61	29,42
300	46,2	120,4	123,4	131,3	137,0	144,3
400	58,4	-	-	100,5	105,6	119,4
420	60,8	-	-	95,5	102,4	105,3
440	63,9	68,2	-	-	96,8	103,0
460	64,5	69,2	73,0	89,4	94,8	97,3
480	69,7	71,0	75,6	86,2	93,5	96,0
500	73,1	73,4	76,0	85,3	92,7	98,5
520	73,9	76,0	79,5	86,4	92,4	96,6
540	76,8	79,0	82,6	86,5	93,0	98,4
560	79,7	84,8	86,0	89,4	94,1	99,4
580	82,8	86,3	91,7	93,3	96,4	104,5
600	86,7	90,5	94,4	96,6	100,0	108,4
630	90,4	94,1	98,1	102,3	106,6	111,0

**Таблица 3.8.** Теплопроводность ( $\lambda \cdot 10^3$ , Вт/(м К)), системы (изобутан (2-метилпропан)+0,4% ОУНТ) при различных температурах и давлениях (газообразная и жидкая фазы).

Т,К	Давление Р, МПа					
	0,101	1,96	4,96	9,82	19,61	29,42
300	48,2	128,4	137,4	143,3	156,0	162,3
400	60,4	-	-	93,0	112,6	129,4
420	62,8	-	-	91,5	99,4	104,3
440	64,9	72,4	-	-	96,8	101,0
460	66,5	72,2	79,0	85,4	94,8	98,3
480	68,7	74,0	80,6	84,2	94,5	99,0
500	71,1	77,4	83,0	86,3	94,7	98,5

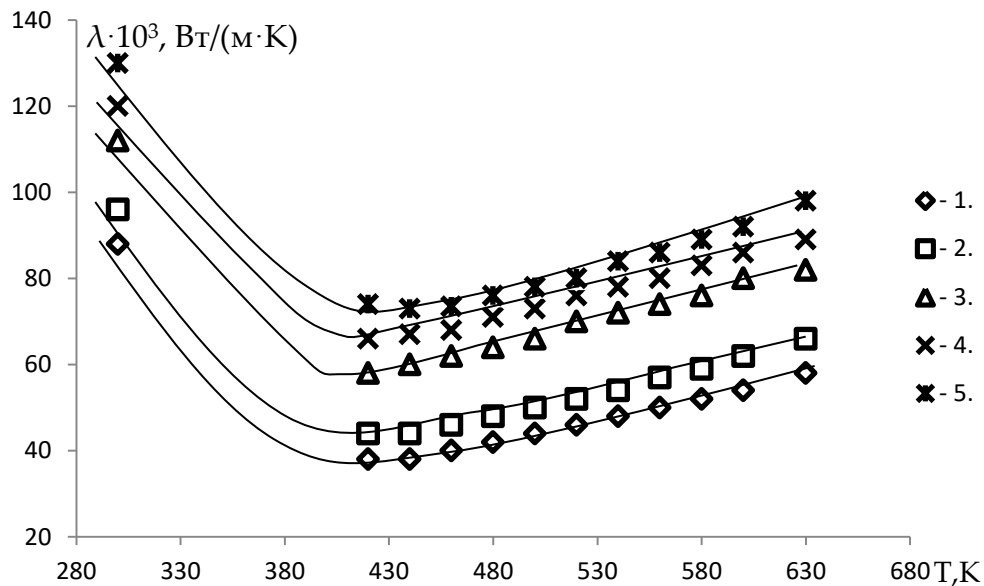
520	74,9	80,0	84,5	87,4	93,4	98,6
540	78,8	83,0	86,6	89,5	95,0	99,4
560	81,7	84,8	89,0	95,4	96,1	100,4
580	83,8	89,3	94,7	97,3	98,4	102,5
600	85,7	92,5	98,4	100,6	102,0	105,4
630	90,4	97,1	102,1	105,3	106,6	109,0

График, приведенный на рисунке 3.4, получен экспериментально и на основе литературных данных для газообразного изобутана (2-метилпропан) при различных температурах, концентрации одностенных углеродных нанотрубок и атмосферном давлении. Как видно из таблиц 3.5-3.8, по которым нами составлен график (рисунок 3.4), теплопроводность данных систем с ростом температуры и концентрации ОУНТ растет по линейному закону. С добавкой ОУНТ коэффициент эффективной теплопроводности коллоидных наножидкостей растет, таким образом: добавка 0,4% одностенных углеродных нанотрубок в газообразный изобутан (2-метилпропан) при температуре 300К повышает эффективную теплопроводность хладагентов в 2,03 раза, при 400К в 1,02 раза, при T=500К теплопроводность газообразного изобутана (2-метилпропан) растет на 70,6%, а для 600К это увеличение достигает лишь 49,1% [166-А, 167-А, 174-А, 176-А, 177-А, 179-А, 184-А, 185-А, 191-А, 193-А].



**Рисунок 3.4.** График зависимости коэффициента теплопроводности газообразного изобутана ( $P=0,101$  МПа) при различной концентрации одностенных углеродных нанотрубок (ОУНТ) от температуры: (Образец №1-изобутан); (Образец №2-(изобутан+1.0% ОУНТ)); (Образец №3-

(изобутан+1.5% ОУНТ); (Образец №4-(изобутан+2.0% ОУНТ); (Образец №5-(изобутан+2.5% ОУНТ))



**Рисунок 3.5.** График зависимости коэффициента теплопроводности жидкого и газообразного изобутана ( $p=2,5$ МПа) при различной концентрации одностенных углеродных нанотрубок (ОУНТ) от температуры: (Образец №1-изобутан); (Образец №2-(изобутан+1.0% ОУНТ); (Образец №3-(изобутан+1.5% ОУНТ); (Образец №4-(изобутан+2.0% ОУНТ); (Образец №5-(изобутан +2.5% ОУНТ))

Как видно, из данного графика при постоянном давлении ( $p=2,5$ МПа) теплопроводность исследуемых наножидкостей системы изобутана (2-метилпропан) и одностенных углеродных нанотрубок с повышением температуры в жидкой фазе до температуры до 410 К уменьшается почти по линейному закону, а далее при увеличении температуры более 420К теплопроводность растет по экспоненциальному закону, т.е. при данном температурном диапазоне (420-630)К, наножидкость находится в газовой фазе. Повышение концентрации (ОУНТ) приводит к увеличению теплопроводности коллоидных наножидкостей. В жидкой фазе в интервале температуры (300-410)К, теплопроводность изменяется по следующим закономерностям: при температуре 300К добавка одностенных углеродных нанотрубок до 2,5% приводит к росту теплопроводности на 37,6%, при температуре  $T=420$ К теплопроводность растет в 1,12 раза, при температуре 500К теплопроводность данного раствора растет на 72,4%, а при  $T=600$  К теплопроводность растет на 58,7%. В жидкой фазе добавка ОУНТ приводит к повышению теплопроводности растворов, а добавка ОУНТ в паровое состояние хладагента (изобутан (2-метилпропан)) к понижению теплопроводности



исследуемых наножидкостей. В интервале температур (420-630)К теплопроводность уменьшается по следующим закономерностям: при  $T=450\text{K}$  теплопроводность растет на 89,7%, при  $T=550\text{K}$  теплопроводность растет на 67,2%, при  $T=630\text{K}$  это изменение будет равным 59,7% [166-А, 167-А, 174-А, 175-А, 176-А, 177-А, 179-А, 180-А, 183-А, 184-А, 190-А, 191-А, 192-А, 193-А].

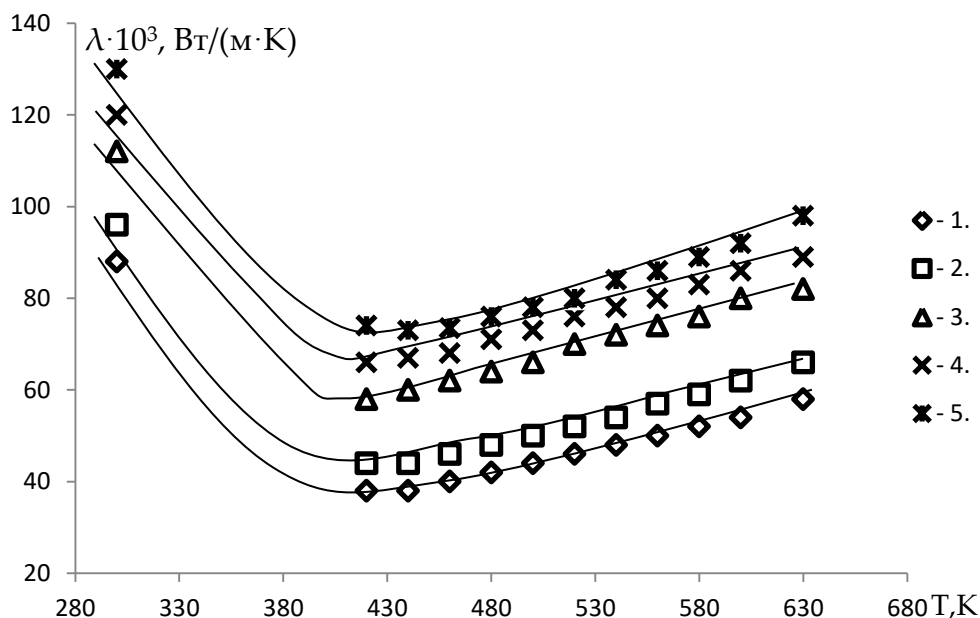


Рисунок 3.6. График зависимости коэффициента теплопроводности жидкого и газообразного изобутана ( $P=4,96\text{МПа}$ ) при различной концентрации одностенных углеродных нанотрубок (ОУНТ) от температуры: (Образец №1-изобутан); (Образец №2-(изобутан+1.0% ОУНТ)); (Образец №3-(изобутан+1.5% ОУНТ)); (Образец №4-(изобутан+2.0% ОУНТ)); (Образец №5-(изобутан+2,5% ОУНТ))

Как видно из данного графика (рисунок 3.6), при постоянном давлении ( $P=4,96\text{МПа}$ ) теплопроводность исследуемых наножидкостей системы изобутана (2-метилпропан) в жидкой фазе и одностенных углеродных нанотрубок с повышением температуры до 450 К уменьшается почти по линейному закону, а далее при повышении температуры более чем на 460К их теплопроводная способность повышается по экспоненциальному закону, т.е. при данном температурном диапазоне (460-630)К наножидкость переходит в газовое состояние. Повышение концентрации (ОУНТ) приводит к увеличению теплопроводности коллоидных наножидкостей. В жидкой фазе в интервале температуры (300-410)К, теплопроводность изменяется по следующим закономерностям: при температуре 300 К и добавке одностенных углеродных нанотрубок до 0,4г. теплопроводность растет на 44,9%, при температуре 460К теплопроводность

растет на 71,7%, при температуре 600К теплопроводность исследуемого раствора растет на 57,8%, а при  $T=630\text{K}$  теплопроводность растет на 52,6%. В жидкой фазе добавка ОУНТ приводит к повышению теплопроводности растворов, а добавка ОУНТ в паровое состояние хладагента (изобутан (2-метилпропан)) при температурном диапазоне (420-630)К к понижению теплопроводности исследуемых наножидкостей.

Как видно, из данного графика (рисунок 3.7), при постоянном давлении ( $P=9,82\text{МПа}$ ) теплопроводность исследуемых наножидкостей системы изобутана (2-метилпропан) в жидкой фазе и одностенных углеродных нанотрубок с повышением температуры до 400 К уменьшается почти по линейному закону, а в последующем при росте температуры более чем на 450К теплопроводная способность системы повышается по экспоненциальному закону, т.е. в данном температурном диапазоне (450-630)К наножидкость переходит в газовую фазу. Повышение концентрации (ОУНТ) способствует росту коэффициента теплопроводности рассматриваемых коллоидных наножидкостей. В жидкой фазе в интервале температуры (300-400)К теплопроводность изменяется по следующим закономерностям: при температуре 300К и добавке одностенных углеродных нанотрубок до 0,4г. теплопроводность растет на 35,1%, при температуре 400К, теплопроводность растет на 42,2%, при температуре 500К теплопроводность данного раствора растет на 41,2%, а при  $T=600\text{K}$  теплопроводность растет на 43,3%.

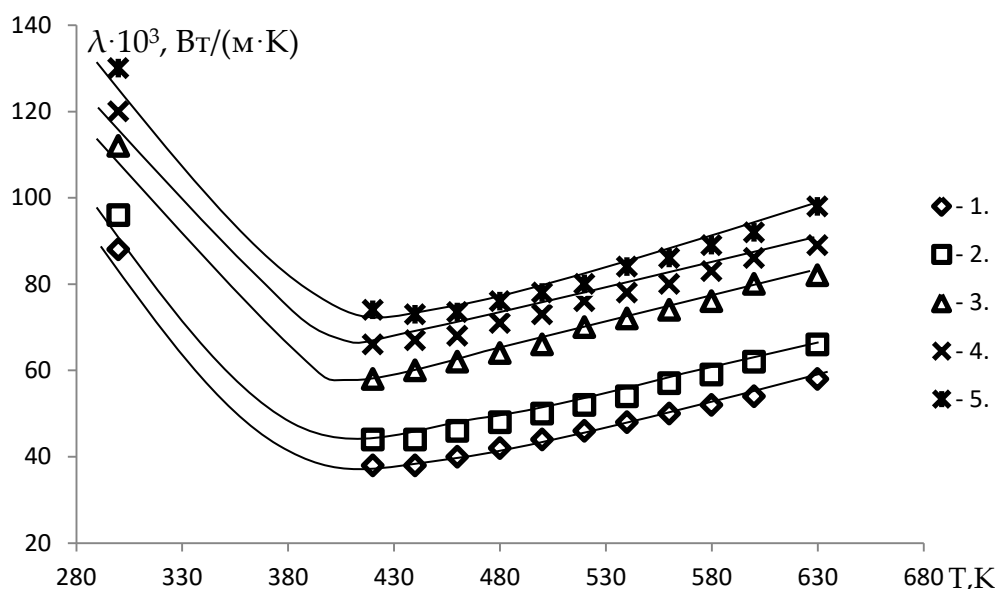


Рисунок 3.7. График зависимости коэффициента теплопроводности жидкого изобутана ( $P=9,81$  МПа) при различной концентрации одностенных углеродных нанотрубок (ОУНТ) от температуры: (Образец №1-изобутан); (Образец №2-(изобутан+1.0% ОУНТ)); (Образец №3-(изобутан+1.5% ОУНТ)); (Образец №4-(изобутан+2.0% ОУНТ)); (Образец №5-(изобутан+2.5% ОУНТ))

В жидкой фазе добавка ОУНТ приводит к повышению теплопроводности растворов, а добавка ОУНТ в паровое состояние хладагента (изобутан (2-метилпропан)) к понижению теплопроводности исследуемых наножидкостей в интервале температур (420-630)К [167-А, 172-А, 174-А, 176-А, 180-А, 190-А].

### 3.1.4. Теплопроводность н-бутана +МУНТ

Для выявления разности эффективной теплопроводности между изобутаном и н-бутаном к нему добавили многостенные углеродные нанотрубки (МУНТ) в количестве от 0 до 2.5% таблиц 3.9-3.12. [166-А, 169-А, 172-А, 174-А, 176-А, 178-А, 179-А, 184-А, 190-А, 191-А, 192-А].

**Таблица 3.9.** Теплопроводность ( $\lambda \cdot 10^3$ , Вт/(м К)), системы (н-бутан + 0,1% МУНТ) при различных температурах и давлениях (газообразная и жидкая фазы).

Т, К	Давление P, МПа					
	0,101	1,96	4,96	9,82	19,61	29,42
280	21,5	123,0	125,2	130,3	134,8	140,7
300	24,2	115,1	116,4	121,3	126,0	132,3
320	26,4	106,3	108,5	113,0	119,6	126,4

340	28,8	101,2	101,2	106,8	114,4	120,3
360	31,3	92,2	94,1	100,3	106,8	115,0
370	32,5	89,2	91,4	97,4	104,0	112,3
380	33,7	86,0	88,5	94,2	101,7	110,0
390	35,1	-	85,8	91,3	99,6	107,5
400	36,4	-	82,8	88,7	97,5	105,5
410	37,7	-	80,6	86,8	95,6	103,8
420	39,0	-	-	-	94,0	102,6
430	41,4	-	-	-	93,3	101,5
440	41,8	46,6	-	-	90,8	100,4
450	43,2	47,5	-	80,8	92,6	99,4
460	44,6	49,4	59,4	79,0	90,8	97,8
480	47,5	46,3	59,1	76,2	88,1	95,5
500	50,4	53,5	59,6	73,3	85,6	93,4
520	53,5	55,3	60,1	72,3	84,6	92,0
540	56,6	58,2	61,9	72,4	84,1	91,5
560	59,7	61,5	64,1	73,3	84,5	91,5
580	63,9	64,5	66,7	73,4	83,3	91,9
600	66,0	67,7	69,5	75,5	82,7	92,3

График, представленный на рисунке 3.8, построен на основе экспериментальных и литературных данных для газообразного н-бутана в условиях изменения температуры, концентрации добавок (МУНТ) и при постоянном атмосферном давлении. Согласно данным таблиц 3.9-3.12 (рисунок 3.8), по итогам увеличения концентрации нанодобавок и температуры опыта, наблюдается экспоненциальный рост теплопроводности изучаемых систем.

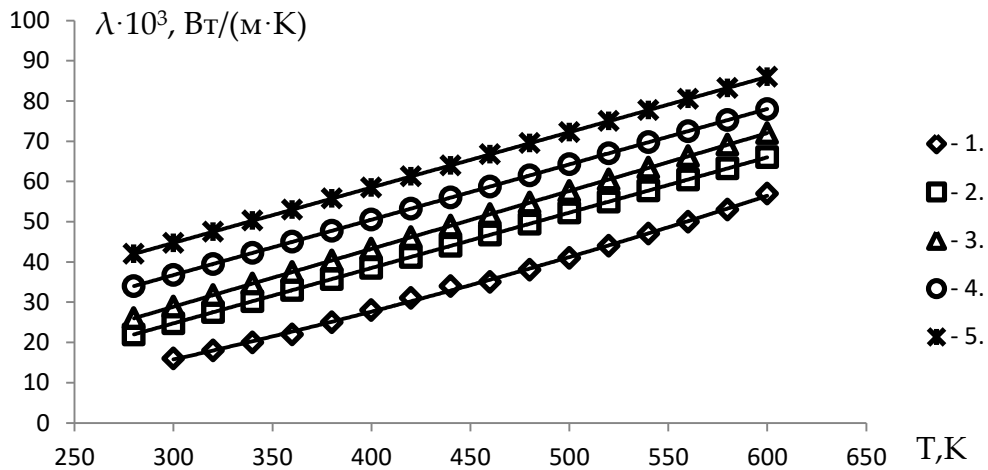


Рисунок 3.8. График зависимости коэффициента теплопроводности газобразного н-бутана ( $p=0,101$ МПа) при различной концентрации многостенных углеродных нанотрубок (МУНТ) от температуры: (Образец №1-н-бутан); (Образец №2-(н-бутан+1.0% МУНТ); (Образец №3-(н-бутан+1.5% МУНТ); (Образец №4-(н-бутан+2.0% МУНТ); (Образец №5-(н-бутан+2.5% МУНТ))

С добавкой МУНТ коэффициент эффективной теплопроводности коллоидных наножидкостей растет следующим образом: добавка 0,4% одностенных и многостенных углеродных нанотрубок в химически чистый н-бутан при заданной температуре (280К) способствует повышению значения коэффициента эффективной теплопроводности растворов хладагентов в 2,0 раза; при 400К рост теплопроводности составляет 89,8%, при  $T=500$ К теплопроводность данного хладагента растет на 61,35, а при температуре 600К это увеличение достигает 47,5% [167-А, 172-А, 174-А, 177-А, 179-А, 183-А, 184-А, 185-А, 190-А, 191-А, 193-А].

**Таблица 3.10.** Теплопроводность ( $\lambda \cdot 10^3$ , Вт/(м К)) системы (н-бутан +0,2% МУНТ) при различных температурах и давлениях (газообразных и жидких).

Т, К	Давление Р, МПа					
	0,101	1,96	4,96	9,82	19,61	29,42
280	26,4	128,0	130,2	135,3	139,8	145,7
300	29,2	120,1	121,4	126,3	131,0	137,3
320	31,4	111,3	113,5	118,0	124,6	131,4
340	33,8	104,2	106,2	111,8	119,4	125,3
360	36,3	96,2	99,1	105,3	111,8	120,0
370	37,5	94,2	96,4	102,4	109,0	117,3

380	38,7	91,0	93,5	99,2	106,7	115,0
390	40,1	-	90,8	86,3	104,6	112,5
400	41,4	-	87,8	93,7	102,5	110,5
410	42,7	-	85,6	90,8	100,6	108,8
420	44,0	-	-	-	99,0	106,6
430	46,4	-	-	-	98,3	106,5
440	46,8	51,6	-	-	94,8	105,4
450	48,2	52,5	-	85,8	96,6	104,4
460	49,6	54,4	64,4	85,0	94,8	102,8
480	52,5	53,3	64,1	81,2	93,1	100,5
500	54,4	58,5	64,6	81,3	90,6	98,4
520	58,5	60,3	64,1	76,3	89,6	97,0
540	61,6	63,2	67,0	76,4	89,1	96,5
560	64,7	66,5	70,1	80,3	89,5	96,5
580	68,9	69,5	73,7	80,4	88,3	97,9
600	71,0	72,7	77,5	81,5	86,7	98,3

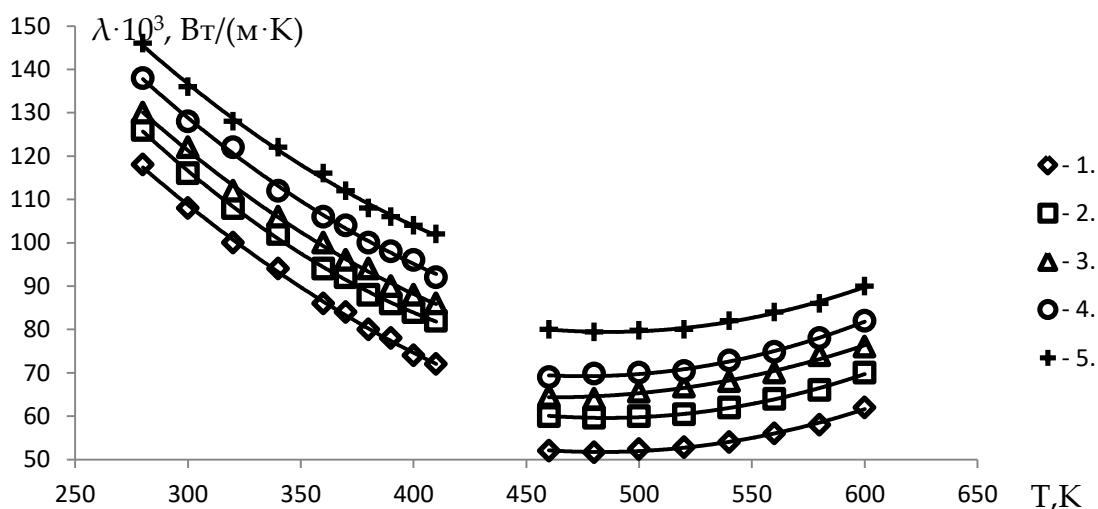


Рисунок 3.9. График зависимости коэффициента теплопроводности жидкого и газообразного н-бутана ( $p=4,96$  МПа) при различной концентрации многостенных углеродных нанотрубок (МУНТ) от температуры: (Образец №1-н-бутан); (Образец №2-(н-бутан+1.0% МУНТ); (Образец №3-(н-бутан+1.5% МУНТ);(Образец №4-(н-бутан+2.0% МУНТ);(Образец №5-(н-бутан + 2.5% МУНТ))

Как видно из данного графика (рисунок 3.9), при постоянном давлении ( $P=4,96$  МПа) теплопроводность исследуемых наножидкостей системы изобутана (2-метилпропан) в жидкой фазе и многостенных углеродных нанотрубок с

повышением температуры до 410К уменьшается практически по линейному закону, а с дальнейшим ростом температуры более, чем на 450К теплопроводная способность системы увеличивается по экспоненциальному закону, т.е. при данном температурном диапазоне (460-630)К наножидкость переходит в газовое состояние. Увеличение концентрации (МУНТ) способствует росту теплопроводности изучаемых наножидкостей. В жидкой фазе при T= (300-410) К, теплопроводность исследуемых систем изменяется следующим образом: при добавлении многостенных углеродных нанотрубок до 2,5% и температуре 300К теплопроводность повышается на 23,6%, при температуре 400К она растет на 39,7%, при температуре 460К теплопроводность данного раствора растет на 52,5%., при T= 550К теплопроводность растет на 53,1%, а при температуре T=600К теплопроводность исследуемого раствора растет на 43,5%. [174-А, 176-А, 179-А, 191-А, 192-А]. Добавка МУНТ в жидкую фазу приводит к повышению теплопроводности растворов, а их добавление в паровое состояние хладагента (н-бутан) к понижению теплопроводности исследуемых наножидкостей в интервале температур (460-630)К.

Таблица 3.11. Теплопроводность ( $\lambda \cdot 10^3$ , Вт/(м К)), системы (н-бутан+ 0,3% МУНТ) при различных температурах и давлениях (газообразная и жидкая фазы).

Т,К	Давление P, МПа					
	0,101	1,96	4,96	9,82	19,61	29,42
280	33,8	135,0	137,2	142,3	146,8	152,7
300	36,2	127,1	128,4	133,3	138,0	144,3
320	37,4	118,3	120,5	125,0	131,6	138,4
340	40,8	111,2	113,2	118,8	126,4	131,3
360	42,3	102,2	107,1	112,3	118,8	125,0
370	44,5	100,2	103,4	109,4	116,0	121,3
380	44,7	98,0	100,5	106,2	113,7	118,0
390	45,1	-	98,8	103,3	111,6	115,5
400	47,8	-	94,8	99,7	108,5	113,5
410	49,7	-	92,6	98,8	105,6	111,8
420	51,0	-	-	-	106,0	109,6

430	52,4	-	-	-	105,3	108,5
440	53,8	58,6	-	-	101,8	107,4
450	55,2	59,5	-	92,8	102,6	106,4
460	56,6	56,4	71,4	91,0	101,8	104,8
480	59,5	58,3	71,1	88,2	100,1	103,5
500	61,4	65,5	71,6	80,3	97,6	101,4
520	65,5	67,3	72,1	76,3	96,6	100,0
540	68,6	70,2	73,9	76,4	96,1	99,5
560	71,7	72,5	77,4	80,3	96,5	99,6
580	75,9	78,5	78,7	81,4	95,3	100,9
600	78,0	79,7	82,5	83,5	93,7	102,3

Таблица 3.12. Теплопроводность ( $\lambda \cdot 10^3$ , Вт/(м К)), системы (н-бутан + 0,4 % МУНТ) при различных температурах и давлениях (газообразная и жидкая фазы).

Т, К	Давление Р, МПа					
	0,101	1,96	4,96	9,82	19,61	29,42
280	41,5	143,0	145,2	150,3	154,8	158,7
300	43,2	135,1	136,4	141,3	146,0	152,3
320	45,4	126,3	128,5	133,0	139,6	146,4
340	47,8	119,2	121,2	126,8	134,4	139,3
360	49,3	111,2	116,1	120,3	126,8	135,0
370	52,5	107,2	111,4	117,4	124,0	131,3
380	53,7	106,0	108,5	114,2	121,7	129,0
390	54,1	-	106,8	108,3	117,6	127,5
400	56,4	-	104,8	107,7	117,5	125,5
410	57,7	-	102,6	106,8	113,6	123,8
420	58,5	-	-	-	114,0	121,6
430	61,4	-	-	-	111,3	121,5
440	61,8	66,6	-	-	109,8	120,3
450	62,2	67,5	-	100,8	111,6	119,4
460	64,6	67,4	79,4	92,0	107,8	117,8
480	69,5	66,3	79,1	96,2	108,1	115,5
500	71,4	73,5	79,6	93,3	105,6	113,4
520	73,5	75,3	80,1	89,3	104,6	111,0



540	76,6	78,2	81,9	89,4	104,1	111,5
560	79,7	79,5	83,1	93,3	104,5	111,8
580	83,9	86,5	86,7	94,4	103,3	111,9
600	86,0	87,7	89,5	96,5	101,7	112,3

На рисунке 3.10 представлен график зависимости теплопроводности растворов хладагента жидкого н-бутана в интервале температуры (280-600)К от концентрации многостенных углеродных нанотрубок (МУНТ), которые составляют от 0 до 2,5%. Данные, представленные в таблицах 3,9-3.11, получены экспериментальным путем с использованием метода цилиндрического бикалориметра регулярного теплового режима первого рода.

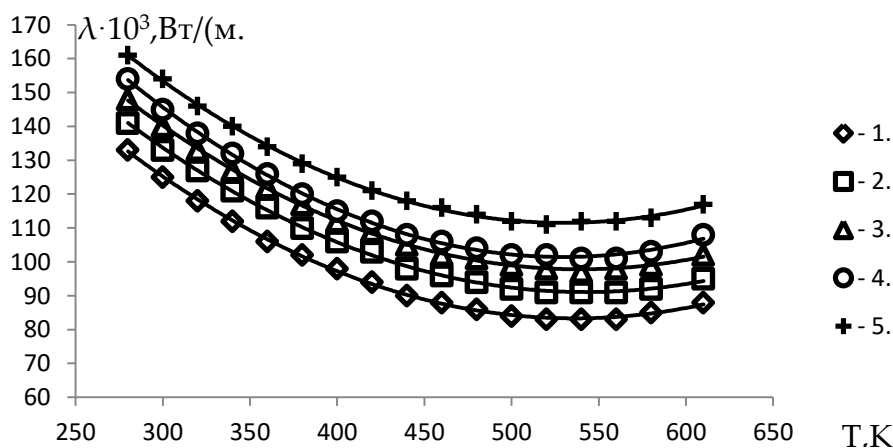


Рисунок 3.10. График зависимости коэффициента теплопроводности жидкого н-бутана ( $P=29,42$  МПа) при различной концентрации многостенных углеродных нанотрубок (МУНТ) от температуры: (Образец №1-н-бутан); (Образец №2-(н-бутан+1.0% МУНТ); (Образец №3-(н-бутан +1.5% МУНТ); (Образец №4-(н-бутан+2.0% МУНТ); (Образец №5-(н-бутан+2.5% МУНТ))

Как видно, из данного графика (рисунок 3.10) при постоянном давлении ( $P=29,42$  МПа) теплопроводность исследуемых наножидкостей системы н-бутана в жидкой фазе и многостенных углеродных нанотрубок с повышением температуры до 410К уменьшается согласно линейному закону, а с дальнейшим ростом температуры более, чем на 650К теплопроводность системы начинает возрастать по экспоненциальному закону, это свидетельствует о том, что при данном температурном диапазоне (460-630)К наножидкость переходит в газовую фазу. Увеличение концентрации (МУНТ) способствует росту теплопроводности изучаемых наножидкостей. В жидкой фазе при  $T=(300-410)$ К теплопроводность

исследуемых наножидкостей изменяется следующим образом: при добавлении многослойных углеродных нанотрубок в жидкость до 2,5% и температуре 280К теплопроводность системы возрастает на 20,3 %, при температуре 400 К теплопроводность системы увеличивается на 16,4%, при температуре 500К, теплопроводность данного раствора растет на 14,7%, а при T=600К теплопроводность растет на 34,5%. Установлено, что в жидкой фазе добавка МУНТ приводит к повышению теплопроводности растворов, однако добавка МУНТ в паровое состояние хладагента (н-бутан) к понижению теплопроводности исследуемых наножидкостей в интервале температур (460-630)К. При температуры T=600 или 630К, теплопроводность исследуемых растворов растет на 34,4%. [166-А, 168-А, 172-А, 174-А, 175-А, 179-А, 180-А, 183-А, 184-А, 185-А, 191-А, 192-А].

### 3.1.5. Теплопроводность изобутана (2-метилпропан) +МУНТ

Теплопроводность растворов хладагента (изобутан (2-метилпропан)) с многослойными углеродными нанотрубками (МУНТ) при различных температурах, давлениях и концентрациях этих наночастиц представлено в таблицах 3.13-3.16 [175-А, 179-А, 183-А, 184-А].

**Таблица 3.13.** Теплопроводность ( $\lambda \cdot 10^3$ , Вт/(м К)), системы (изобутан (2-метилпропан) + 1,0% МУНТ) при различных температурах и давлениях (газообразная и жидкая фазы).

Т,К	Давление P, МПа					
	0,101	1,96	4,96	9,82	19,61	29,42
300	29,2	102,4	107,4	111,3	115,0	124,3
400	41,4	-	-	83,0	95,2	103,4
420	44,8	-	-	81,5	90,4	98,3
440	46,9	50,2	-	-	87,8	94,0
460	49,5	52,2	59,0	75,4	83,8	92,3
480	52,7	53,0	59,6	74,2	84,5	91,0
500	55,1	57,4	60,0	74,3	84,7	90,5
520	57,9	60,0	63,5	73,4	84,4	91,6

540	60,8	64,0	65,6	73,5	84,9	92,4
560	63,7	64,8	68,0	75,4	86,1	93,4
580	67,8	69,3	68,7	77,3	88,4	94,5
600	69,7	71,5	73,4	79,6	90,0	96,4
630	74,4	77,1	77,1	83,3	92,6	97,8

**Таблица 3.14.** Теплопроводность ( $\lambda \cdot 10^3$ , Вт/(м К)), системы (изобутан (2-метилпропан)+1,5% МУНТ) при различных температурах и давлениях (газообразная и жидкая фазы).

Т,К	Давление P, МПа					
	0,101	1,96	4,96	9,82	19,61	29,42
300	36,2	119,4	123,4	127,3	131,0	136,3
400	48,4	-	-	106,0	109,6	112,4
420	50,8	-	-	97,5	106,4	107,3
440	53,9	63,2	-	-	103,8	103,0
460	56,0	68,2	75,0	91,4	101,8	102,3
480	58,2	71,0	75,6	90,2	99,5	101,0
500	61,1	73,4	76,0	90,3	100,7	101,5
520	64,2	76,0	79,5	89,4	98,4	101,6
540	67,3	79,0	81,6	88,5	101,0	104,4
560	69,4	80,8	84,0	91,4	104,1	106,4
580	72,8	85,3	87,7	93,3	105,4	108,9
600	74,6	86,5	90,4	95,6	106,0	109,4
630	78,4	87,1	93,1	99,3	107,6	112,0

**Таблица 3.15.** Теплопроводность ( $\lambda \cdot 10^3$ , Вт/(м К)), системы (изобутан (2-метилпропан)+2,0% МУНТ) при различных температурах и давлениях (газообразная и жидкая фазы).

Т,К	Давление P, МПа					
	0,101	1,96	4,96	9,82	19,61	29,42
300	44,2	128,4	130,4	139,3	142,0	146,3
400	56,4	-	-	100,0	117,6	123,4
420	58,8	-	-	97,5	113,4	119,3
440	61,9	76,2	-	-	109,8	115,0

460	63,5	76,2	81,0	91,4	107,8	113,3
480	65,7	78,0	83,6	89,2	105,5	111,0
500	68,1	81,4	84,0	90,3	104,7	112,5
520	70,9	84,0	86,5	89,4	105,4	113,6
540	72,8	87,0	90,6	91,5	106,0	114,4
560	75,7	92,8	94,0	96,4	107,1	115,4
580	77,4	96,3	100,7	102,3	110,4	118,5
600	80,7	98,5	103,4	107,6	111,5	119,4
630	84,4	102,1	105,1	111,3	114,6	120,0

Таблица 3.16. Теплопроводность ( $\lambda \cdot 10^3$ , Вт/(м К)), системы (изобутан (2-метилпропан)+2,5% МУНТ) при различных температурах и давлениях (газообразная и жидкая фазы).

Т,К	Давление Р, МПа					
	0,101	1,96	4,96	9,82	19,61	29,42
300	51,2	136,4	145,4	151,3	157,0	160,3
400	63,4	-	-	102,0	127,6	130,4
420	65,8	-	-	100,5	121,4	125,3
440	67,5	78,2	-	-	115,8	121,0
460	70,5	80,2	88,0	94,4	112,8	118,3
480	72,7	83,0	88,6	93,2	109,5	116,0
500	74,1	85,4	91,0	92,3	108,7	116,5
520	75,9	88,0	91,5	94,4	109,4	115,6
540	79,3	91,0	93,6	98,5	110,0	118,4
560	81,7	92,8	97,0	103,4	111,1	119,4
580	83,4	97,3	97,7	105,3	113,4	120,5
600	85,7	97,5	100,4	108,6	115,0	121,4
630	89,4	104,1	107,1	111,3	117,6	124,0

График, изображенный на рисунке 3.11, получен на основе экспериментальных и литературных данных для газообразного изобутана (2-метилпропан) при различных температурах и концентрациях многостенных углеродных нанотрубок и атмосферном давлении. Согласно данным таблиц 3.13-3.16 и рисунка 3.11, составленных на основе экспериментов теплопроводность

вышеуказанных систем как при росте температуры, так и при росте концентрации МУНТ повышается линейно.

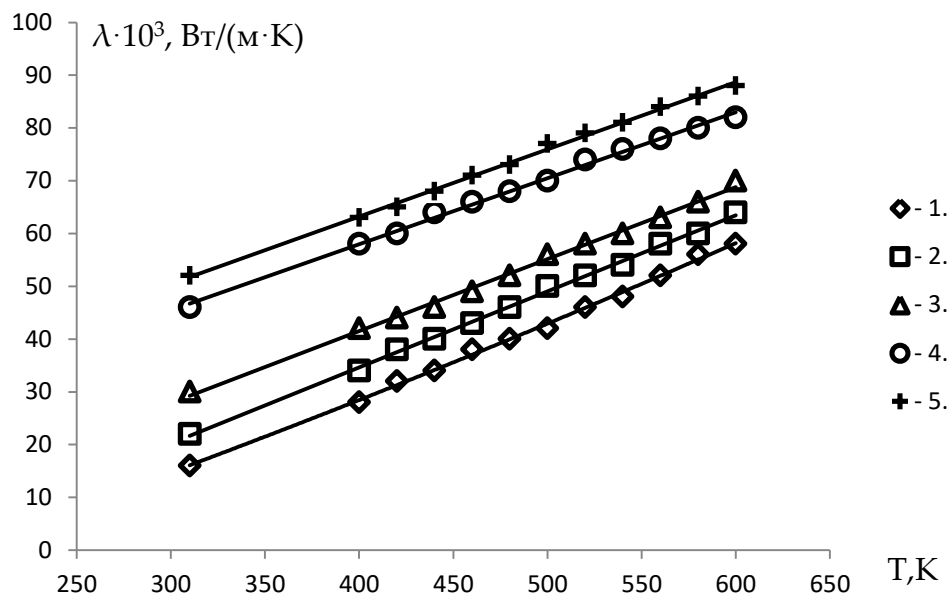


Рисунок 3.11. График зависимости коэффициента теплопроводности газобразного изобутана (2-метилпропан) ( $p=0,101$ МПа) при различной концентрации многостенных углеродных нанотрубок (МУНТ) от температуры: (Образец №1-изобутан (2-метилпропан); Образец №2-изобутан (2-метилпропан)+1.0% МУНТ; Образец №3-изобутан (2-метилпропан)+1.5% МУНТ; Образец №4-изобутан (2-метилпропан)+2.0% МУНТ; Образец №5-изобутан (2-метилпропан)+2.5% МУНТ).

При добавлении МУНТ коэффициент эффективной теплопроводности коллоидных наножидкостей растет таким образом: добавка 2,5% многостенных углеродных нанотрубок в химически чистый изобутан (2-метилпропан) и температуре 300К приводит к увеличению эффективной теплопроводности растворов хладагентов в 2,6 раза; при 400К теплопроводность раствора растет в 1,17 раз, при  $T=500$ К теплопроводность данного хладагента растет на 72,1%, при температуре 600К это увеличение достигает 51,9% [167-А, 172-А, 175-А, 177-А, 179-А, 183-А, 184-А, 185-А, 190-А, 191-А, 193-А].

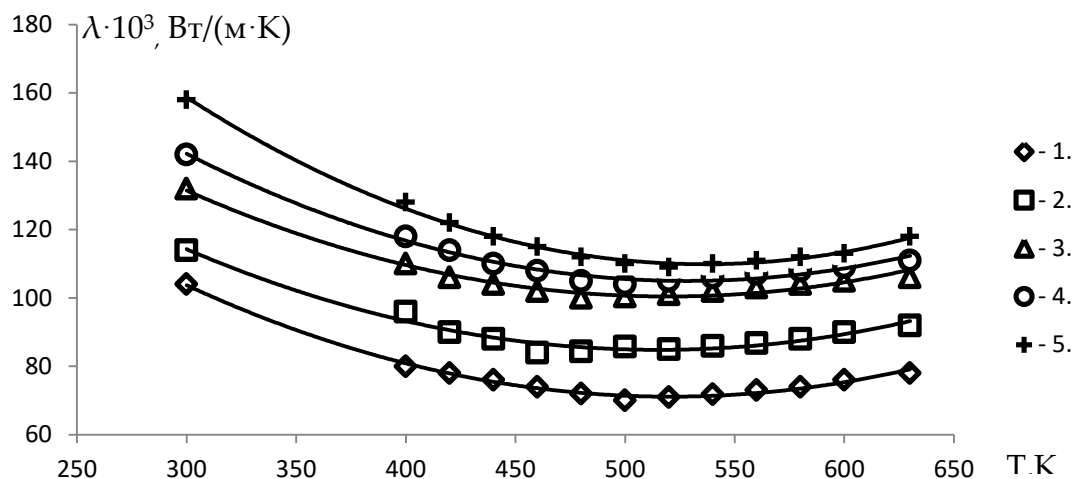


Рисунок 3.12. График зависимости коэффициента теплопроводности жидкого изобутана (2-метилпропан) ( $p=19,61$ МПа) при различной концентрации многостенных углеродных нанотрубок (МУНТ) от температуры: (Образец №1-изобутан (2-метилпропан)); (Образец №2-изобутан (2-метилпропан)+1.0% МУНТ); (Образец №3-изобутан (2-метилпропан)+1.5% МУНТ); (Образец №4-изобутан (2-метилпропан)+2.0% МУНТ); (Образец №5-изобутан (2-метилпропан) +2.5% МУНТ)

Как видно из данного графика (рисунок 3.12) при постоянном давлении ( $P=19,61$ МПа) теплопроводность исследуемых наножидкостей системы изобутана в жидкой фазе и многостенных углеродных нанотрубок с повышением температуры до 300К уменьшается согласно линейному закону, однако при дальнейшем росте температуры более, чем на 480К теплопроводность системы растет по экспоненциальному закону, т.е. при данном температурном интервале (480-630)К, наножидкость переходит в газовое состояние. Увеличение концентрации (МУНТ) в составе раствора приводит к увеличению теплопроводности коллоидных наножидкостей.

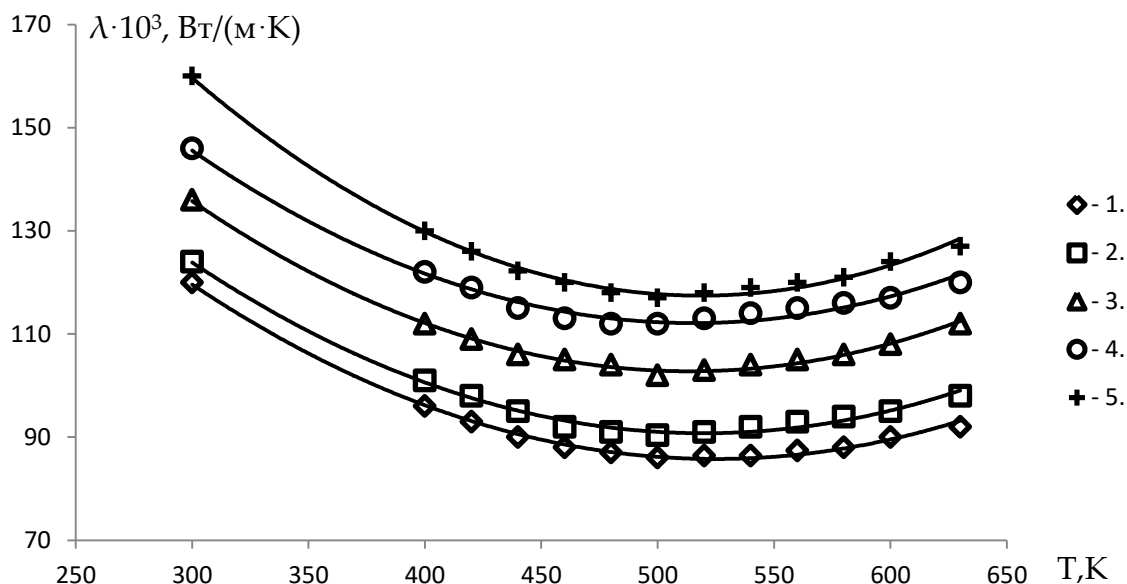


Рисунок 3.13. График зависимости коэффициента теплопроводности жидкого изобутана (2-метилпропан) ( $p=29,42$ МПа) при различной концентрации многостенных углеродных нанотрубок (МУНТ) от температуры: (Образец №1-изобутан (2-метилпропан)); (Образец №2-изобутан (2-метилпропан)+1.0% МУНТ); (Образец №3-изобутан (2-метилпропан) + 1.5% МУНТ); (Образец №4-изобутан (2-метилпропан)+2.0% МУНТ); (Образец №5-изобутан (2-метилпропан) +2.5% МУНТ))

В жидкой фазе при  $T=(300-460)$ К,  $\lambda$  образцов изменяется следующим образом: если при 300К в раствор добавить до 2,5% МУНТ, то теплопроводность системы повысится на 37,7 %, при температуре 400 К на 58,8%, при температуре 500К теплопроводность данного раствора повысится на 49,3%, а при  $T= 600$ К на 49,5%. Добавление МУНТ в жидкую фазу хладагента приводит к повышению теплопроводности растворов, однако добавка МУНТ в паровое состояние хладагента н-бутана изобутана к понижению теплопроводности исследуемых наножидкостей в интервале температур (460-630)К.

На рисунке 3.13 показаны результаты экспериментального и теоретического определения теплопроводности растворов системы жидкого изобутана (2-метилпропан) при давлении ( $P=29,42$ МПа) и температуре (300-630)К. [175-А, 177-А, 180-А]. Согласно графику (рисунок 3.13) при условии  $P=29,42$ МПа=const, теплопроводность исследуемых растворов системы изобутана в жидком состоянии и многостенных углеродных нанотрубок с ростом температуры от 300 до 440К уменьшается практически по линейному закону, однако при дальнейшем росте температуры более, чем на 450К, т.е. (450-630)К, теплопроводность

системы увеличивается по экспоненциальному закону, что свидетельствует о том, что при данном температурном диапазоне наножидкость переходит в паровое состояние. Увеличение концентрации (МУНТ) приводит и к увеличению теплопроводности наножидкостей.

В жидкой фазе в интервале температуры (300-440)К, теплопроводность изменяется по следующим закономерностям: при добавлении многостенных углеродных нанотрубок до 0,4г и температуре 300К теплопроводность растет на 33,3%, при температуре 400К теплопроводность растет на 37,0%, при температуре 500К теплопроводность данного раствора растет на 32,4%, а при T=600К теплопроводность растет на 34,0%. Добавление МУНТ в жидкую фазу приводит к повышению теплопроводности растворов, однако добавление МУНТ в паровое состояние хладагента (изобутана (2-метилпропан)) способствует понижению теплопроводности исследуемых наножидкостей в интервале температур (460-630)К [167-А, 172-А, 174-А, 176-А, 179-А, 183-А, 185-А].

### **3.2. Влияние наночастиц ОУНТ на изменение теплопроводность изобутана (2-метилпропан) (после добавки наночастиц в течение 50 часов)**

Для выявления влияния ОУНТ на изменение теплопроводности системы (изобутан (2-метилпропан) без добавки и с добавкой одностенных углеродных нанотрубок после истечения 50 часов времени при различных температурах (300-660)К и давлениях (0,101-50)МПа (в газообразном и жидком состояниях) нами использована экспериментальная установка, приведенная в работах [166-А, 172-А, 174-А, 176-А, 179-А], а также использована математическая модель расчета эффективного коэффициента теплопроводности исследуемых наножидкостей [166-А, 172-А, 174-А, 176-А, 179-А]. Результаты проведенных опытов сведены в таблицах 3.17-3.25 и изображены на рисунках 3.14-3.24.

Таблица 3.17. Теплопроводность ( $\lambda \cdot 10^3$ , Вт/(м К)), системы (изобутан (2-метилпропан) без добавки ОУНТ и с добавкой углеродных наночастиц после истечения 50 часов при различных температурах и давлении  $p=2,5$ МПа (газообразной и жидкой фазах).



Т,К	Образец					
	№1	№2	№3	№4	№5	№6
300	92,7	94,8	98,7	102,4	105,0	110,3
400	-	54,9	60,0	64,3	68,9	73,6
420	-	50,4	55,3	59,0	64,5	68,5
440	37,5	41,3	45,4	50,6	57,4	63,0
460	39,2	42,6	46,0	51,8	58,0	64,5
480	42,0	46,0	48,6	54,7	61,8	67,1
500	44,4	47,4	51,9	57,0	64,2	69,4
520	47,0	51,4	54,2	60,2	66,9	72,0
540	50,0	54,3	57,0	63,7	69,7	74,3
560	52,8	57,5	60,7	66,8	74,9	77,5
580	55,4	60,3	63,5	69,3	75,2	79,6
600	58,7	63,7	67,0	72,0	76,9	81,9
630	63,1	66,9	69,7	74,7	81,9	83,0
660	68,2	73,0	76,2	81,5	86,0	90,0

Обр.№1-изобутан (2-метилпропан) х.ч.; Обр.№2-изобутан (2-метилпропан) х.ч.+0,5%ОУНТ; Обр.№3-изобутан (2-метилпропан)х.ч.+1,0%ОУНТ; Обр.№4-изобутан (2-метилпропан) х.ч.+ 1,5 %ОУНТ; Обр.№5-изобутан (2-метилпропан)х.ч.+2,0%ОУНТ; Обр.№6-изобутан (2-метилпропан) х.ч.+2,5%ОУНТ.

Таблица 3.18. Теплопроводность ( $\lambda \cdot 10^3$ , Вт/(м К)), системы (изобутан (2-метилпропан) без добавки ОУНТ и с добавкой углеродных наночастиц после истечения 50 часов при различных температурах и давлении  $p=0,101$ МПа (газообразной и жидкой фазах).

Т,К	Образец					
	№1	№2	№3	№4	№5	№6
298,4	16,2	18,4	20,0	22,6	24,0	27,3
335,2	-	23,6	25,9	27,3	30,4	32,6
373,6	-	28,9	31,7	33,5	36,5	39,5
400,5	28,5	32,4	34,4	37,0	39,9	42,6
420,6	31,9	35,6	36,9	40,2	42,3	46,8
438,2	34,5	36,8	40,0	42,4	45,0	48,8
448,7	37,0	41,7	43,5	45,8	48,9	52,0
478,0	40,2	43,8	45,7	48,5	52,0	55,3

495,5	42,4	45,6	46,0	51,7	54,6	57,5
520,3	45,0	49,3	51,3	53,8	57,1	61,4
543,2	48,2	52,0	53,9	57,3	60,8	64,4
580,5	53,6	57,2	59,5	62,8	63,3	70,0
600,4	54,1	60,3	62,3	65,7	70,0	73,7
620,5	60,5	64,0	66,6	70,2	74,2	78,3

Обр.№1-изобутан (2-метилпропан) х.ч.; Обр.№2-изобутан (2-метилпропан) х.ч.+0,5%ОУНТ; Обр.№3-изобутан (2-метилпропан) х.ч.+1,0% ОУНТ; Обр.№4-изобутан (2-метилпропан) х.ч.+1,5% ОУНТ; Обр.№5-изобутан (2-метилпропан) х.ч.+2,0% ОУНТ; Обр.№6-изобутан(2-метилпропан) х.ч.+2,5% ОУНТ.

На рисунке 3.14 нанесены данные по теплопроводности газообразного и жидкого химически чистого изобутана (2-метилпропана) в интервале температур (293-598)К и давлений ( $p=0,101-50,0$ )МПа, полученных экспериментально другими авторами [167-А, 172-А, 175-А, 177-А, 179-А, 180-А]. Как видно из графика (рисунок 3.14) теплопроводность газообразного изобутана в интервале температуры (298-613)К растет по линейному закону, что соответствует закону молекулярной динамики. Теплопроводность химически чистого изобутана (2-метилпропана) выше атмосферного давления, т.е. в изобарах (2,5-50,0)МПа изменяется по закону гиперболы. При температуре 293К теплопроводность чистого жидкого изобутана (2-метилпропана) относительно газообразного при повышении давления на  $p=2,5$ МПа растет в 4,7 раза, при  $p=5,0$ МПа в 4,94 раза, при  $p=10,0$  МПа в 5,13 раз, при  $p=20,0$  МПа в 5,38 раз, при 50,0 МПа в 6,63 раза. При критической температуре  $T_{кр}=407,9$ К теплопроводность жидкого изобутана (2-метилпропана) изменяется в следующем порядке: при  $p=2,5$ МПа теплопроводность растет на 66,6%, при  $p=5,0$ МПа в 1,41 раза, при  $p=10,0$ МПа в 1,78 раз, при  $p=20,0$ МПа в 1,96 раз, при 50,0МПа в 2,37 раза. При температуре  $T=613$ К теплопроводность жидкого изобутана (2-метилпропана) изменяется в следующем порядке: при  $p=2,5$ МПа теплопроводность увеличивается на 8,6%, при  $p=5,0$ МПа на 6,9%, при  $p=10,0$ МПа на 22,4%, при  $p=20,0$ МПа на 31,4 %, при 50,0МПа на 56,6%.

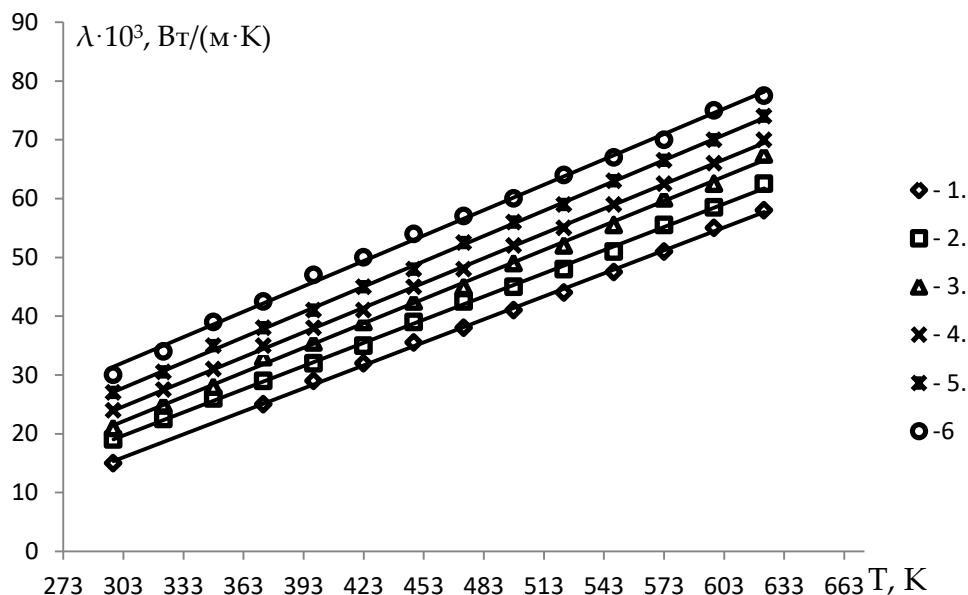


Рисунок 3.14. Теплопроводность жидкого и газообразного изобутана (2-метилпропан) без добавки ОУНТ при различных температурах и давлениях: 1-пар изобутана; жидкий изобутан 1- $p=0.101$  МПа; 2-  $p=2,5$  МПа; 3- $p=5,0$  МПа; 4- $p=10,0$  МПа; 5- $p=20,0$  МПа; 6-  $p= 50,0$  МПа.

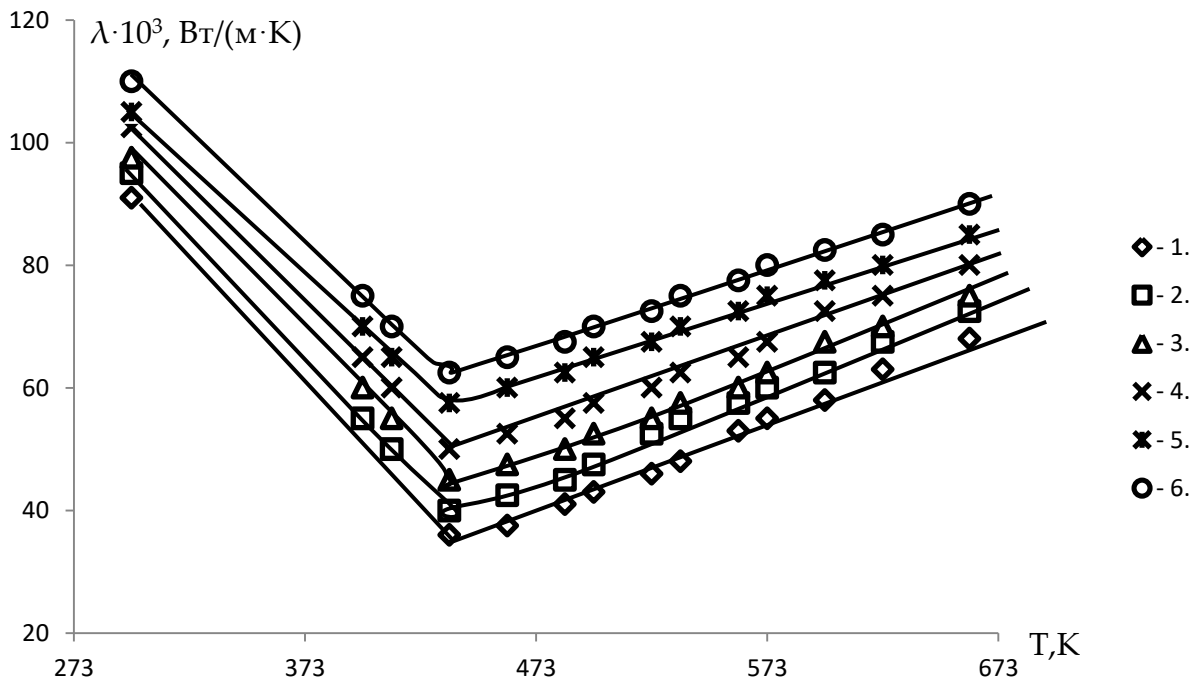


Рисунок 3.15. Теплопроводность изобутана (2-метилпропан) без добавки ОУНТ и с добавкой углеродных наночастиц после истечения 50 часов, при различных температурах, давлении  $p=2,5$  МПа и концентрации ОУНТ (0-2,5%). 1-х.ч.изобутан (2-метилпропан); 2-х.ч. изобутан (2-метилпропан)+0,5%ОУНТ); 3-х.ч.изобутан (2-метилпропан)+1,0% ОУНТ); 4-х.ч. изобутан (2-метилпропан)+1,5%ОУНТ); 5-х.ч.изобутан (2-метилпропан)+2,0%ОУНТ); 6-х.ч. изобутан (2-метилпропан)+2,5%ОУНТ).

На рисунке 3.15 и таблице 3.19, показаны данные по теплопроводности газообразного и жидкого химически чистого изобутана (2-метилпропана) в интервале температур (293-598)К и давлений  $p=2,5$  МПа, которая была измерена

нами [175-А, 177-А, 180-А]. Как видно из графика, показанного на рисунке 3.15, теплопроводность газообразного изобутана в интервале температуры (298-613)К растёт по гиперболическому закону, что отвечает требованиям закона молекулярной динамики. Теплопроводная способность химически чистого изобутана (2-метилпропана) выше атмосферного давления, т.е. в изобарах 2,5МПа с ростом концентрации ОУНТ до 2,5% теплопроводность изменяется согласно линейному закону. При температуре 298К и увеличении концентрации ОУНТ на 2,5% после 50-часовой выдержки теплопроводность изучаемой жидкости увеличивается на 36,6%, а при температуре 453К теплопроводность чистого жидкого изобутана (2-метилпропана) при давлении  $p=2,5\text{МПа}$  увеличивается в 1,33 раза, при температуре 623К и добавлении 2,5% ОУНТ теплопроводность повышается на 53,3 %.

Таблица 3.19. Теплопроводность ( $\lambda \cdot 10^3$ , Вт/(м К)), системы жидкого изобутана (2-метилпропан) без добавки ОУНТ и с добавкой углеродных наночастиц после истечения 50 часов, при различных температурах и давлении  $p=5,0\text{МПа}$ .

Т,К	Образец					
	№1	№2	№3	№4	№5	№6
293,3	92,0	96,2	101,8	109,4	116,7	124,3
318,5	-	87,5	94,0	102,5	110,3	118,4
340,7	-	79,3	87,6	95,2	104,0	112,7
363,2	-	71,4	40,4	88,0	98,4	106,7
383,0	-	63,8	72,0	83,5	91,3	101,2
398,7	-	57,5	67,6	78,2	88,0	97,4
430,5	-	51,0	60,8	70,3	81,8	90,3
441,8	37,4	43,2	52,6	64,5	75,0	85,2
463,7	38,0	44,6	54,0	64,0	74,7	87,7
483,4	40,8	47,9	55,8	65,7	75,7	85,9
498,5	42,7	49,3	58,2	67,3	77,3	85,2
523,2	45,8	52,2	60,3	69,4	78,5	87,6
543,5	48,4	52,7	62,5	71,8	80,0	88,7
563,5	51,2	57,8	64,3	74,0	82,2	90,0
580,2	54,0	60,8	66,9	74,8	82,4	90,8

598,7	56,6	62,7	68,8	76,2	83,2	91,0
628,0	61,3	66,5	71,7	79,4	85,8	93,4

Обр.№1-изобутан (2-метилпропан) х.ч.; Обр.№2-изобутан (2-метилпропан) х.ч.+0,5%ОУНТ; Обр.№3-изобутан (2-метилпропан) х.ч.+1,0% ОУНТ; Обр.№4-изобутан (2-метилпропан)х.ч.+1,5% ОУНТ; Обр.№5-изобутан (2-метилпропан)х.ч.+2,0% ОУНТ; Обр.№6-изобутан (2-метилпропан) х.ч.+2,5% ОУНТ.

На рисунке 3.16 и в таблице 3.20, представлены результаты нашего экспериментального исследования теплопроводности газообразного и жидкого изобутана (2-метилпропана) в чистом виде в температурном диапазоне (293-598)К и давлении  $p=5,0$  МПа [161-А, 172-А, 175-А, 177-А, 180-А, 190-А, 192-А, 193-А]. Согласно этому графику и таблице от температуры 298 до 613К рост теплопроводности изобутана подчиняется гиперболическому закону, что отвечает требованиям молекулярной динамики. При давлении выше атмосферного (изобара 5,0МПа) и добавлении ОУНТ до 2,5% в химически чистый изобутана (2-метилпропана) изменяет его теплопроводность согласно гиперболическому закону.

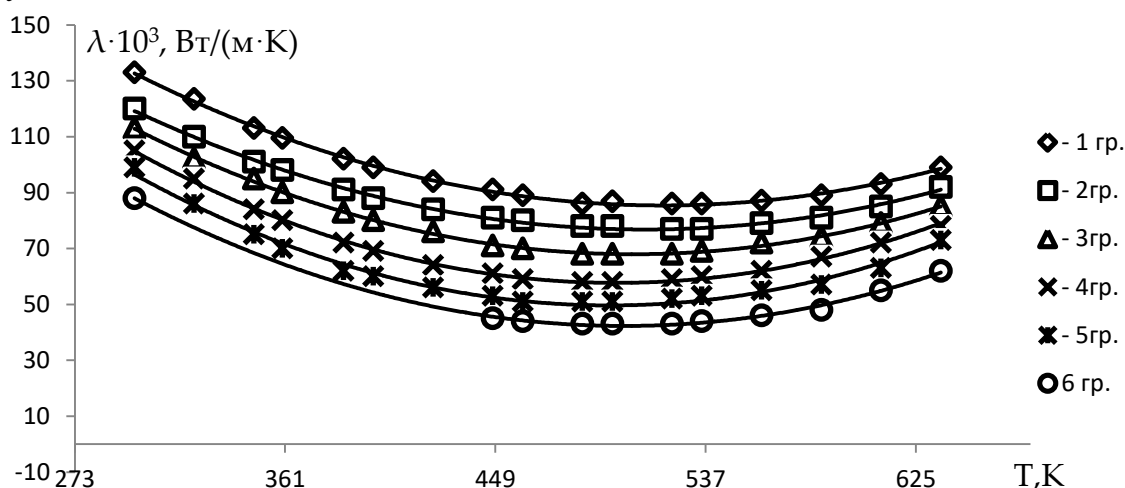


Рисунок 3.16. Зависимость теплопроводности системы изобутан (2-метилпропан) с добавкой углеродных наночастиц после истечения 50 часов, при различных температурах, концентрации ОУНТ и давлении  $p=5,0$  МПа (Обозначение как на рисунке 3.15)

Увеличение концентрации наночастиц в составе изобутана на 2,5% при температуре 298К и после 50 часов выдержки растворов приводит к значительному повышению теплопроводности, т.е. на 31,9%, а при тех же условиях, но при температуре 473К и давлении 5,0МПа рост теплопроводности чистого изобутан составляет 86%, а при температуре 623К и 2,5% ОУНТ этот показатель повышается на 50,3%.

Таблица 3.20. Теплопроводность ( $\lambda \cdot 10^3$ , Вт/(м К)), системы жидкого изобутана (2-метилпропан) без добавки ОУНТ и с добавкой углеродных наночастиц после истечения 50 часов, при различных температурах и давлении  $p=10,0$  МПа.

Т, К	Образец					
	№1	№2	№3	№4	№5	№6
298,3	98,0	102,4	109,0	114,3	121,7	127,7
316,8	-	95,0	101,3	109,4	115,6	122,8
323,0	-	90,3	97,6	105,0	112,6	118,3
353,4	-	86,8	93,5	100,5	107,4	115,4
368,7	-	81,5	87,9	95,7	104,0	111,6
388,0	-	75,9	83,4	91,0	99,5	107,4
398,3	64,6	73,5	80,2	88,7	97,0	105,2
418,6	58,0	67,3	75,0	84,3	92,4	100,1
443,5	51,7	60,4	68,3	77,4	87,1	95,0
465,4	48,3	56,7	65,2	74,3	82,7	92,3
490,5	49,8	57,4	67,8	75,9	84,0	93,8
515,2	54,0	60,7	70,0	79,2	87,5	96,2
538,4	57,6	65,8	73,7	81,0	90,3	99,4
560,5	60,5	67,4	75,6	84,3	93,8	101,6
580,0	64,0	71,3	79,0	86,5	96,0	103,8
604,3	68,6	74,7	82,5	90,0	99,3	107,0
625,5	71,8	78,0	86,7	94,3	102,4	109,4

Обр.№1-изобутан (2-метилпропан) х.ч.; Обр.№2-изобутан (2-метилпропан) х.ч.+0,5% ОУНТ; Обр.№3-изобутан (2-метилпропан) х.ч.+1,0% ОУНТ; Обр.№4-изобутан (2-метилпропан) х.ч.+1,5% ОУНТ; Обр.№5-изобутан (2-метилпропан) х.ч.+2,0% ОУНТ; Обр.№6-изобутан (2-метилпропан) х.ч.+2,5% ОУНТ.

На графике (рисунок 3.17) и в таблице 3.20, представлены полученные нами экспериментальные данные по теплопроводности химически чистого изобутана (2-метилпропана) в газовой и жидкой фазах при  $T = (293-598)$  К и  $p = 10,0$  МПа [166-А, 168-А, 174-А, 176-А, 179-А, 180-А, 191-А, 192-А, 193-А].

Согласно графику (рисунок 3.17) и таблице 3.20 теплопроводность изобутана в газовой фазе при  $T = (298-613)$  К, повышается по закону гиперболы, что подчиняется закону молекулярной динамики. Теплопроводность химически

чистого изобутана (2-метилпропана) при повышении концентрации ОУНТ в его составе до 2,5% и давлении выше атмосферного (10,0МПа) изменение теплопроводности также наблюдается по закону гиперболы. При 298К концентрации наночастиц 2,5% и выдержке полученного раствора на протяжении 50 часов, его теплопроводность повысилась на 28,9%, а при 473К и давлении 10МПа теплопроводность изобутана (2-метилпропана) повышается на 51,5%, а при температуре 623 К и добавлении 2,5% ОУНТ этот показатель растет на 42,5%.

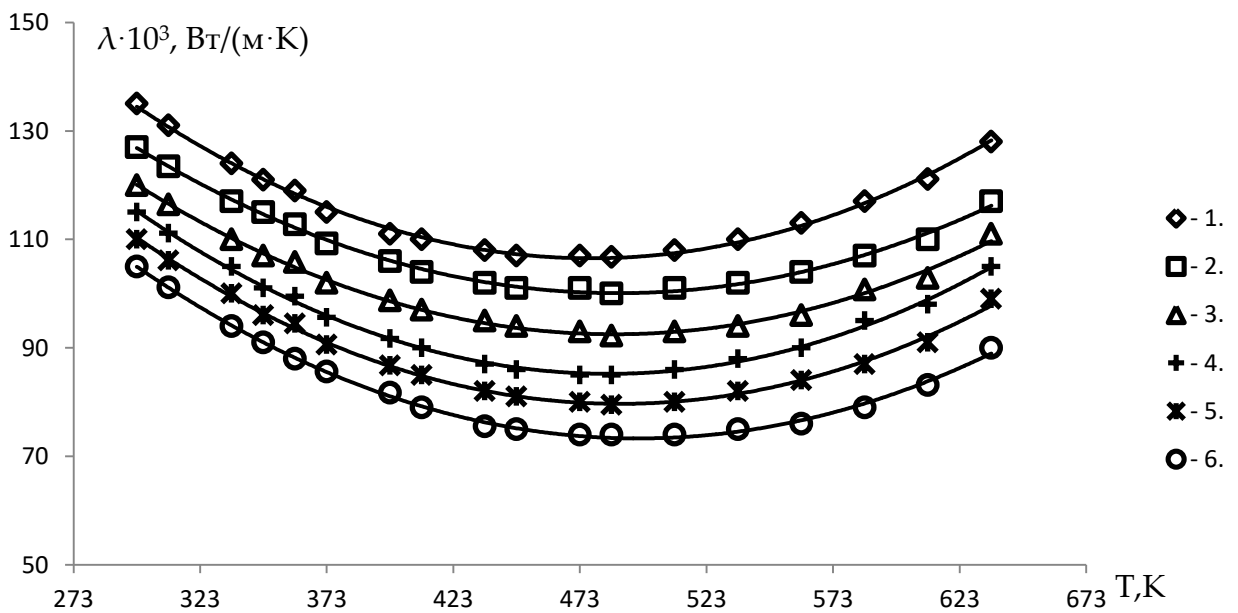


Рисунок 3.17. Влияние ОУНТ на изменение теплопроводности жидкого хладагента х.ч. изобутана (2-метилпропан) при различных температурах и давлении ( $p=10,0\text{МПа}$ ) после истечения 50 часов (Обозначение как на рисунке 3.15)

Таблица 3.21. Теплопроводность ( $\lambda \cdot 10^3$ , Вт/(м·К)) системы жидкого изобутана (2-метилпропан) без добавки ОУНТ и с добавкой углеродных наночастиц после истечения 50 часов, при различных температурах и давлении  $p=20,0\text{МПа}$ .

Т,К	Образец					
	№1	№2	№3	№4	№5	№6
298,2	104,0	109,6	114,3	119,5	127,7	134,2
315,5	-	105,0	109,6	116,0	123,6	130,4
333,4	-	101,7	106,0	113,1	120,2	127,6
350,5	-	97,4	102,7	108,4	116,4	123,4
368,2	-	94,0	99,3	105,0	113,6	120,7

378,7	-	91,8	96,7	103,3	110,5	117,6
398,2	80,4	87,6	93,2	99,0	107,6	119,0
413,7	76,5	83,8	89,3	95,7	103,8	111,4
433,0	72,3	79,0	85,7	92,0	100,1	108,7
450,5	69,0	75,5	82,3	87,9	97,3	104,0
466,8	68,3	74,0	80,2	86,7	95,0	102,5
490,5	68,5	74,2	80,6	87,6	94,9	102,8
515,3	70,6	77,3	83,0	89,8	98,2	105,0
540,5	75,2	81,8	86,9	94,0	102,7	109,9
563,3	78,3	84,0	90,3	97,6	106,5	113,4
583,7	80,0	87,3	93,5	100,0	109,5	116,8
608,4	84,6	90,4	95,9	104,7	113,7	120,0
629,3	86,9	93,0	105,8	107,6	117,8	123,4

Обр.№1-изобутан (2-метилпропан) х.ч.; Обр.№2-изобутан (2-метилпропан) х.ч.+0,5% ОУНТ;  
Обр.№3-изобутан (2-метилпропан) х.ч.+1,0% ОУНТ; Обр.№4-изобутан (2-метилпропан) х.ч.+  
1,5% ОУНТ; Обр.№5-изобутан (2-метилпропан) х.ч.+2,0% ОУНТ; Обр.№6-изобутан (2-  
метилпропан) х.ч.+2,5% ОУНТ.

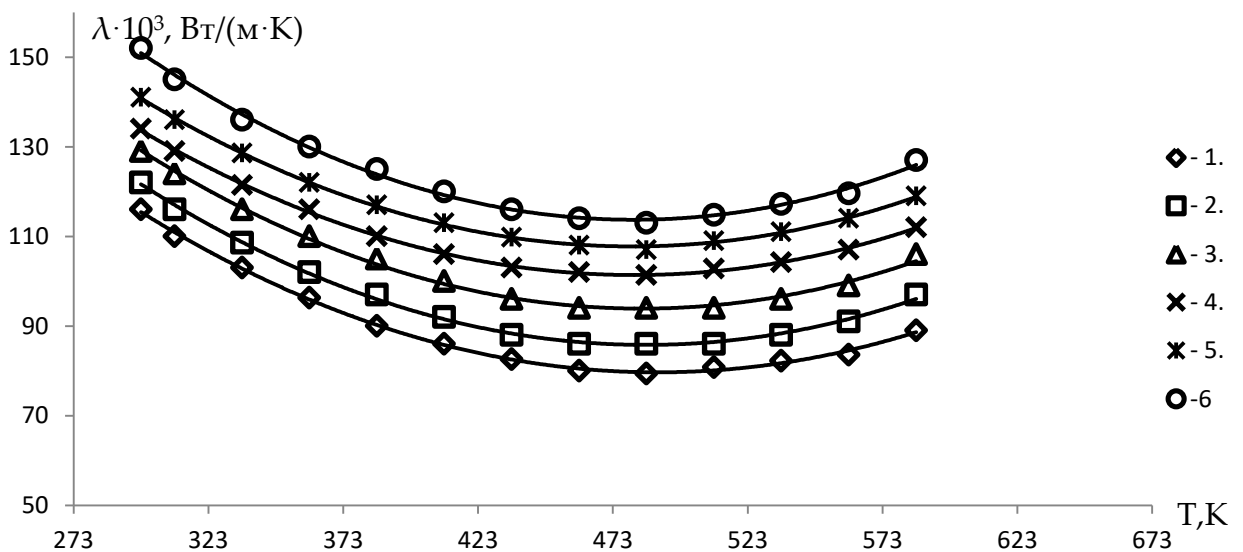


Рисунок 3.18. Влияние ОУНТ на изменение теплопроводности жидкого хладагента (х.ч. (изобутан (2-метилпропан))) при различных температурах и давлении ( $p=20,0$ МПа) после истечения 50 часов (Обозначение как на рисунке 3.15)

На рисунке 3.18 и в таблице 3.21, представлены полученные нами экспериментальные данные по теплопроводности при изменении температуры от 293 до 598К и давлению 20,0МПа химически чистого изобутана (2-метилпропана) в жидкой и газовой фазах [168-А, 174-А, 176-А, 179-А, 183-А, 185-А].



Согласно данным, указанным на графике (рисунок 3.18) и в таблице 3.18 изменение теплопроводности изобутана при изменении температуры от 298 до 613К подчиняется закону гиперболы, что отвечает условиям закона молекулярной динамики. Изменение теплопроводности химически чистого изобутана (2-метилпропана) при избыточном давлении, т.е. на изобаре 20,0 МПа и ростом концентрации ОУНТ до 2,5% также подчиняется гиперболическому закону. При температуре 298К увеличение концентрации наночастиц в составе изобутана на 2,5% и 50-часовой выдержке растворов их теплопроводность повышается на 36,1%, а при температур 473К и давлении 20,0 МПа теплопроводность чистого жидкого изобутана (2-метилпропана) увеличивается на 49,8%, при температуре 623К и добавлении 2,5% ОУНТ теплопроводность системы возрастает на 58,4%.

Таблица 3.22. Теплопроводность ( $\lambda \cdot 10^3$ , Вт/(м К)), системы жидкого изобутана (2-метилпропан) без добавки ОУНТ и с добавкой углеродных наночастиц после истечения 50 часов, при различных температурах и давлении  $p=25,0$ МПа.

Т,К	Образец					
	№1	№2	№3	№4	№5	№6
298,4	106,2	112,6	119,3	126,7	134,3	142,7
318,0	-	107,4	114,6	121,4	129,0	138,4
340,5	-	101,9	109,5	116,5	123,8	131,8
363,6	-	96,7	104,7	111,0	118,2	127,7
383,2	-	92,9	100,0	106,7	114,4	124,0
398,4	81,0	88,4	96,3	104,3	110,7	119,3
420,7	77,3	84,8	91,8	99,0	105,0	114,7
438,2	74,0	80,9	88,0	95,3	100,6	108,8
455,6	71,8	78,5	86,3	93,6	99,0	106,0
473,9	77,3	77,2	84,7	91,5	98,1	104,6
490,5	69,5	75,0	84,1	91,2	97,3	104,0
510,2	70,2	75,3	83,7	91,5	97,7	104,2
535,4	71,0	77,8	85,0	93,7	98,7	105,0
560,6	72,7	80,6	87,4	95,0	99,3	107,5
583,2	74,2	84,5	91,0	99,3	104,5	111,8

598,4	75,6	86,2	93,5	102,4	108,4	117,3
623,0	76,9	90,0	98,3	107,8	114,0	121,8

Обр.№1-изобутан (2-метилпропан) х.ч.; Обр.№2-изобутан (2-метилпропан) х.ч.+0,5% ОУНТ; Обр.№3-изобутан (2-метилпропан) х.ч.+1,0% ОУНТ; Обр.№4-изобутан (2-метилпропан) х.ч.+1,5 % ОУНТ; Обр.№5-изобутан (2-метилпропан) х.ч.+2,0% ОУНТ; Обр. №6-изобутан (2-метилпропан) х.ч.+2,5% ОУНТ.

Таблица 3.23. Теплопроводность ( $\lambda \cdot 10^3$ , Вт/(м К)), системы жидкого изобутана (2-метилпропан) без добавки ОУНТ и с добавкой углеродных наночастиц после истечения 50 часов, при различных температурах и давлении  $p=30,0$  МПа.

Т,К	Образец					
	№1	№2	№3	№4	№5	№6
293,2	110,8	116,5	125,3	130,7	139,4	146,3
318,5	-	113,6	118,1	124,4	132,8	141,4
338,0	-	106,9	112,5	118,5	127,2	134,8
357,4	-	102,7	108,6	114,3	121,0	128,7
382,2	-	96,0	103,2	109,7	115,4	122,0
398,2	82,3	85,4	96,3	104,3	110,7	119,3
413,6	87,0	94,1	99,8	105,6	113,2	118,0
438,0	82,7	89,5	94,6	102,3	109,6	114,8
473,6	78,4	86,7	91,2	99,6	104,5	112,5
505,5	76,1	81,5	90,0	93,7	104,2	111,0
535,6	78,3	84,0	90,6	98,5	105,6	113,4
566,8	80,0	85,3	93,7	100,6	107,8	115,6
593,5	83,2	88,4	96,5	104,0	111,7	117,9
623,4	84,6	90,6	99,4	106,9	115,2	123,3

Обр.№1-изобутан (2-метилпропан) х.ч.; Обр.№2-изобутан (2-метилпропан) х.ч.+0,5% ОУНТ; Обр.№3-изобутан (2-метилпропан)х.ч.+1,0% ОУНТ; Обр.№4-изобутан (2-метилпропан)х.ч.+1,5% ОУНТ; Обр.№5-изобутан (2-метилпропан) х.ч.+2,0% ОУНТ; Обр.№6-изобутан (2-метилпропан) х.ч.+2,5% ОУНТ.

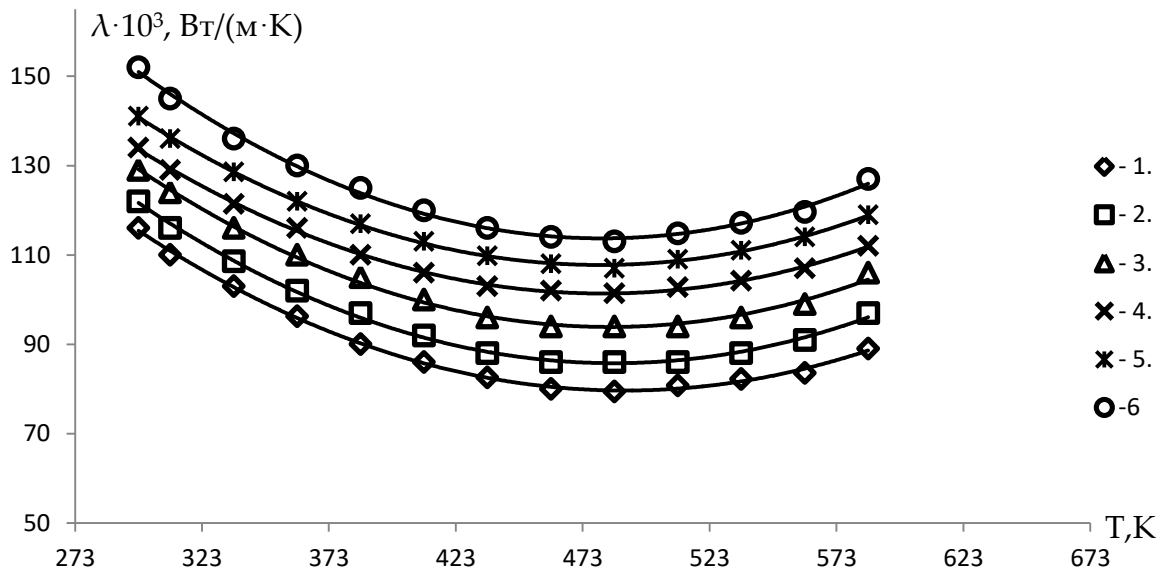


Рисунок 3.19. Влияние ОУНТ на изменение теплопроводности жидкого хладагента (х.ч. изобутан (2-метилпропан)) при различных температурах и давлении  $p=30,0$  МПа после истечения 50 часов: (Обозначения как на рисунке 3.15)

На графике, изображенном на рисунке 3.19 и в таблице 3.23, представлены результаты наших экспериментальных исследований по теплопроводности химически чистого изобутана (2-метилпропана) в жидкой и газовой фазе при температурах от 293 до 598К и давлении  $p=30,0$  МПа [166-А, 168-А, 172-А, 176-А, 177-А, 180-А, 183-А, 185-А, 190-А, 191-А, 192-А, 193-А].

Согласно этим данным изменение теплопроводности изобутана (2-метилпропан) в указанном диапазоне температур подчиняется закону гиперболы, что отвечает условиям закона молекулярной динамики. При температуре 298К и увеличении концентрации наночастиц на 2,5% после 50-часовой выдержки теплопроводность растворов повышается на 42,6%, а при температуре 473К и давлении  $p=30,0$  МПа теплопроводность чистого жидкого изобутана (2-метилпропана) повышается до 49,4%. При температуре 623 К с добавлением 2,5% ОСУНТ в изобутан повышает теплопроводность раствора на 51,2%.

Таблица 3.24. Теплопроводность ( $\lambda \cdot 10^3, \text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ) системы жидкого изобутана (2-метилпропан) без добавки ОУНТ и с добавкой углеродных наночастиц после истечения 50 часов, при различных температурах и давлении  $p=40,0$  МПа.

T, К	Образец					
	№1	№2	№3	№4	№5	№6

298,4	120,9	126,5	132,6	140,0	145,8	156,5
313,0	-	120,6	127,9	134,4	140,0	150,4
336,8	-	113,6	120,5	128,5	134,3	145,0
353,6	-	108,1	114,6	121,6	129,6	140,5
383,7	-	102,0	109,6	115,7	123,4	131,6
413,3	93,5	100,3	104,8	109,6	115,6	124,8
438,2	90,0	96,5	101,6	106,3	114,5	120,3
473,8	85,4	91,0	99,2	103,8	111,6	116,7
498,7	84,2	89,3	96,8	102,9	111,9	115,8
528,0	83,0	88,5	95,6	103,4	112,3	118,4
555,6	84,2	90,3	97,2	100,1	108,5	119,6
585,4	85,8	92,6	98,0	106,3	112,7	122,5
623,8	90,0	98,4	106,0	115,2	123,8	130,4

Обр.№1-изобутан (2-метилпропан) х.ч.; Обр.№2-изобутан (2-метилпропан) х.ч.+0,5% ОУНТ;  
Обр.№3-изобутан (2-метилпропан)х.ч.+1,0% ОУНТ; Обр.№4-изобутан(2-метилпропан)х.ч.+  
1,5% ОУНТ; Обр.№5-изобутан (2-метилпропан) х.ч.+2,0% ОУНТ; Обр.№6-изобутан (2-  
метилпропан) х.ч.+2,5% ОУНТ.

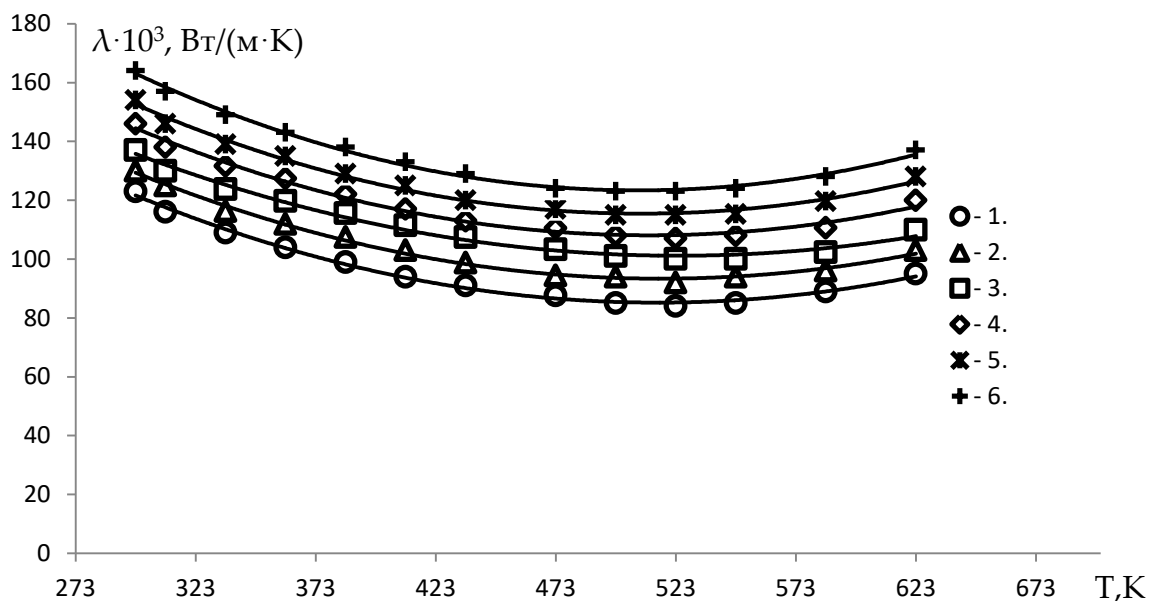


Рисунок 3.20. Влияние ОУНТ на изменение теплопроводности жидкого хладагента (х.ч. изобутан (2-метилпропан)) при различных температурах и давлении ( $p=40,0$  МПа) после истечения 50 часов:(Обозначение как на рисунке 3.15).

На графике, изображенном на рисунке 3.20 и в таблице 3.24, представлены результаты наших экспериментальных исследований по теплопроводности химически чистого изобутана (2-метилпропана) в газовой и жидкой фазах при изменении температуры опыта от 293 до 598К и давлении  $p=40,0$  МПа.

Согласно этим данным, изменение теплопроводности изобутана (2-метилпропана) в температурном диапазоне (298-613)К подчиняется закону гиперболы, что отвечает условиям закона молекулярной динамики. Изменение теплопроводности химически чистого изобутана (2-метилпропана) при избыточном давлении 40,0МПа и увеличение концентрации ОУНТ до 2,5% также соответствует гиперболическому закону. При температуре 298К увеличение концентрации наночастиц на 2,5% и 50-часовой выдержке растворов теплопроводность увеличивается на 26,4%. При температуре 473К и давлении  $p=40,0$  МПа теплопроводность чистого жидкого изобутана (2-метилпропана) повышается на 36,0%, а при температуре 623К и добавлении 2,5% ОУНТ теплопроводность системы повышается на 52,9%.

Таблица 3.25. Теплопроводность ( $\lambda \cdot 10^3$ , Вт/(м К)), системы жидкого изобутана (2-метилпропан) без добавки ОУНТ и с добавкой углеродных наночастиц после истечения 50 часов, при различных температурах и давлении  $p=50,0$  МПа.

Т,К	Образец					
	№1	№2	№3	№4	№5	№6
298,0	124,5	128,0	136,6	144,7	155,8	165,6
323,4	-	120,6	129,4	134,4	146,7	155,4
348,2	-	113,6	121,5	139,3	139,6	147,5
373,6	-	108,1	116,3	130,6	133,0	140,3
398,6	-	104,2	111,6	123,8	126,9	136,7
423,3	94,3	102,5	110,6	118,6	124,3	131,6
440,6	92,0	101,7	109,2	117,3	123,7	130,3
460,7	91,3	100,8	106,3	115,6	120,8	129,4
490,5	90,7	100,4	106,2	116,0	120,6	127,0
518,0	91,3	101,0	105,1	114,8	120,7	127,6
548,3	93,4	101,2	105,8	115,2	120,9	128,0
573,0	95,0	101,6	106,0	117,3	125,6	130,2
598,2	95,6	102,0	109,3	120,4	126,0	135,3
623,0	96,2	102,4	114,3	124,3	132,3	142,4

Обр.№1-изобутан (2-метилпропан) х.ч.; Обр.№2-изобутан (2-метилпропан) х.ч.+0,5% ОУНТ;

Обр.№3-изобутан (2-метилпропан)х.ч.+1,0% ОУНТ; Обр.№4-изобутан (2-метилпропан) х.ч.+1,5% ОУНТ; Обр.№5-изобутан (2-метилпропан) х.ч.+2,0% ОУНТ; Обр.№6-изобутан (2-метилпропан) х.ч.+2,5% ОУНТ.

На рисунке 3.21 и в таблице 3.25, показаны данные по теплопроводности газообразного и жидкого химически чистого изобутана (2-метилпропана) в интервале температур (293-598) К и давлении  $p=50,0$  МПа, которые экспериментально получены нами [167-А, 168-А, 172-А, 174-А, 175-А, 177-А, 179-А, 183-А, 185-А, 190-А, 193-А].

Как видно из графика, приведенного на рисунке 3.21 и таблицы 3.25, теплопроводность изобутана (2-метилпропан) в интервале температур (298-613)К, изменяется по гиперболическому закону, что соответствует закону молекулярной динамики. Теплопроводность химически чистого изобутана (2-метилпропана) выше атмосферного давления, т.е. в изобарах 50,0 МПа при увеличении концентрации ОУНТ до 2,5% теплопроводность изменяется по гиперболическому закону.

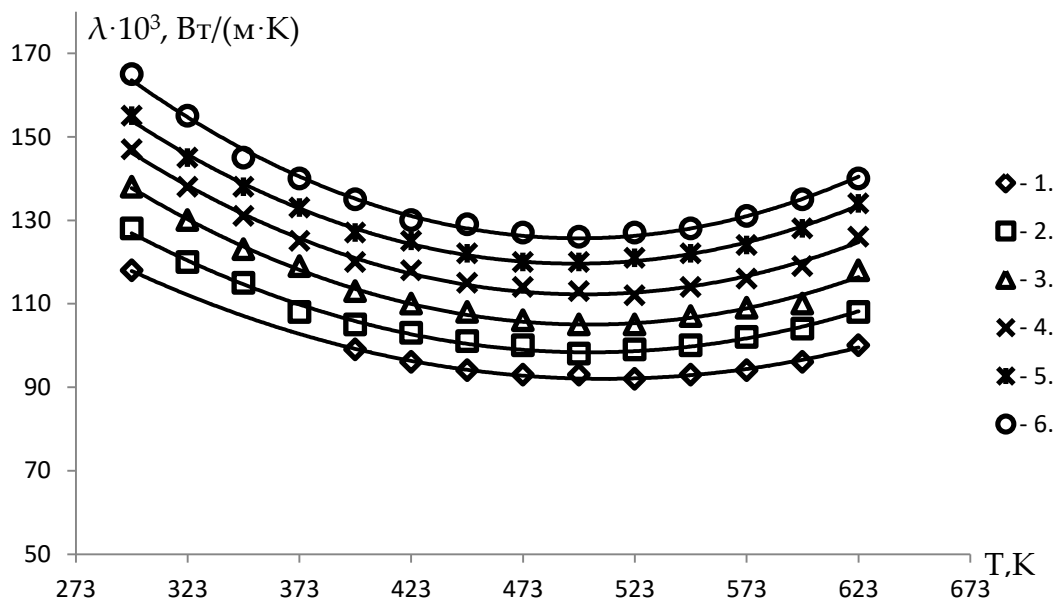
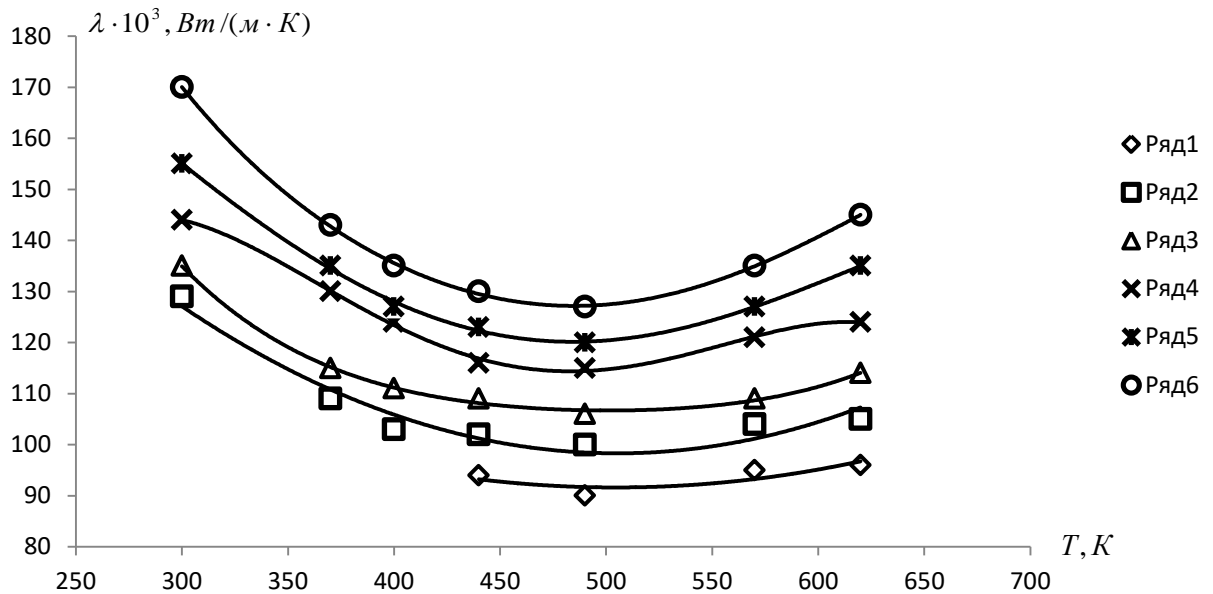


Рисунок 3.21. Влияние ОУНТ на изменение теплопроводности жидкого хладагента (х.ч. (изобутан (2-метилпропан)) при различных температурах и давлении  $p=50,0$  МПа после истечения 50 часов: (Обозначение как на рисунке 3.15).

При температуре 298К повышение концентрации наночастиц на 2,5% и после 50-часовой выдержки теплопроводность раствора растет на 41,2%. При температуре 473К и давлении 50,0 МПа теплопроводность чистого жидкого

изобутана (2-метилпропана) увеличивается на 38,1%, а при температуре 623 К и добавлении 2,5% ОУНТ теплопроводность системы увеличивается на 48,9%.



**Рисунок 3.22.** Зависимость теплопроводности х.ч. изобутана (2-метилпропана) без добавки углеродных наночастиц, при постоянной температуре  $T=\text{const}$ ,  $P=50\text{МПа}$  и различных давлениях в области фазового перехода: 1-300К; 2-370К; 3-400К; 4-440К; 5-490К; 6-590К

На рисунке 3.22, показаны данные по теплопроводности газообразного и жидкого химически чистого изобутана (2-метилпропана) при температуре ( $T=\text{const}$ ): в области фазового перехода 1-300К; 2-370К; 3-400К; 4-440К; 5-490К; 6-580К и давлений  $p=(0,101-18,0)$  МПа, которая измерена нами [166-А, 168-А, 172-А, 175-А, 177-А, 179-А, 183-А, 185-А, 191-А, 192-А, 193-А].

Как видно из графика, приведенного на рисунке 3.22, теплопроводность изобутана (2-метилпропан) в интервале температур, охватываемого область фазового перехода (1-300К; 2-370К; 3-400К; 4-440К; 5-490К; 6-580К; 7-620К), изменяется по гиперболическому линейному и параболическому закону, что соответствует закону молекулярной динамики. Теплопроводность химически чистого изобутана (2-метилпропана) выше атмосферного давления, т.е. например, изотерма 300 К подчиняется закону параболы и теплопроводность при увеличении давления от 0,101МПа до 18,0 МПа увеличивается в 10 раз. При температуре 400 К и повышении давления до 18,0МПа при выдержке растворов в

течение 50 часов теплопроводность растет в 1,7 раза, а при температуре 420К теплопроводность чистого жидкого изобутана (2-метилпропана) подчиняется параболическому закону и растет при давлении  $p=18,0$  МПа в 1,36 раз, при температуре 440 К и повышение давления от 0,101 до 18,0МПа повышает теплопроводность в 1,69 раз (закон параболы). Когда температура опыта достигает 460 К, выполняется закон параболы и при повышении давления от 0,101 до 18,0 МПа теплопроводность исследуемых растворов растет на 7,2%. На изотерме 480 К, теплопроводность чистого жидкого изобутана (2-метилпропана) выполняется по параболическому закону и растет в 1,53 раза.

### 3.3. Влияние наночастиц ОУНТ на изменение теплопроводности изобутана (2-метилпропана) в критической области

При выполнении технологического процесса в холодильных установках рабочее тело (хладагент) проходит критическую область. Для теплового расчета необходимо знать теплофизические характеристики рабочего тела. В связи с этим, одной из основных задач, стоящих перед нами, являлась исследование эффективного коэффициента теплопроводности рабочего тела (жидкого изобутана (2-метилпропана)) при различных температурах, т.е. в критической области ( $p_{кр}=3,6$ МПа и  $T_{кр}=407,9$ К) [24-26,34]. Для выполнения данной задачи нам послужило опытное устройство, работающее методом цилиндрического бикалориметра, а полученные данные по  $\lambda$  изобутана при разных показаниях концентрации добавляемых частиц и температуры после истечения 50 часов представлены в таблице 3.26 и на рисунке 3.23 [167-А, 172-А, 174-А, 175-А, 176-А, 177-А, 179-А, 183-А, 184-А, 185-А, 190-А, 191-А, 193-А].

Таблица 3.26. Теплопроводность ( $\lambda \cdot 10^3$ , Вт/(м К)), системы жидкого изобутана (2-метилпропан) без добавки ОУНТ и с добавкой углеродных наночастиц после истечения 50 часов, в критической области ( $p_{кр}=3,6$ МПа и  $T_{кр}=407,9$  К).

Т,К	Образец					
	№1	№2	№3	№4	№5	№6
298,5	96,1	99,7	105,0	109,7	114,3	118,9



318,0	85,0	89,4	94,7	100,4	103,5	108,7
330,4	77,4	82,6	88,4	91,3	94,8	100,0
353,2	71,8	77,1	82,8	84,6	88,0	94,8
355,6	64,0	67,2	72,5	77,3	84,1	89,3
468,7	57,5	63,3	67,9	73,4	80,3	90,6
376,8	55,6	59,7	64,5	69,3	80,0	89,4
383,0	53,7	57,0	63,7	85,3	87,5	107,3
388,4	52,5	61,7	65,0	90,0	103,1	113,5
393,0	52,0	61,3	85,1	104,8	105,8	116,0
398,2	54,6	79,2	91,8	106,5	116,5	125,7
403,0	74,5	97,2	102,8	107,4	125,4	131,0
407,9	108,0	113,5	121,3	127,2	132,0	137,3
410,4	86,2	99,0	120,4	124,0	130,0	135,4
412,7	65,4	97,3	118,7	122,4	125,4	135,0
415,5	60,3	97,0	111,4	115,7	118,5	133,4
418,0	50,0	92,4	108,9	112,4	117,6	127,3
423,3	47,6	80,5	102,0	110,1	117,0	125,0
438,0	42,5	49,0	74,5	94,7	103,6	110,6
448,5	40,0	45,6	62,7	84,7	93,7	102,7
460,3	38,2	42,5	48,6	69,9	80,0	92,8
473,0	39,6	42,9	45,9	55,8	67,5	77,6
483,8	39,4	43,7	47,5	53,7	60,2	69,5
488,0	40,6	43,9	49,0	53,0	60,0	69,0
498,5	42,2	46,8	51,3	55,4	61,1	68,4
510,3	45,2	49,3	52,6	57,3	62,3	68,5
535,5	49,8	54,5	60,3	63,0	67,4	74,3
561,4	52,3	56,8	61,0	64,9	70,6	77,0
573,8	56,3	61,3	64,7	70,0	75,8	82,0
600,5	60,5	66,2	70,3	75,1	80,5	87,3
623,4	64,7	69,4	74,0	79,4	85,3	92,0

Обр.№1-изобутан (2-метилпропан) х.ч.; Обр.№2-изобутан (2-метилпропан) х.ч.+0,5% ОУНТ;  
Обр.№3-изобутан (2-метилпропан)х.ч.+1,0% ОУНТ; Обр.№4-изобутан(2-метилпропан)х.ч.+  
1,5% ОУНТ; Обр.№5-изобутан (2-метилпропан) х.ч.+2,0% ОУНТ; Обр.№6-изобутан (2-  
метилпропан) х.ч.+2,5% ОУНТ.

Как показывают результаты исследования, теплопроводность изучаемых образцов проходит через максимум, т.е. при температуре  $T_{кр} = 407,9\text{К}$  для всех образцов точка максимума соответствует  $407,9\text{К}$ . Добавка 2,5% ОУНТ в химически чистый изобутан (2-метилпропан) при температуре  $298,5\text{К}$  повышает теплопроводность на 23,7%, при температуре  $T_{кр}=407,9\text{К}$  на 27,2%, а при температуре  $623,4$  эта разница доходит до 42,2%.

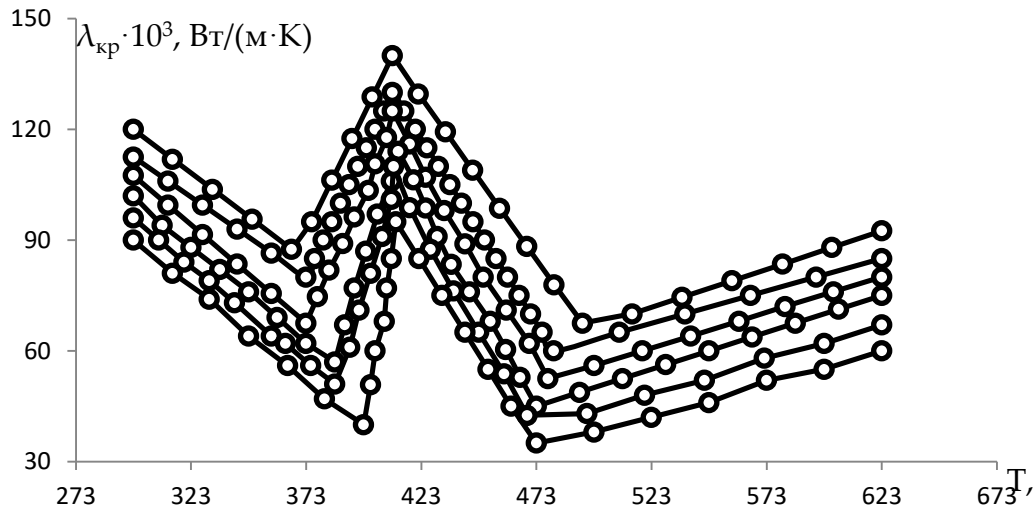


Рисунок 3.23. График зависимости коэффициента теплопроводности жидкого изобутана (2-метилпропан) х.ч. ( $p_{кр}=3,6\text{МПа}$  и  $T_{кр} = 407,9\text{К}$ ) при различной концентрации одностенных углеродных нанотрубок (ОСУНТ) и температуре: (Образец №1-изобутан (2-метилпропан)х.ч); (Образец №2-х.ч.изобутан (2-метилпропан)+0.5% ОСУНТ); (Образец №3-изобутан х.ч. (2-метилпропан)+1.0% ОСУНТ); (Образец №4-х.ч.изобутан (2-метилпропан)+1.5% ОСУНТ); (Образец №5-х.ч.изобутан(2-метилпропан)+2.0% ОСУНТ); Образец №6-х.ч.изобутан (2-метилпропан)+2.5% ОСУНТ).

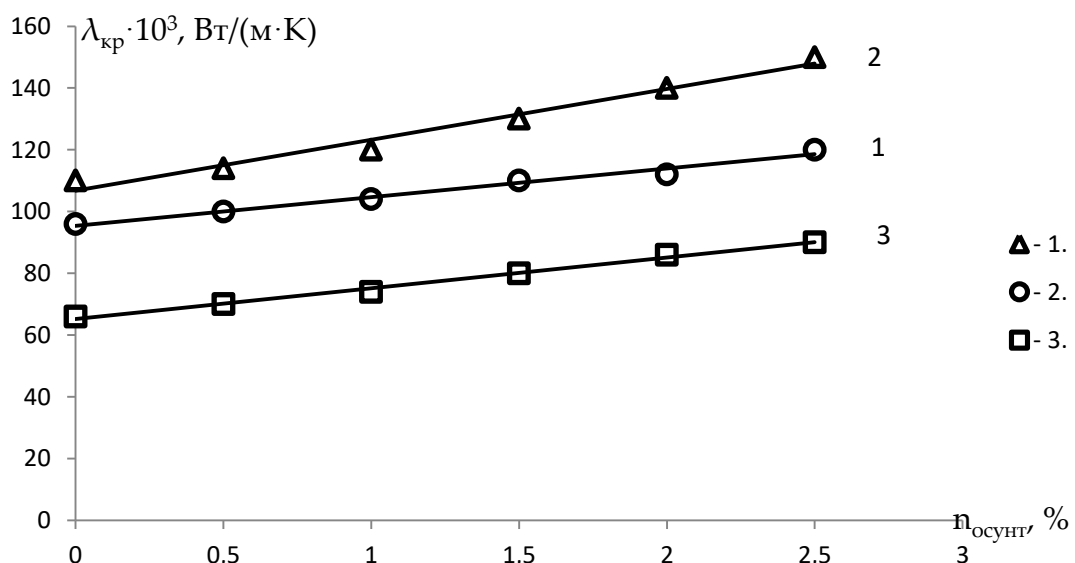


Рисунок 3.24. Зависимость теплопроводности х.ч. изобутана (2-метилпропан) от концентрации углеродных наночастиц после истечения 50 часов, при постоянной температуре  $T=\text{const}$  в критической области: 1-298К; 2-407,9К; 3-623К

На рисунке 3.24 и в таблице 3.26 представлены результаты экспериментально-теоретического исследования теплопроводности х.ч. изобутана (2-метилпропан) от концентрации углеродных наночастиц после истечения 50 часов, при постоянной температуре  $T=\text{const}$  (в критической области: 1-298К; 2-407,9К; 3-623К), от концентрации одностенных углеродных нанотрубок, т.е.  $\lambda_{\text{кр}}=f(n_{\text{УНТ}})$ . Как видно из полученных данных (рисунок 3.24 и таблица 3.26), изменение теплопроводности исследуемых хладагентов с повышением концентрации ОУНТ подчиняется закону прямой линии. При температуре 298К и добавлении до 2,5% ОУНТ – эффективная теплопроводность коллоидных растворов на основе хладагента изобутана (2-метилпропан) растет на 15,96%, при температуре 407,9К, это изменение достигает 36,2%, при температуре 623К добавка 2,5% ОУНТ приводит к увеличению коэффициента эффективной теплопроводности на 40,1%.

#### **3.4. Теплоемкость хладагентов системы (н-бутан, изобутан (2-метилпропан)) при различных температурах и давлениях**

В силу достаточно скупой информации о теплоемкости ( $C_p$ ) таких хладагентов как н-бутан и изобутан 2-метилпропан [3,130,156], мы поставили перед собой задачу обратиться к решению данной проблемы. Далее представляем результаты исследований в виде таблиц.

Таблица 3.27. Удельная изобарная теплоемкость ( $C_p$ , Дж/(кг.К)) хладагентов в зависимости от температуры при  $p=0,101\text{МПа}$  без введения углеродных нанотрубок [3, 130].

##### **н-бутан**

Т,К	298	300	400	500	600	700
$C_p$	1678,5	1687,4	2132,5	2546,9	2903,2	3210,7

##### **изобутан (2-Метилпропан)**

Т,К	298	300	400	500	600	700
$C_p$	1667,7	1674,9	2144,6	2567,1	2927,5	3232,3

Согласно представленной информации рост температуры при атмосферном давлении способствует линейному изменению теплоемкости образцов. Как выше было отмечено, этот параметр можно было бы и вычислить при различных

параметрах состояния с помощью численных методик на основе располагаемых значений эффективной теплопроводности, плотности и температуропроводности. Однако мы обратились к эксперименту и по сути являемся первыми, кто опытным путем установили влияние ОУНТ и МУНТ на теплоемкость *n*-бутана и изобутана после выдержки приготовленных растворов на протяжении определенного времени (2 часа и 30 часов) [164-А, 172-А, 173-А, 182-А, 186-А, 187-А, 188-А, 189-А].

В данном параграфе представлены результаты исследования только наножидкостей системы изобутан (2-метилпропан) + ОУНТ и МУНТ при температурном диапазоне, охватывающем область (293-693)К и давления в области от 0,101 до 49,01МПа (таблица 3.28). Этот параметр для наших образцов, также как и для других жидкостей, растворов, различных наножидкостей, твердых и сыпучих материалов при разных температурах и давлениях, концентрациях наполнителей, измерялся методиками, предложенными еще профессором Платуновым Е.С. (Россия, Санкт Петербург), Мустафаевым Р.А. (Азербайджан, Баку), Амирхановым А.(Россия, Махачкала), Гусейновым К.Д. (Азербайджан, Баку), Сафаровым М.М. (Таджикистан, Душанбе), Питером Гаалом (США), Де Кастро (Португалия) и другими.

Таблица 3.28. Удельная изобарная теплоемкость ( $C_p$ , Дж/(кг.К)) системы х.ч. изобутана (2-метилпропана) от концентрации углеродных наночастиц после истечения 50 часов при различных температурах и давлениях.

Т, К	Давление P, МПа					
	2	3	4	5	6	7
1	0,101	9,81	19,62	29,43	39,32	49,01
Образец №1 -х.ч. изобутан (2-метилпропан) без добавки углеродных одностенных нанотрубок						
293	1618	1560	1535	1490	1435	1405
313	1725	1630	1600	1540	1490	1470
333	1790	1715	1690	1630	1565	1546
353	1872	1800	1760	1700	1645	1620
373	1980	1885	1840	1782	1725	1695

393	2090	1980	1930	1865	1806	1760
413	2186	2040	2006	1940	1885	1846
433	2270	2135	2090	2015	1958	1935
453	2356	2212	2170	2090	2040	2003
473	2440	2300	2250	2165	2120	2070
493	2575	2400	2335	2242	2200	2150
513	2618	2470	2400	2320	2285	2238
533	2680	2540	2480	2390	2350	2300
553	2765	2625	2550	2475	2425	2366
573	2835	2700	2635	2545	2484	2428
593	2920	2770	2700	2610	2550	2480
613	2980	2850	2770	2685	2608	2536
633	3050	2910	2830	2732	2665	2580
653	3130	2940	2900	2795	2710	2640
673	3170	3015	2940	2836	270	2670
693	3215	3065	2985	2878	2814	2715
Образец №2-х.ч. изобутан (2-метилпропан) +0,5% углеродных одностенных нанотрубок						
293	2120	2022	1936	1850	1795	1728
313	2200	2080	1970	1895	1854	1790
333	2260	2155	2070	1982	1925	1845
353	2350	2234	2140	2065	1990	1936
373	2440	2315	2290	2140	2085	2000
393	2535	2400	2374	2218	2140	2075
413	2580	2454	2400	2292	2210	2140
433	2690	2550	2480	2368	2285	2210
453	2790	2635	2550	2455	2360	2296
473	2875	2700	2625	2518	2440	2380
493	2973	2800	2700	2600	2510	2448
513	3080	2865	2785	2675	2565	2508
533	3135	2940	2850	2720	2640	2574
553	3210	3025	2930	2818	2725	2650
573	3285	3100	3000	2890	2794	2725
593	3370	3185	3060	2965	2860	2790

613	3430	3278	3140	3028	2925	2856
633	3500	3340	3190	3080	2980	2908
653	3554	3400	3250	3136	3034	2949
673	3600	3500	3315	3170	3080	2970
693	3650	3590	3360	3208	3115	3008
Образец №3-х.ч. изобутан (2-метилпропан) +1,0% одностенных углеродных нанотрубок						
293	2210	2130	2040	1980	1920	1860
313	2296	2200	2085	2030	1975	1910
333	2365	2275	2172	2109	2045	1975
353	2450	2330	2240	2194	2125	2050
373	2540	2416	2375	2260	2186	2125
393	2635	2492	2476	2340	2255	2180
413	2718	2550	2490	2410	2324	2264
433	2780	2630	2565	2485	2378	2339
453	2865	2718	2644	2568	2469	2410
473	2970	2800	2720	2635	2539	2470
493	3060	2860	2800	2710	2606	2550
513	3150	2935	2880	2790	2687	2628
533	3210	3026	2940	2835	2746	2690
553	3300	3100	3010	2928	2818	2750
573	3380	3170	3080	3006	2884	2838
593	3450	3260	3140	3075	2956	2890
613	3545	3335	3200	3128	3008	2940
633	3575	3400	3270	3184	3069	3000
653	3645	3455	3350	3218	3125	3035
673	3700	3500	3410	3258	3160	3070
693	3752	3650	3450	3300	3200	3095
Образец №4-х.ч. изобутан (2-метилпропан) +1,5% одностенных углеродных нанотрубок						
293	2350	2260	2120	2109	2045	1960
313	2415	2312	2190	2160	2092	2010
333	2480	2384	2240	2225	2160	2075
353	2565	2458	2315	2300	2234	2140
373	2660	2520	2452	2386	2300	2220
393	2750	2600	2480	2450	2365	2290

413	2780	2670	2540	2520	2428	2360
433	2875	2735	2638	2590	2486	2417
453	2900	2815	2710	2685	2550	2500
473	3080	2900	2780	2730	2635	2580
493	3175	2970	2875	2800	2700	2648
513	3255	3040	2935	2875	2770	2714
533	3312	3116	3010	2925	2836	2785
553	3410	3200	3090	3010	2900	2850
573	3500	3250	3170	3100	2948	2930
593	3560	3335	3200	3155	3035	2980
613	3680	3400	3255	3250	3086	3050
633	3680	3470	3300	3290	3140	3100
653	3740	3535	3420	3310	3207	3145
673	3790	3630	3476	3348	3244	3158
693	3840	3700	3540	3375	3255	3170
Образец №5-х.ч. изобутан (2-метилпропан) +2,0% одностенных углеродных нанотрубок						
293	2450	2380	2260	2224	2164	2095
313	2540	2420	2300	2270	2200	2140
333	2600	2500	2380	2340	2270	2200
353	2688	2560	2430	2418	2330	2280
373	2785	640	2570	2470	2400	2350
393	2880	2710	2620	2560	2466	2407
413	2950	2770	2675	2624	2535	2475
433	3030	2840	2750	2686	2590	2540
453	3110	2910	2825	2760	2670	2620
473	3200	3050	2900	2780	2725	2670
493	3280	3130	2990	2900	2806	2740
513	3370	3200	3060	2950	2859	2820
533	3440	3288	3130	3005	2930	2870
553	3530	3340	3210	3085	3000	2940
573	3610	3400	3280	3160	3050	3000
593	3680	3490	3350	3210	3114	3056
613	3740	3500	3400	3280	3175	3108
633	3790	3550	3436	3325	3230	3156

653	3850	3610	3470	376	3279	3195
673	3890	3700	3580	3410	3318	3234
693	3930	3780	3630	3435	3355	3258
Образец №6-х.ч. изобутан (2-метилпропан) +2,5% одностенных углеродных нанотрубок						
293	2560	2510	2390	2336	2275	2185
313	2645	2550	2430	2376	2320	2229
333	2726	2630	2500	2450	2375	2300
353	2800	2700	2576	2524	2440	2368
373	2890	2775	2670	2590	2510	2440
393	2970	2840	2700	2660	2630	2490
413	3040	2890	2750	2725	2670	2576
433	3120	2970	2800	2755	2700	2639
453	3205	3030	2875	2850	2760	2700
473	3286	3116	2940	2910	2830	2764
493	3375	3180	3036	2985	2889	2835
513	3450	3250	3100	3060	2950	2900
533	3525	3320	3170	3094	3000	2950
553	3620	3380	3250	3180	3075	3034
573	3690	3460	3310	3254	3146	3096
593	3765	3540	3450	3320	3180	3140
613	3820	3610	3490	3360	3250	3179
633	3880	3660	3540	3408	3300	3234
653	3940	3700	3580	3445	3356	3260
673	3970	3790	3640	3486	3400	3305
693	4010	3886	3730	3510	3440	3326

В соответствии с экспериментально-теоретическими исследованиями теплопроводность, температуропроводность и плотность жидкого изобутана и Н-бутана носит характер температурной зависимости, а также давления и концентрации ОУНТ. Согласно полученным результатам, эти параметры при повышении температуры уменьшаются, и наоборот, при росте давления данные показатели увеличиваются. Например, при выдержке раствора (х.ч. изобутан (2-метилпропан)+2,5% ОУНТ) в течение 50 часов со времени добавки нанотрубок, в



условиях комнатной температуры 298К и давления до 49,01МПа, значение теплоемкости снижается до 14,6%, а при температуре 693К это изменение доходит до 17,1% (таблиц 3.28) [164-А, 172-А, 173-А, 182-А, 186-А, 187-А, 188-А, 189-А].

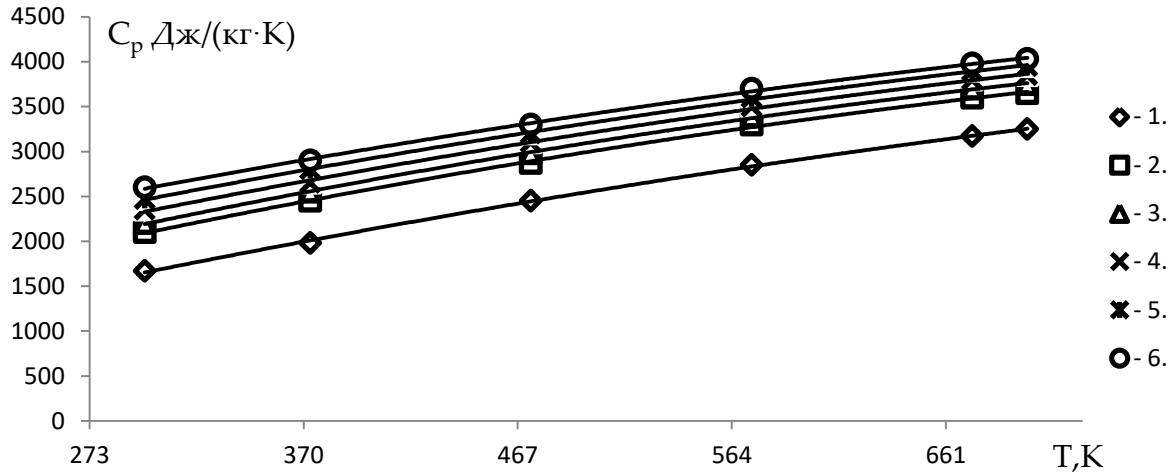


Рисунок 3.25. График зависимости теплоемкости х.ч. изобутана от температуры и концентрации ОУНТ после истечения 50 часов с момента добавки нанотрубок при атмосферном давлении ( $p=0,101\text{МПа}$ ). Обр.№1-х.ч. изобутан (2-метилпропан) без добавки ОУНТ; Обр. №2-х.ч. изобутан (2-метилпропан)+0,5% ОУНТ; Обр. №3-х.ч. изобутан (2-метилпропан)+1,0% ОУНТ; Обр. №4-х.ч. изобутан (2-метилпропан)+ 1,5% ОУНТ; Обр. №5-х.ч.изобутан (2-метилпропан) + 2,0% ОУНТ; Обр. №6-х.ч. изобутан (2-метилпропан)+2,5% ОУНТ.

Как видно из графика, представленного на рисунке 3.25 и данных таблицы 3.28, добавка нанотрубок и повышение температуры способствуют росту удельной изобарной теплоемкости хладагентов (х.ч. изобутан (2-метилпропан)). С повышением температуры изобарная теплоемкость исследуемых газообразных хладагентов (н-бутан и изобутан) растет по линейному и экспоненциальному законам (теплоемкость коллоидной наножидкости), в начале растет по линейному закону, а при повышении температуры изгибается в сторону оси X, т.е. к оси температуры (Т, К). Надо отметить, что удельная изобарная теплоемкость х.ч. изобутана, как показывают исследования и других авторов, изменяется по закону экспоненты. Добавка до 2,5% ОУНТ в х.ч. изобутан при различных температурах повышает теплоемкость следующим образом: при температуре 293К, давлении  $p=0,101\text{МПа}$  и изменении концентрации нанотрубок (ОУНТ) от 0 до 2,5%, теплоемкость растет на  $\Delta_{cp} = 55,2\%$ , при температуре 473К -  $\Delta_{cp} = 25,8\%$ , при

повышении температуры до 673К этот рост достигает  $\Delta_{cp} = 18,6\%$  [164-А, 172-А, 173-А, 182-А, 186-А, 187-А, 188-А, 189-А].

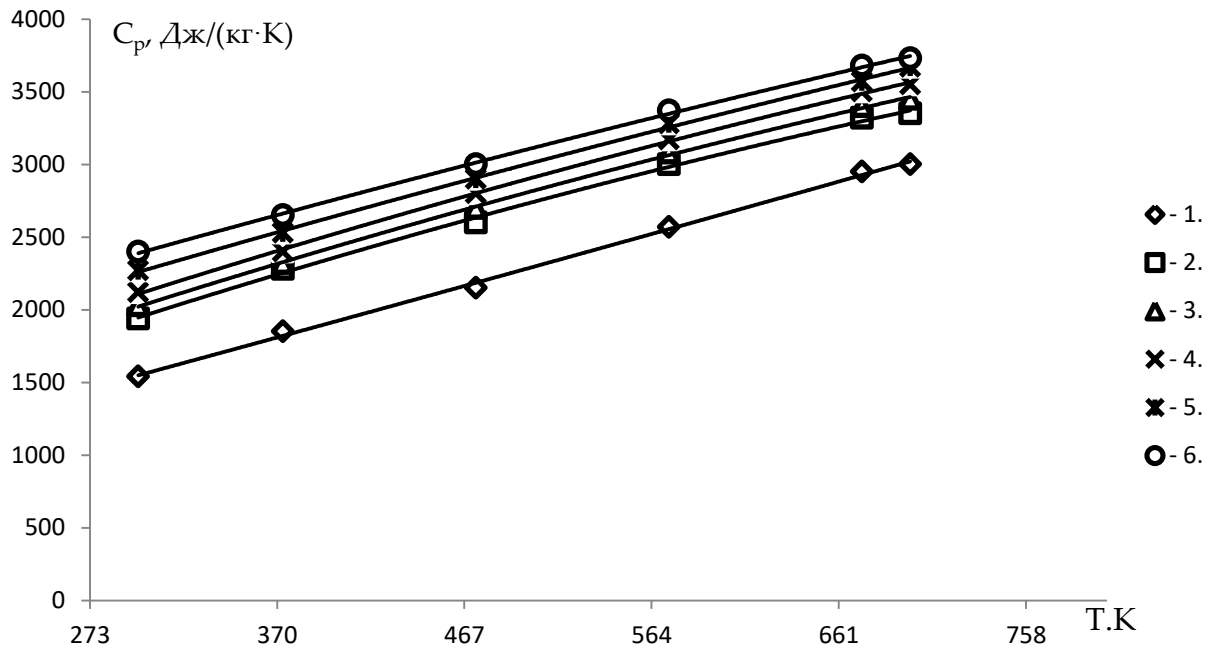


Рисунок 3.26. График зависимости теплоемкости х.ч. изобутана от температуры и концентрации ОУНТ после истечения 50 часов с момента добавки нанотрубок при давлении ( $p=9,81\text{МПа}$ ). Обр. №1-х.ч. изобутан (2-метилпропан) без добавки ОУНТ; Обр. №2-х.ч. изобутан (2-метилпропан)+0,5% ОУНТ; Обр. №3- х.ч. изобутан (2-метилпропан)+1,0% ОУНТ; Обр. №4-х.ч. изобутан (2-метилпропан)+1,5% ОУНТ; Обр. №5-х.ч. изобутан (2-метилпропан)+2,0% ОУНТ; Обр. №6- х.ч. изобутан (2-метилпропан)+2,5% ОУНТ.

Согласно графику (рисунок 3.26) и таблице 3.28, повышение температуры после добавления в хладагент нанотрубок способствует росту его удельной изобарной теплоемкости. Вначале это увеличение подчиняется линейному закону, а затем при дальнейшем росте температуры склоняется в сторону оси X, т.е. к оси температуры (Т, К). Надо отметить, что удельная изобарная теплоемкость х.ч. изобутана, согласно исследованиям других авторов [164-А, 172-А, 173-А, 182-А, 186-А, 187-А, 188-А, 189-А] и наших расчетно-экспериментальных исследований, изменяется по закону экспоненты. Добавка до 2,5% ОУНТ в х.ч. изобутан при различных температурах повышает теплоемкость следующим образом: при температуре 293К, давлении  $p=9,81\text{ МПа}$  и изменении концентрации нанотрубок (ОУНТ) от 0 до 2,5%, теплоемкость раствора растет на  $\Delta_{cp} = 38,1\%$ , при температуре 473К -  $\Delta_{cp} = 26,3\%$ , при повышении температуры до 673К этот рост достигает к  $\Delta_{cp} = 20,8\%$ .

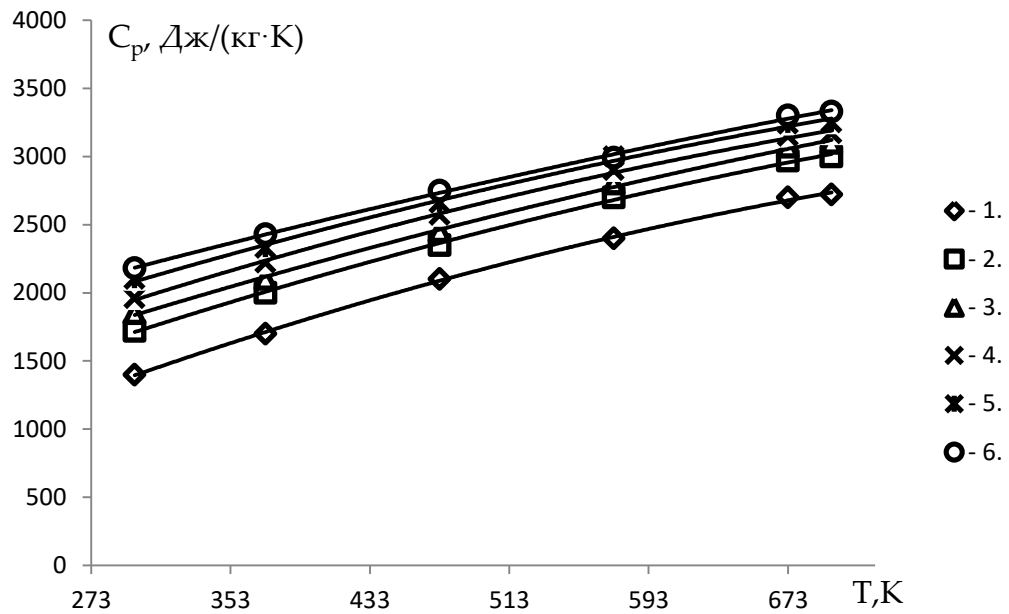


Рисунок 3.27. График зависимости теплоемкости х.ч. изобутана от температуры и концентрации ОУНТ после истечения 50 часов с момента добавки нанотрубок при давлении ( $p=19,62$  МПа). Обр. №1-х.ч. изобутан (2-метилпропан) без добавки ОУНТ; Обр. №2-х.ч. изобутан (2-метилпропан)+0,5% ОУНТ; Обр. №3- х.ч. изобутан (2-метилпропан)+1,0% ОУНТ; Обр. №4-х.ч. изобутан (2-метилпропан)+1,5% ОУНТ; Обр. №5-х.ч. изобутан (2-метилпропан)+2,0% ОУНТ; Обр. №6-х.ч. изобутан (2-метилпропан)+2,5% ОУНТ

Согласно графику, приведенному на рисунке 3.27 и данным таблицы 3.28 добавка нанотрубок и повышение температуры увеличивает удельную изобарную теплоемкость хладагентов (х.ч. изобутан (2-метилпропан)). С повышением температуры изобарная теплоемкость исследуемых жидких хладагентов (н-бутан и изобутан) растет по линейному и экспоненциальному законам (теплоемкость коллоидных наножидкостей), т.е. в начале растет по линейному закону, а при дальнейшем повышении температуры изгибается в сторону оси X, т.е. к оси температуры (Т,К). Надо отметить, что удельная изобарная теплоемкость х.ч. изобутана, как показывают исследования других авторов [164-А, 172-А, 173-А, 182-А, 186-А, 187-А, 188-А, 189-А] и наши расчетно-экспериментальные работы, изменяется по закону экспоненты. Добавка до 2,5% ОУНТ в х.ч. изобутан при различных температурах повышает теплоемкость следующим образом: при температуре 293К, давлении  $p=19,62$  МПа, когда концентрация нанотрубок (ОУНТ) изменяется от 0 до 2,5%, теплоемкость раствора растет на  $\Delta_{cp}=33,0\%$ , при

температуре 473К -  $\Delta_{cp} = 25,7\%$ , а при повышении температуры до 673К этот рост достигает  $\Delta_{cp} = 20,1\%$ .

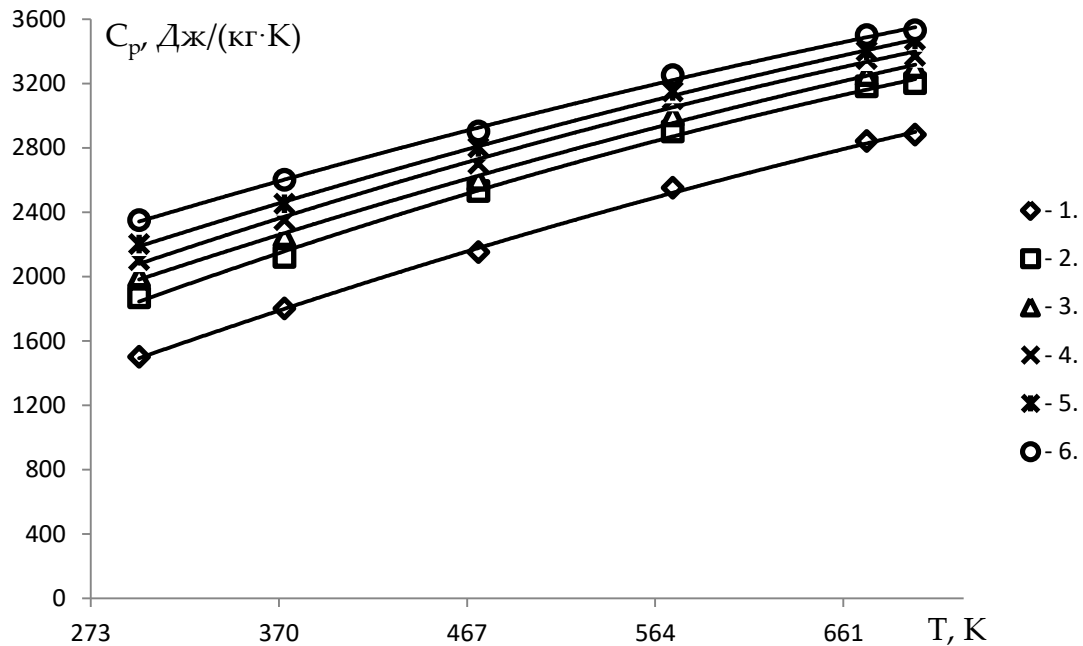


Рисунок 3.28. График зависимости теплоемкости х.ч. изобутана от температуры и концентрации ОУНТ после истечения 50 часов с момента добавки нанотрубок при давлении  $p = 29,43 \text{ МПа}$ . Обр. №1-х.ч. изобутан (2-метилпропан) без добавки ОУНТ; Обр. №2- х.ч. изобутан (2-метилпропан)+0,5% ОУНТ; Обр. №3-х.ч. изобутан (2-метилпропан)+ 1,0% ОУНТ; Обр. №4- х.ч. Изобутан (2-метилпропан)+ 1,5% ОУНТ; Обр. №5-х.ч. изобутан (2-метилпропан)+2,0% ОУНТ; Обр. №6- х.ч. изобутан (2-метилпропан)+2,5% ОУНТ

Как видно из графика, приведенного на рисунке 3.28 и данных таблицы 3.28 добавка нанотрубок и повышение температуры повышает удельную изобарную теплоемкость хладагентов (х.ч. изобутан (2-метилпропан)). С повышением температуры изобарная теплоемкость исследуемых жидких хладагентов (н-бутан и изобутан) растет по линейному и экспоненциальному законам (теплоемкость коллоидных наножидкостей), в начале растет по линейному закону, а при дальнейшем повышении температуры изгибается в сторону оси X, т.е. к оси температуры (Т, К). Надо отметить, что удельная изобарная теплоемкость х.ч. изобутана, как показывают исследования других авторов [164-А, 167-А, 170-А, 173-А, 186-А, 188-А] и наши расчетно-экспериментальные опыты, изменяется по закону экспоненты. Добавка до 2,5% ОУНТ в х.ч. изобутан при различных температурах повышает теплоемкость следующим образом: при температуре 293К, давлении  $p = 29,43 \text{ МПа}$ , когда концентрация нанотрубок (ОУНТ)

изменяется от 0 до 2,5%, теплоемкость растет на  $\Delta_{cp} = 36,1\%$ , при температуре 473К-  $\Delta_{cp} = 25,1\%$ , а при повышении температуры на 673К этот рост достигает  $\Delta_{cp} = 18,7\%$ .

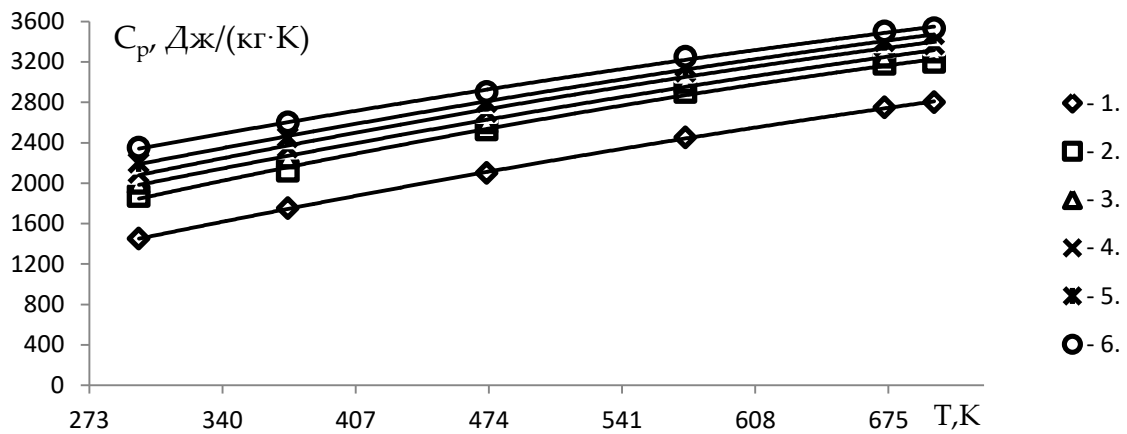


Рисунок 3.29. График зависимости теплоемкости х.ч. изобутана от температуры и концентрации ОУНТ после истечения 50 часов с момента добавки нанотрубок при давлении  $p = 39,32$  МПа. Обр. №1-х.ч. изобутан (2-метилпропан) без добавки ОУНТ; Обр. №2-х.ч. изобутан (2-метилпропан) +0,5% ОУНТ; Обр. №3- х.ч. изобутан (2-метилпропан) +1,0% ОУНТ; Обр. №4-х.ч. изобутан (2-метилпропан) +1,5% ОУНТ; Обр. №5-х.ч. изобутан (2-метилпропан) +2,0% ОУНТ; Обр. №6-х.ч. изобутан (2-метилпропан) +2,5% ОУНТ

Из представленного графика на рисунке 3.29 и данных таблицы 3.28 видно, что добавка нанотрубок и рост температуры повышает удельную изобарную теплоемкость хладагентов (х.ч. изобутан (2-метилпропан)). С ростом температуры изобарная теплоемкость изучаемых жидких хладагентов (Н-бутан и изобутан) растет по линейному и экспоненциальному законам (теплоемкость коллоидных наножидкостей), в начале растет по линейному закону, а при дальнейшем повышении температуры изгибается в сторону оси X, т.е. к оси температуры (Т, К). Стоит отметить, что удельная изобарная теплоемкость х.ч. изобутана, как показывают исследования других авторов [165-А, 173-А, 182-А, 186-А, 188-А, 189-А] и наши расчетно-экспериментальные опыты, изменяется по закону экспоненты. Добавка до 2,5% ОУНТ в х.ч. изобутан при различных температурах повышает теплоемкость следующим образом: при температуре 293К, давлении  $p = 39,32$  МПа, когда изменяется концентрация нанотрубок (ОУНТ) от 0 до 2,5%, теплоемкость растет на  $\Delta_{cp} = 37,7\%$ , при температуре 473К-  $\Delta_{cp} = 23,8\%$ , а при повышении температуры до 673К, этот рост достигает к  $\Delta_{cp} = 18,8\%$ .

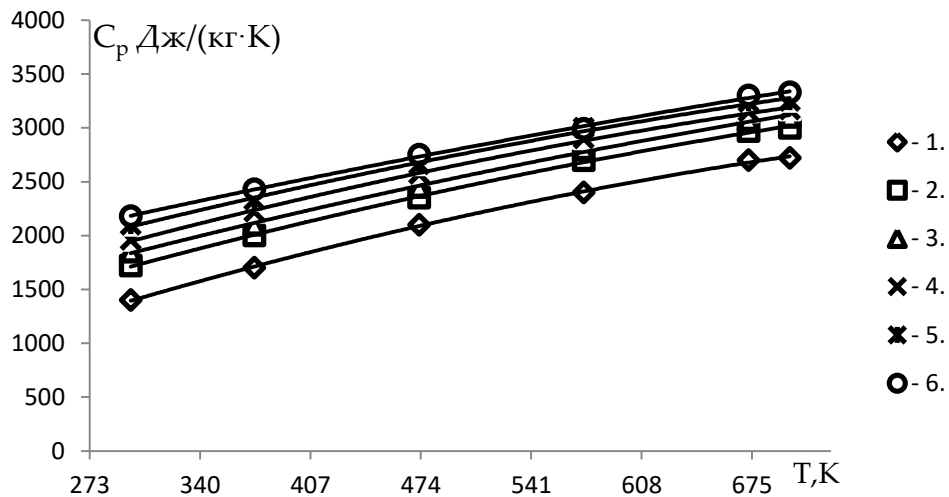


Рисунок 3.30. График зависимости теплоемкости х.ч. изобутана от температуры и концентрации ОУНТ после истечения 50 часов с момента добавки нанотрубок при давлении  $p=49,01$  МПа. Обр. №1-х.ч. изобутан (2-метилпропан) без добавки ОУНТ; Обр. №2-х.ч. изобутан (2-метилпропан) +0,5% ОУНТ; Обр. №3-х.ч. изобутан (2-метилпропан) +1,0% ОУНТ; Обр. №4-х.ч. изобутан (2-метилпропан) +1,5% ОУНТ; Обр. №5-х.ч. изобутан (2-метилпропан) + 2,0% ОУНТ; Обр. №6-х.ч. изобутан (2-метилпропан) +2,5% ОУНТ.

Согласно графику (рисунок 3.30) и данным таблицы 3.28 добавка нанотрубок и увеличение температуры приводит к росту удельной изобарной теплоемкости хладагентов (х.ч. изобутан (2-метилпропан)). По мере увеличения температуры изобарная теплоемкость образцов (н-бутан и изобутан) также увеличивается, подчиняясь линейному и экспоненциальному законам (теплоемкость коллоидных наножидкостей), в начале растет по линейному закону, а с дальнейшим ростом температуры склоняется в сторону оси X, т.е. к оси температуры (Т, К). Следует отметить тот факт, что изменение удельной изобарной теплоемкости х.ч. изобутана согласно литературным источникам [165-А, 169-А, 170-А, 172-А, 180-А, 188-А] и нашим расчетно-экспериментальным данным, происходит в соответствии с законом экспоненты. Добавление до 2,5% ОУНТ в х.ч. изобутан при различных температурах влияет на теплоемкость так: при температуре 293К, давлении  $p=49,01$  МПа и изменении концентрации ОУНТ от 0 до 2,5%, теплоемкость повышается на  $\Delta_{cp} = 36,2\%$ , при температуре 473К  $\Delta_{cp} = 4,9\%$ , при повышении температуры до 673К, этот рост достигает  $\Delta_{cp} = 18,9\%$ .

### 3.5. Использование теплопроводности и теплоемкости для инженерных расчетов исследуемых хладагентов (х.ч. изобутан (2-метилпропан) + одностенные углеродные нанотрубки) в зависимости от температуры

Вариации различных математических моделей всегда занимали особое место для выполнения соответствующего анализа и создания новых технических устройств, которые основаны на закономерностях теплопереноса и течения жидкости. Данные методы привлекательны еще и тем, что ими можно заменить дорогостоящие эксперименты, а также сократить время опытов. Также данные вычислительные методы применяются для построения алгоритма и предварительного планирования этапов выполнения экспериментов, что требует значительного понижения финансовых затрат. Также эти методы применяются для совершенствования, увеличения перечня возможностей приборов и устройств, а также повышения качества получаемых результатов.

Решение задач, связанных с процессами теплопереноса, течения жидкости и т.п., в целом зависит от интегрирования системы нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных по пространственным координатам и времени. Нестационарную одномерную теплопроводность определяют [163-А, 167-А, 169-А, 170-А, 171-А, 172-А, 178-А, 180-А, 181-А, 187-А, 188-А, 189-А].

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + S, \quad (3.1)$$

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + S_h. \quad (3.2)$$

Величины  $\rho c$  - плотность и массовая теплоемкость материала, т.е. произведение  $\rho c$  это объемная или удельная теплоемкость;  $S_h$  - мощность источника тепла в единице объема.

Важно отметить, что решение (3.1) требует проведения экспериментов, т.е. необходимо иметь данные опытов по теплоемкости веществ. Учитывая сказанное, мы задались решением этой непростой задачи.

### 3.6. Расчет теплопроводности исследуемых растворов при различных температурах и давлениях (модели Максвелла и Дульнева)

Нами было выявлено, что теплофизические параметры веществ и материалов меняются с изменением множества других сопутствующих факторов и параметров, например, добавление нанонаполнителя и его концентрация, плотность, температура, давление и др. Структуры с взаимопроникающими компонентами с геометрической точки зрения представляются равноправными, т.е. смесям свойственна инвариантность в случаях смены мест составных компонентов [34, 44, 50, 135, 137-142]:

$$\lambda = f_1(\lambda_1, \lambda_2) = f_2(\lambda_2, \lambda_1), m_1 = m_2. \quad (3.3)$$

Формула для вычисления теплопроводности подобных структур выведена путем анализа процессов теплопереноса в элементарной ячейке:

$$\lambda = \lambda_1 [C^2 + v(1 - C)^2 + 2vC(1 - C)(vC + 1 - C)^{-1}], \quad (3.4)$$

$$v = \lambda_2 / \lambda_1,$$

где  $\lambda_1, \lambda_2$  – теплопроводность компонентов;  $C$  – геометрический показатель модели, который зависит от объемной доли второго компонента следующим образом:

$$m_2 = 2C^3 - 3C^2 + 1. \quad (3.5)$$

Для вычисления показателя  $C$  авторы [138] предлагают применить первую часть (корень) выражения (3.4), т.е.:

$$C = 0,5 + A \cos \frac{\varphi^1}{3}, \quad 270^\circ \leq \varphi^1 \leq 360^\circ$$

$$\text{при } 0 \leq m_2 \leq 0,5 \quad A = -1, \quad \varphi = \arccos(1 - 2m_2),$$

$$\text{при } 0,5 \leq m_2 \leq 1 \quad A = 1, \quad \varphi = (2m_2 - 1). \quad (3.6)$$

Для удобства расчета теплопроводности смеси жидкостей, состоящей из взаимопроникающих компонентов применяется метод последовательного ее сведения к бинарной, с которым можно ознакомиться на примере трехкомпонентной смеси. Первый этап подразумевает исключение третьего компонента из смеси, в результате чего должна остаться двухкомпонентная смесь с отличительными концентрациями, обозначив для первого компонента через  $m'_1$ , а



для второго компонента через  $m'_2 = 1 - m'_1$ . Концентрации  $m'_1$ ,  $m'_2$  с начальными концентрациями взаимосвязаны следующим образом:

$$m'_1 = \frac{m_1}{m_1 + m_2}; \quad m'_2 = \frac{m_2}{m_1 + m_2} \quad (3.7)$$

Также, в качестве примера, для вычисления теплопроводности наночастиц (ОУНТ и МУНТ;  $d_{cp}=40$ нм) как наполнителей и их растворов была использована модель Максвелла-Дульнева при температурах (293-673К) и давлениях (0,101-49,01МПа) (таблицах 3.29 и 3.30) [172-А, 174-А, 176-А, 179-А, 183-А, 185-А, 190-А].

Таблица 3.29. Сравнение экспериментальных и расчетных данных (модель Максвелла-Дульнева) теплопроводности ( $\lambda \cdot 10^3$ , Вт/(м К)) жидкого изобутана (2-метилпропан) без добавки ОУНТ и с добавкой углеродных наночастиц после 50 часов выдержки раствора, при различных температурах и давлении  $p=5,0$  МПа.

Т,К	Образец №1			Образец №3			Образец №5		
	$\lambda_{экс}$	$\lambda_{рас}$	$\Delta, \%$	$\lambda_{экс}$	$\lambda_{рас}$	$\Delta, \%$	$\lambda_{экс}$	$\lambda_{рас}$	$\Delta, \%$
293,3	92,0	92,6	0,68	101,8	103,0	1,18	116,7	119,1	2,1
463,7	38,0	37,5	0,8	54,0	56,2	4,1	74,7	73,4	1,74
628,0	61,3	62,4	1,8	71,7	72,6	2,6	85,8	88,1	2,68

Обр. №1-изобутан (2-метилпропан) х.ч.; Обр. №3-изобутан (2-метилпропан) х.ч. +1,0% ОУНТ; Обр. №5-изобутан (2-метилпропан) х.ч. +2,0% ОУНТ.

Таблица 3.30. Сравнение экспериментальных и расчетных данных (модель Максвелла-Дульнева) теплопроводности ( $\lambda \cdot 10^3$ , Вт/(м К)), системы жидкого изобутана (2-метилпропан) без добавки ОУНТ и с добавкой углеродных наночастиц после истечения 50 часов, при различных температурах и давлении  $p=25,0$ МПа.

Т,К	Образец №2			Образец №4			Образец №6		
	$\lambda_{экс}$	$\lambda_{рас}$	$\Delta, \%$	$\lambda_{экс}$	$\lambda_{рас}$	$\Delta, \%$	$\lambda_{экс}$	$\lambda_{рас}$	$\Delta, \%$
298,6	112,6	114,9	2,04	126,7	123,0	2,92	142,7	144,1	0,98
420,7	84,8	85,6	0,9	90,0	94,2	4,9	114,7	113,4	1,13
583,2	84,5	86,9	2,84	99,3	97,6	1,7	111,8	114,7	2,59

Обр. №2-изобутан (2-метилпропан) х.ч. +0,5% ОУНТ; Обр. №4-изобутан (2-метилпропан) х.ч. +1,5% ОУНТ; Обр. №6-изобутан (2-метилпропан) х.ч. +2,5% ОУНТ.

### **3.7. Влияние одностенных углеродных нанотрубок на изменение теплоемкости жидкого хладагента (2-метилпропан)**

На рисунках 3.31 и 3.32 показаны данные по теплопроводности и теплоемкости х.ч. изобутана (2-метилпропан) и одностенной углеродной нанотрубки с концентрацией до 2,5%, которые получены экспериментально в зависимости от изменения температуры и давления опыта. Согласно графикам (рисунки 3.31 и 3.32) эти параметры с повышением концентрации ОУНТ увеличиваются по линейному (линии 1,2) и параболическому законам (линии 3 и 4). Например, при температуре 293К и давлении  $P=40,0$  МПа добавление ОУНТ от 0,5 до 2,5% приводит к росту теплопроводности изобутана (2-метилпропана) в среднем на 35,3 %, а при  $T=623,9$  К и  $P=40,0$  МПа на 30,4 %. Исходя из этого можно сказать, что с ростом параметров состояния увеличивается и степень влияния ОУНТ на теплопроводность х.ч. изобутана (2-метилпропана). На рисунке 3.32, приведены результаты экспериментально-теоретического исследования удельной изобарной теплоемкости коллоидных растворов хладагента (х.ч. изобутана (2-метилпропана)) для трех изотерм (293,373 и 473)К при давлении  $p=19,62$  МПа. Как видно из данного графика, приведенного на рисунке 3.32 с повышением концентрации ОУНТ теплоемкость исследуемых коллоидных растворов растет по закону параболы. Такая закономерность наблюдается для всех коллоидных растворов во всех изотермах. Повышение теплоемкости растворов по изотермам следующее: при температуре  $T=293$ К и добавке 2,5% ОУНТ в изобутан теплоемкость растет на 54,8%, при 373К- 46,2%, а при 473К этот рост достигает до 31,9%.

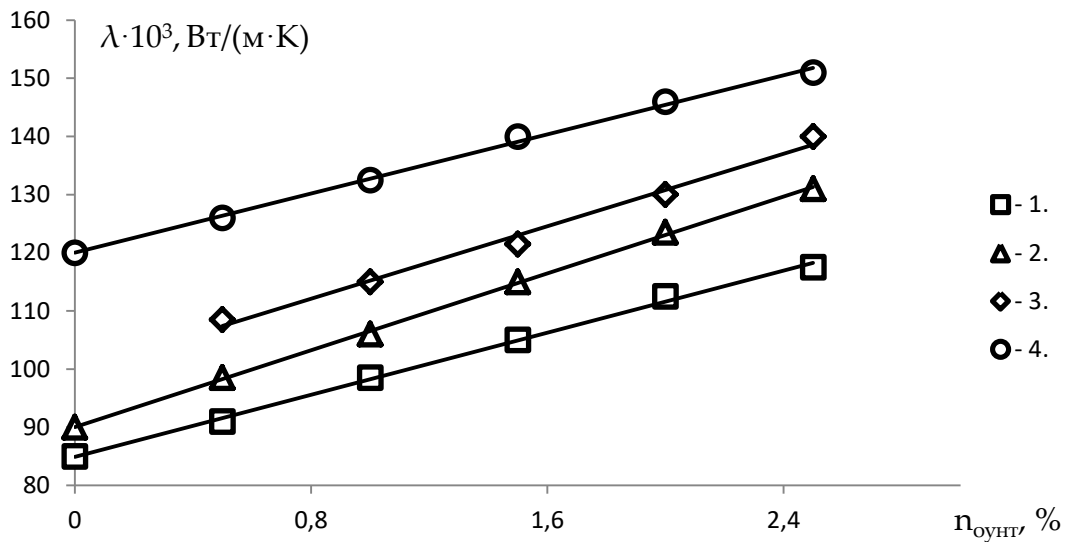


Рисунок 3.31. Влияние ОУНТ на изменение теплопроводности х.ч.изобутана при различных температурах и давлении ( $p=40,0$ МПа) после 50 часов выдержки раствора: 1- $T=298,4$  К; 2- $T=353,6$  К; 3- $T=473,8$  К; 4- $T=623,9$  К

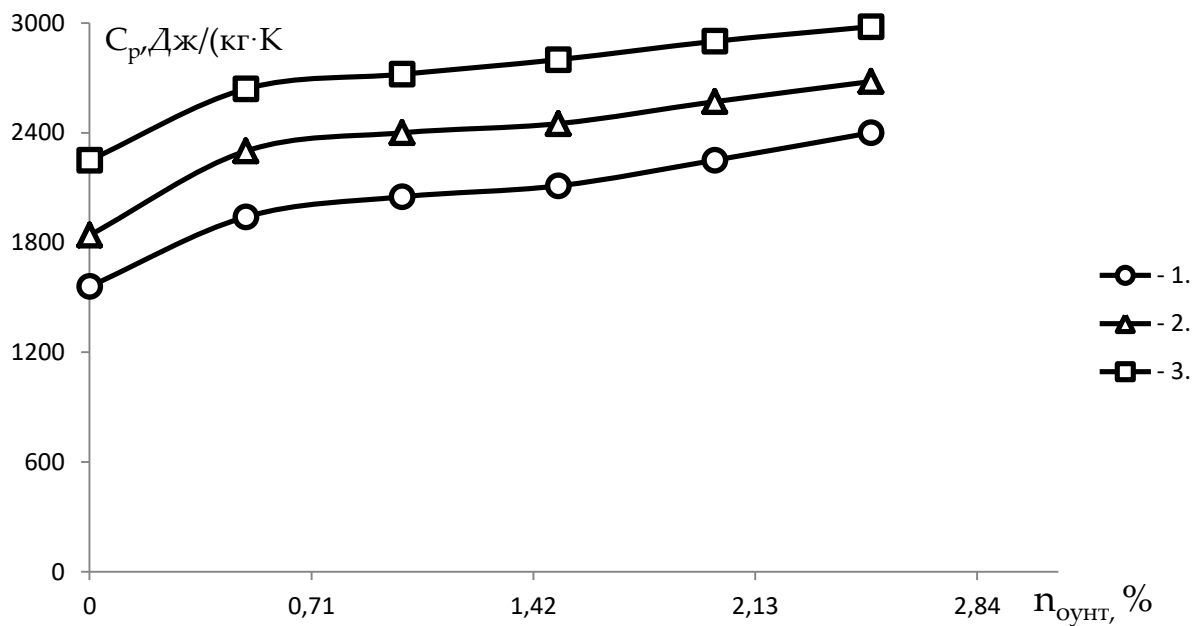


Рисунок 3.32. Влияние ОУНТ на изменение теплоемкости х.ч. изобутана при различных температурах и давлении ( $p=19,62$ МПа) после 50 часов выдержки раствора: 1- $T=293$ К; 2- $T=373$ К; 3- $T=473$  К

### Выводы по третьей главе

1. Подтвержден тот факт, что рост температуры способствует увеличению межчастичного расстояния, что в свою очередь приводит к ухудшению

теплообмена между изотермическими слоями, соответственно и теплопроводность образцов уменьшается.

2. Показано, что при увеличении давления межчастичное пространство вещества уменьшается, в следствие чего уменьшается его объем, а плотность соответственно увеличивается

3. Установлено, что добавление в систему до 2,5% одностенных углеродных нанотрубок способствует возникновению разности критических температур чистого н-бутана и изобутана (2-метилпропан), которая соответствует  $T_{\text{переход}}=26\text{К}$ , т.е. 8,9% относительно температуры перехода из состояния флюида в газовое состояние системы изобутана +одностенные углеродные нанотрубки.

4. В главе приведены результаты опытов по исследованию теплопроводности теплоемкости системы изобутан + одностенные углеродные нанотрубки при разных температурах и концентрациях (рис. 3.1 и 3.2).

5. С помощью модели Максвела – Дульнева выполнен расчет теплопроводности растворов н-бутана и изобутана с одностенными углеродными нанотрубками в газовой и жидкой фазах при различных температурах и давлениях.

## ГЛАВА 4. ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПО ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ И ТЕПЛОЕМКОСТИ ИССЛЕДУЕМЫХ КОЛЛОИДНЫХ РАСТВОРОВ СИСТЕМЫ ИЗОБУТАНА

В данной главе выполнено обобщение результатов экспериментов по теплопроводности, теплоемкости коллоидных растворов хладагентов при разном давлении, температурах и концентрациях ОУНТ и МУНТ в их составе. На основе соответствующих обработок получены аппроксимационные зависимости теплопроводности и теплоемкости образцов в зависимости от температуры и давления.

### 4.1. Обобщение экспериментальных данных по теплопроводности и теплоемкости хладагентов в зависимости от температуры и давления

Температурная зависимость теплопроводности и теплоемкости изобутана и его коллоидных растворов с одно- и многостенными углеродными нанотрубками описывается таким образом [163-А, 165-А, 167-А, 169-А, 170-А, 171-А, 172-А, 178-А, 180-А, 181-А, 187-А, 188-А, 189-А, 190-А, 191-А, 192-А, 193-А]:

$$\frac{\lambda_{P,T}}{\lambda_{P,T}^*} = f\left(\frac{T}{T_1}\right), \quad (4.1)$$

$$\frac{C_{P,T}}{C_{P,T}^*} = f\left(\frac{T}{T_1}\right), \quad (4.2)$$

где  $\lambda$ ,  $C_{p,T}$  - теплопроводность и теплоемкость образцов при различных параметрах состояния ( $T$ ,  $P$ ) и  $\lambda_{P,T}^*$ ;  $C_{P,T}^*$  - значения теплопроводности, теплоемкости при температурах  $T$  и  $T_1$ ;  $T_1=413\text{K}$ .

Так как это видно на графиках 4.1 и 4.2, выражения (4.1) и (4.2) хорошо описывают рассматриваемые системы (изобутан (2-метилпропан) + одностенные углеродные нанотрубки), кривые которых имеют следующий вид:

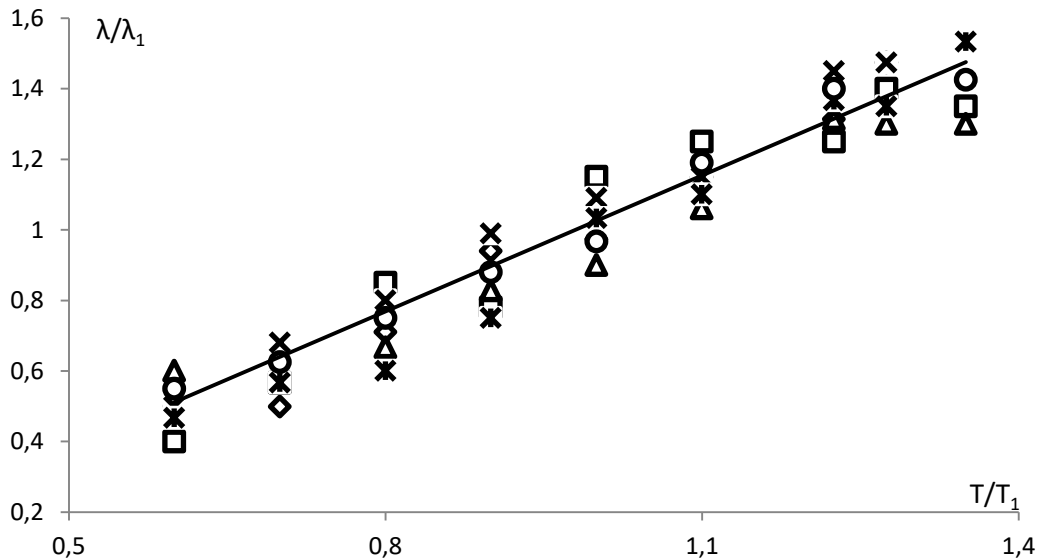


Рисунок 4.1. Зависимость относительной теплопроводности ( $\lambda/\lambda_1$ ) от относительной температуры ( $T/T_1$ ) исследуемых систем изобутана (2-метилпропан) как в чистом виде, так и с добавкой одностенных углеродных нанотрубок после 50 часов выдержки в хладагенте: 1- жидкий изобутан (2-метилпропан); 2-изобутан (2-метилпропан)+0,5 % одностенных углеродных нанотрубок; 3- изобутан (2-метилпропан)+1,0 % одностенных углеродных нанотрубок; 4- изобутан (2-метилпропан)+1,5 % одностенных углеродных нанотрубок; 5-изобутан (2-метилпропан)+ 2,0 % одностенных углеродных нанотрубок; 6-изобутан (2-метилпропан)+ 2,5 % одностенных углеродных нанотрубок [167-А, 172-А, 174-А, 176-А, 179-А, 183-А, 190-А, 193-А]

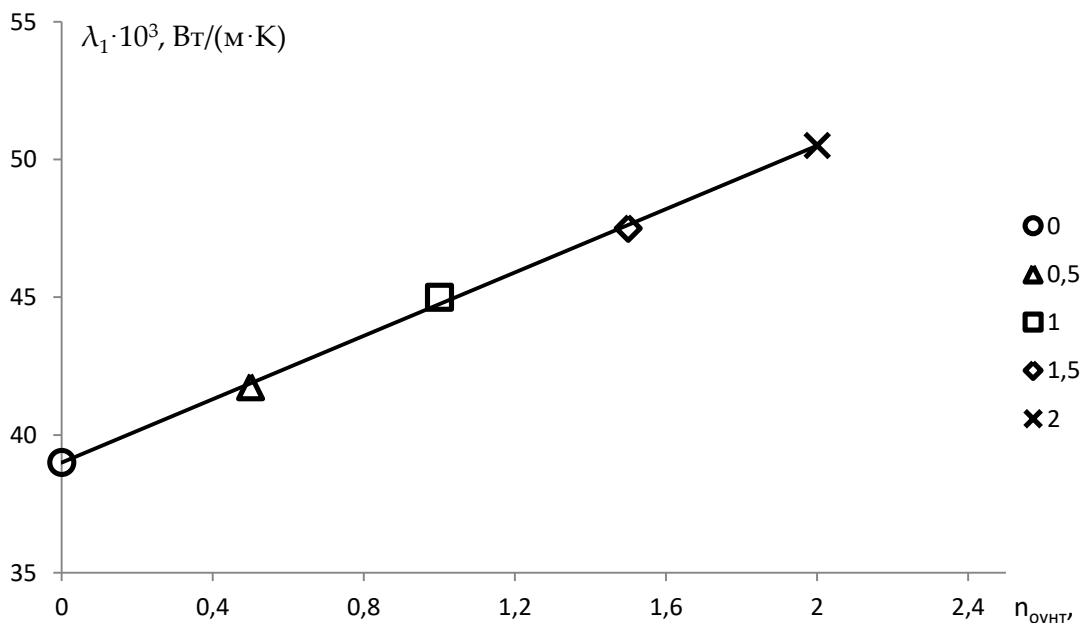


Рисунок 4.2. Зависимость относительной теплоемкости ( $C_p, T/C_p, T_1$ ) от относительной температуры ( $T/T_1$ ) исследуемых систем изобутана (2-метилпропан) как в чистом виде, так и с добавкой одностенных углеродных нанотрубок после выдержки 50 часов в хладагенте: 1- жидкий изобутан (2-метилпропан); 2-изобутан (2-метилпропан)+0,5% одностенных углеродных нанотрубок; 3- изобутан (2-метилпропан)+ 1,0 % одностенных углеродных нанотрубок; 4-изобутан (2-метилпропан)+ 1,5 % одностенных углеродных нанотрубок; 5-изобутан (2-

метилпропан)+2,0 % одностенных углеродных нанотрубок; 6-изобутан (2-метилпропан)+ 2,5 % одностенных углеродных нанотрубок [164-А, 172-А, 182-А, 186-А, 188-А, 189-А]

- для системы изобутана (2-метилпропан) и ОУНТ:

$$\lambda_{p,T} = \left[ 1.33 \left( \frac{T}{T_1} \right) - 0,367 \right] \cdot \lambda_{p,T}^*, \frac{\text{Вт}}{(\text{м} \cdot \text{К})} \quad (4.3)$$

$$C_{p,T} = \left[ 0.9 \left( \frac{T}{T_1} \right) + 0,1 \right] \cdot C_{p,T}^*, \frac{\text{Дж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})} \quad (4.4)$$

По результатам анализа значений  $\lambda_1$ ,  $C_{p,T}^*$ , было установлено, что они представляют собой функцию концентрации нанонаполнителей, т.е. ОУНТ.

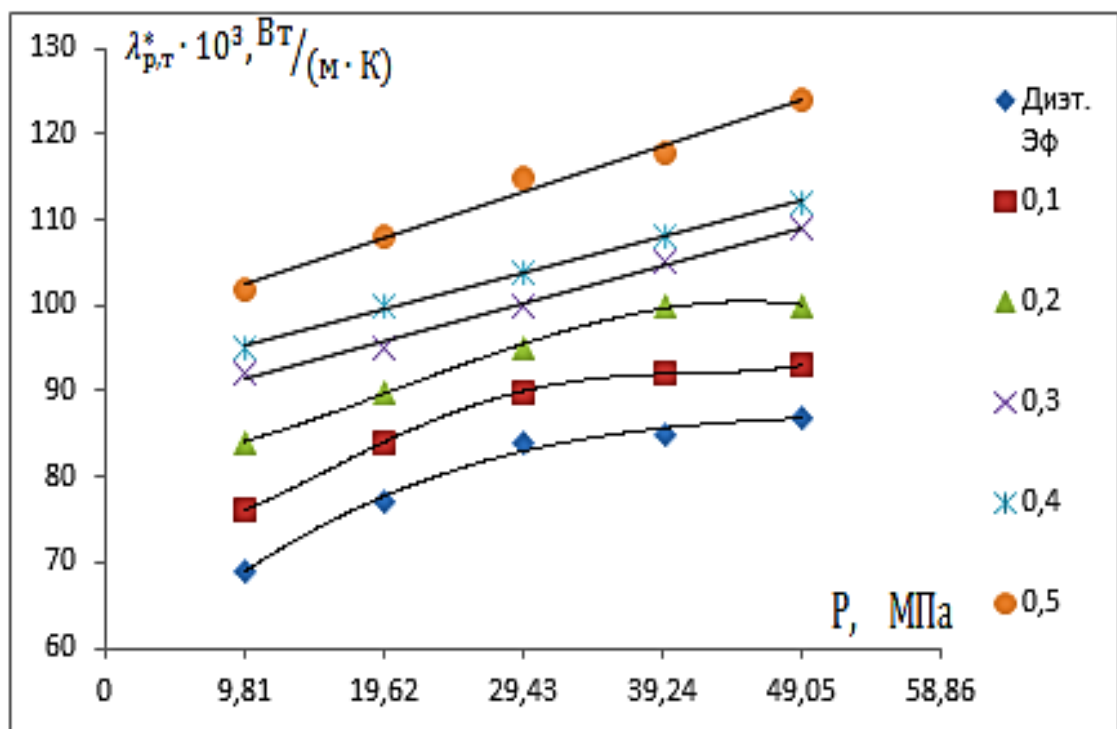


Рисунок 4.3. Зависимость теплопроводности ( $\lambda_{p,T}^*$ ) исследуемых веществ от давления P, МПа: 1- жидкий изобутан (2-метилпропан); 2-изобутан (2-метилпропан)+0,5% одностенных углеродных нанотрубок; 3- изобутан (2-метилпропан)+ 1,0 % одностенных углеродных нанотрубок; 4-изобутан (2-метилпропан)+ 1,5 % одностенных углеродных нанотрубок; 5-изобутан (2-метилпропан)+2,0 % одностенных углеродных нанотрубок; 6-изобутан (2-метилпропан)+ 2,5 % одностенных углеродных нанотрубок.

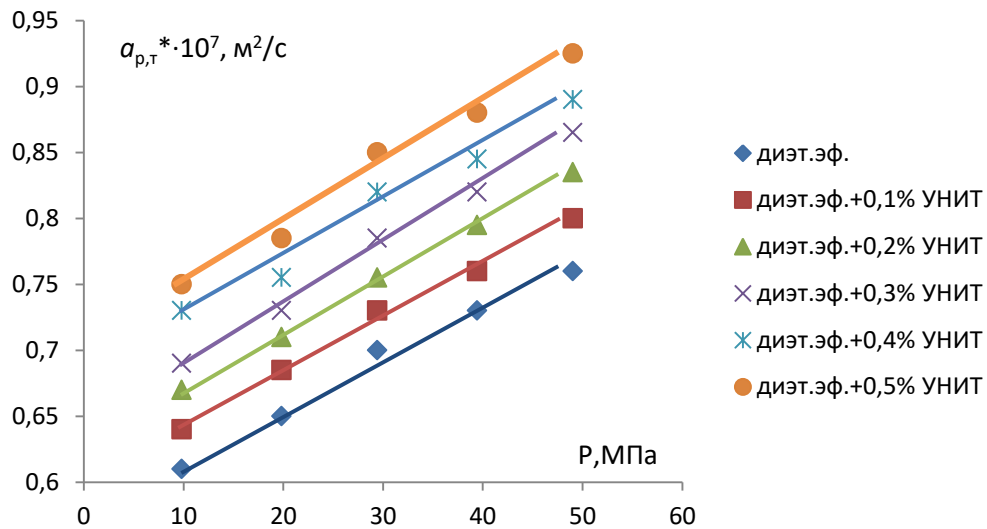


Рисунок 4.4. Зависимость ( $C_{p,t}^*$ ) исследуемых хладагентов от давления  $P$ , МПа: 1- жидкий изобутан (2-метилпропан); 2-изобутан (2-метилпропан)+0,5% одностенных углеродных нанотрубок; 3- изобутан (2-метилпропан)+ 1,0 % одностенных углеродных нанотрубок; 4-изобутан (2-метилпропан)+ 1,5 % одностенных углеродных нанотрубок; 5-изобутан (2-метилпропан)+2,0 % одностенных углеродных нанотрубок; 6-изобутан (2-метилпропан)+ 2,5 % одностенных углеродных нанотрубок

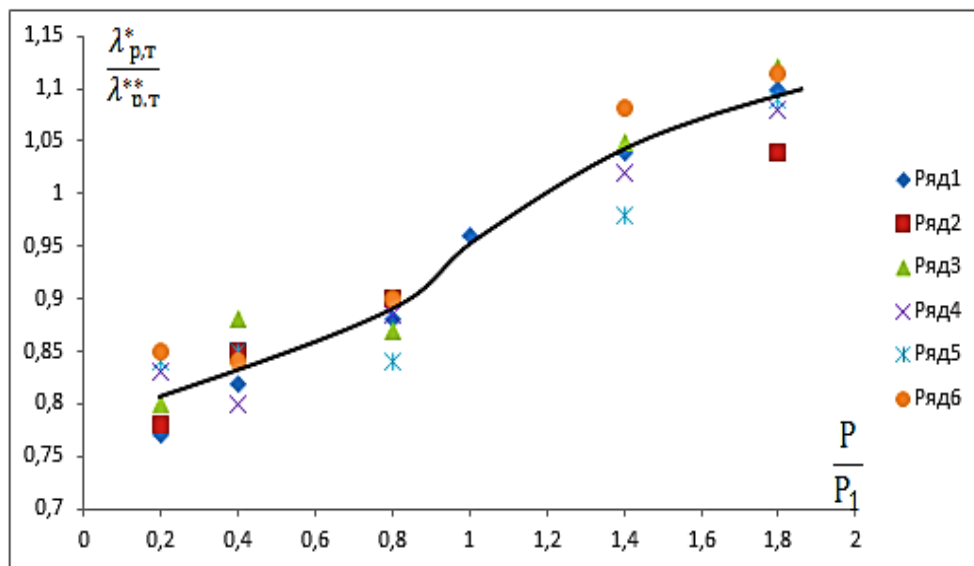


Рисунок 4.5. Зависимость  $\frac{\lambda_{p,t}^*}{\lambda_{p,t}^{**}}$  исследуемых образцов от  $\left(\frac{P}{P_1}\right)$ : 1- жидкий изобутан (2-метилпропан); 2-изобутан (2-метилпропан)+0,5% одностенных углеродных нанотрубок; 3-изобутан (2-метилпропан)+ 1,0 % одностенных углеродных нанотрубок; 4-изобутан (2-метилпропан)+ 1,5 % одностенных углеродных нанотрубок; 5-изобутан (2-метилпропан)+2,0 % одностенных углеродных нанотрубок; 6-изобутан (2-метилпропан)+ 2,5 % одностенных углеродных нанотрубок.



Далее для обобщения значений  $\lambda_{p,T}^*$  и  $C_{p,T}^*$  выведены соответствующие графики их зависимостей от  $P/P_1$   $\frac{C_{p,T}^*}{C_{p,T}^{**}} = f\left(\frac{P}{P_1}\right) C_P$  и  $\frac{\lambda_{p,T}^*}{\lambda_{p,T}^{**}} = f\left(\frac{P}{P_1}\right)$ .

Выполнимость  $\frac{\lambda_{p,T}^*}{\lambda_{p,T}^{**}} = f\left(\frac{P}{P_1}\right)$  и  $\frac{C_{p,T}^*}{C_{p,T}^{**}} = f\left(\frac{P}{P_1}\right)$  показана на рис. 4.5 и 4.6.

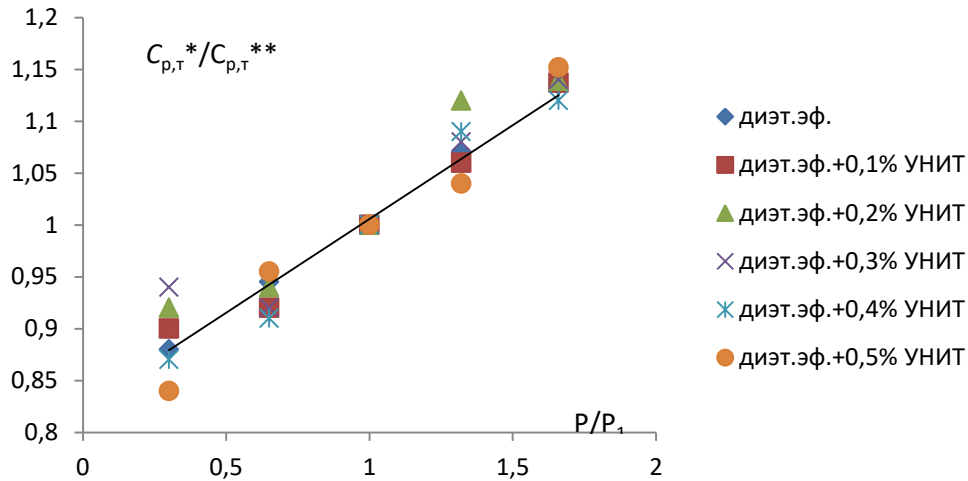


Рисунок 4.6. Зависимость  $\frac{C_{p,T}^*}{C_{p,T}^{**}}$  исследуемых образцов от  $\left(\frac{P}{P_1}\right)$ : 1- жидкий изобутан (2-метилпропан); 2-изобутан (2-метилпропан)+0,5% одностенных углеродных нанотрубок; 3-изобутан (2-метилпропан)+ 1,0 % одностенных углеродных нанотрубок; 4-изобутан (2-метилпропан)+ 1,5 % одностенных углеродных нанотрубок; 5-изобутан (2-метилпропан)+2,0 % одностенных углеродных нанотрубок; 6-изобутан (2-метилпропан)+ 2,5 % одностенных углеродных нанотрубок.

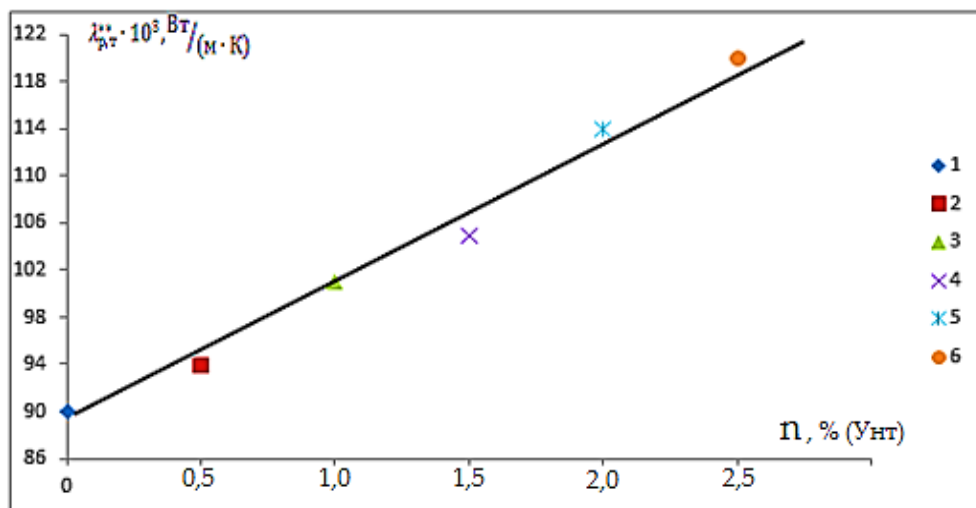


Рисунок 4.7. Зависимость  $(\lambda_{p,T}^{**})$  исследуемых образцов от концентрации одностенных углеродных нанотрубок: 1- жидкий изобутан (2-метилпропан); 2-изобутан (2-метилпропан)+0,5% одностенных углеродных нанотрубок; 3- изобутан (2-метилпропан)+ 1,0 % одностенных углеродных нанотрубок; 4-изобутан (2-метилпропан)+ 1,5 % одностенных углеродных нанотрубок; 5-изобутан (2-метилпропан)+2,0 % одностенных углеродных нанотрубок; 6-изобутан (2-метилпропан)+ 2,5 % одностенных углеродных нанотрубок

Согласно графикам (рисунки 4.5 и 4.6), практические все полученные значения укладываются вдоль своих общих линий (прямая и кривая), которые численно можно описать следующим образом [168-А, 175-А, 183-А, 186-А, 188-А, 189-А]:

$$\frac{\lambda_{p,T}^*}{\lambda_{p,T}^{**}} = \left[ 0,022 \left( \frac{P}{P_1} \right)^2 + 0,214 \left( \frac{P}{P_1} \right) + 0,76 \right], \quad (4.5)$$

$$\frac{C_{P,T}^*}{C_{P,T}^{**}} = 0,214 \left( \frac{P}{P_1} \right) + 0,786 \quad (4.6)$$

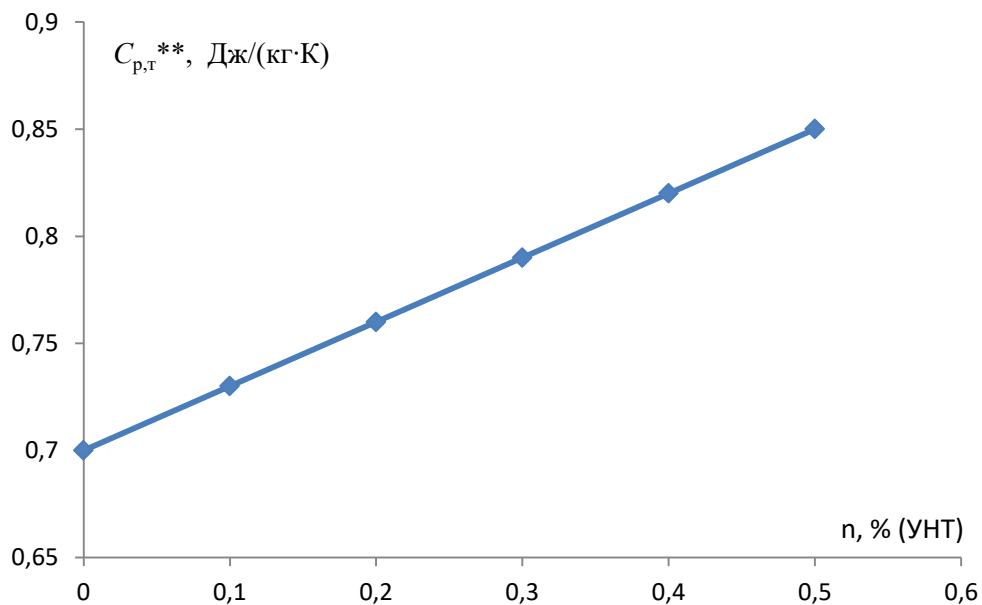


Рисунок 4.8. Зависимость ( $C_{p,T}^{**}$ ) исследуемых образцов от концентрации одностенных углеродных нанотрубок: 1- жидкий изобутан (2-метилпропан); 2-изобутан (2-метилпропан)+0,5% одностенных углеродных нанотрубок; 3- изобутан (2-метилпропан)+ 1,0 % одностенных углеродных нанотрубок; 4-изобутан (2-метилпропан)+ 1,5 % одностенных углеродных нанотрубок; 5-изобутан (2-метилпропан)+2,0 % одностенных углеродных нанотрубок; 6-изобутан (2-метилпропан)+ 2,5 % одностенных углеродных нанотрубок.

По итогам анализа значений  $\lambda_{p,T}^{**}$  и  $C_{p,T}^{**}$  или  $a$  было выявлено, что они являются функциями концентрации одностенных углеродных нанотрубок (рис. 4.7 и 4.8):

$$\lambda_{p,T}^{**} = [4,5(n_{\text{УНТ}}) + 90,25] \cdot 10^{-3}, \text{ Вт/(м. К)} \quad (4.7)$$

$$C_{P,T}^{**} = (370 \cdot n_{\text{унт}} + 2135), \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) \quad (4.8)$$

Из уравнений (4.5) и (4.7) получим

$$\lambda_{P,T}^* = [0.022\left(\frac{P}{P_1}\right)^2 + 0.214\left(\frac{P}{P_1}\right) + 0.76] \cdot [11.5(N_{\text{оунт}}) + 90.25] \cdot 10^{-3}, \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}). \quad (4.9)$$

По выражениям (4.6) и (4.8), можно получить

$$C_{P,T}^* = [0,214\left(\frac{P}{P_1}\right) + 0,785] \cdot (370 n_{\text{оунт}} + 2135), \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) \quad (4.10)$$

Из уравнений (4.3) и (4.4) с учетом (4.5)-(4.10) для численного определения теплопроводности и теплоемкости изучаемых хладагентов и их растворов (изобутан (2-метилпропан)+ОУНТ) при изменении параметров состояния и концентрации нанонаполнителя получаем следующее эмпирическое уравнение:

$$\lambda_{P,T} = \left\{ 1,339 \left(\frac{T}{T_1}\right)^2 + 3,628 \left(\frac{T}{T_1}\right) + 3,29 \right\} \cdot [0,022 \left(\frac{P}{P_1}\right)^2 + 0,214 \left(\frac{P}{P_1}\right) + 0,76] \cdot [11,5(n_{\text{унт}}) + 90,25] \cdot 10^{-3}, \text{ Вт}(\text{м} \cdot \text{К}), \quad (4.11)$$

$$C_{P,T} = \left[ 0,9 \left(\frac{T}{T_1}\right) + 0,1 \right] \cdot \left[ 0,214 \cdot \left(\frac{P}{P_1}\right) + 0,786 \right] \cdot (370 n_{\text{оунт}} + 2135), \frac{\text{Дж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}, \quad (4.12)$$

где  $T_1 = 513 \text{ К}$ ;  $P_1 = 29,43 \text{ МПа}$ .

Эмпирическими уравнениями (4.11) и (4.12) можно выполнить соответствующий расчет теплопроводности и теплоемкости внеопытных растворов данной системы при различных параметрах состояния, однако необходимо располагать точными значениями концентрации добавляемых ОУНТ [166-А, 172-А, 175-А, 177-А, 180-А, 183-А, 185-А, 190-А].

Проверка уравнений (4.11) и (4.12) показала хорошие результаты, т.е. расчеты с их помощью с погрешностью 2-5% воспроизводят экспериментальные значения теплопроводности и теплоемкости изученных образцов при температурном интервале (293-653) К [163-А, 169-А, 170-А, 172-А, 178-А, 180-А, 187-А, 189-А].

## 4.2. Взаимосвязь между теплопроводностью и теплоемкостью исследуемых наножидкостей при атмосферном давлении

Чтобы показать связь теплопроводности с теплоемкостью изучаемых веществ под влиянием атмосферного давления, мы воспользовались следующей функциональной зависимостью для обработки соответствующих экспериментальных данных [167-А, 170-А, 172-А, 180-А, 187-А, 189-А]:

$$\frac{\lambda}{\lambda_1} = f\left(\frac{C_{p,T}}{C_{p,T}^*}\right), \quad (4.13)$$

где  $\lambda$ ,  $C_{p,T}^*$  – соответственно теплопроводность и теплоемкость изучаемых веществ при различных температурах  $T$ ;  $\lambda_1$ ,  $C_{p,T}^*$  – соответственно теплопроводность и теплоемкость веществ при температуре  $T_1$ , которая соответствует  $T_1=413\text{К}$ .

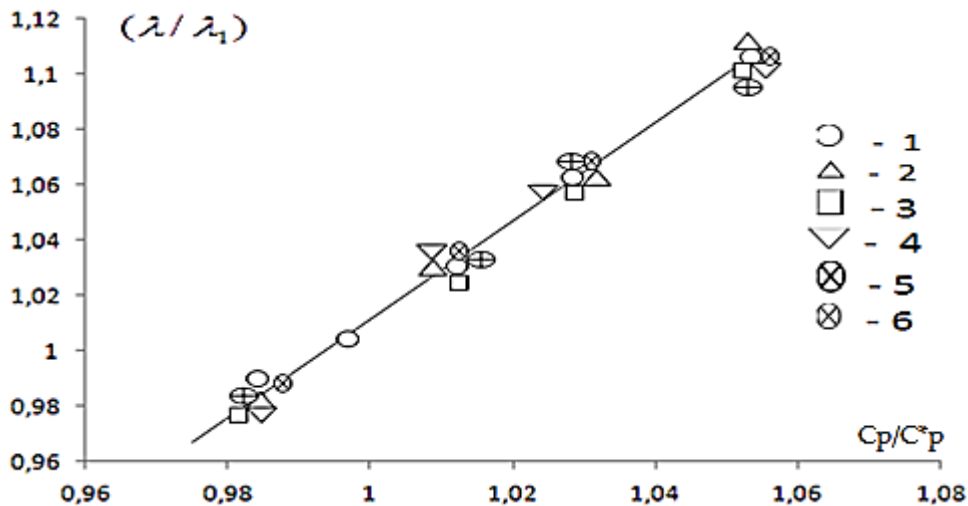


Рисунок 4.9. Зависимость относительной теплопроводности ( $\lambda/\lambda_1$ ) исследуемых растворов от их относительной теплоемкости ( $\frac{C_p}{C_p^*}$ ) при атмосферном давлении изобутана (2-метилпропан) как в чистом виде, так и с добавкой одностенных углеродных нанотрубок после 50 часов выдержки в хладагенте: 1- жидкий изобутан (2-метилпропан); 2-изобутан (2-метилпропан)+0,5 % одностенных углеродных нанотрубок; 3- изобутан (2-метилпропан)+ 1,0 % одностенных углеродных нанотрубок; 4- изобутан (2-метилпропан)+ 1,5% одностенных углеродных нанотрубок; 5-изобутан (2-метилпропан)+ 2,0 % одностенных углеродных нанотрубок; 6- изобутан (2-метилпропан)+ 2,5% одностенных углеродных нанотрубок.

Выполнимость функциональной зависимости (4.13) применительно к нашим образцам представлена в виде графика на рисунке 4.15.

Уравнение прямой, изображенной на рисунке 4.15 для образцов имеет следующий вид:

- для теплопроводности

$$\lambda = \left[ 2 \left( \frac{c_p}{c_p^*} \right) - 0,98 \right] \cdot \lambda_1, \frac{\text{Вт}}{(\text{м} \cdot \text{К})}, \quad (4.14)$$

Теплопроводность растворов изобутана с ОУНТ при температуре  $T_1$  приобретает следующий вид:

$$\lambda_1 = \left[ 0,0018 (n_{\text{ОУНТ}})^2 + 0,0045 (n_{\text{ОУНТ}}) + 0,1314 \right], \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}, \quad (4.15)$$

По выражению (4.14), учитывая (4.15), расчет теплопроводности исследуемых систем в зависимости от теплоемкости при температуре  $T_1$ , принятой 413К и атмосферном давлении будет производиться следующим образом:

- для теплопроводности

$$\lambda = \left[ 2 \left( \frac{c_p}{c_p^*} \right) - 0,98 \right] \left( 0,0018 (n_{\text{ОУНТ}})^2 + 0,0045 (n_{\text{ОУНТ}}) + 0,1314 \right), \frac{\text{Вт}}{(\text{м} \cdot \text{К})}. \quad (4.16)$$

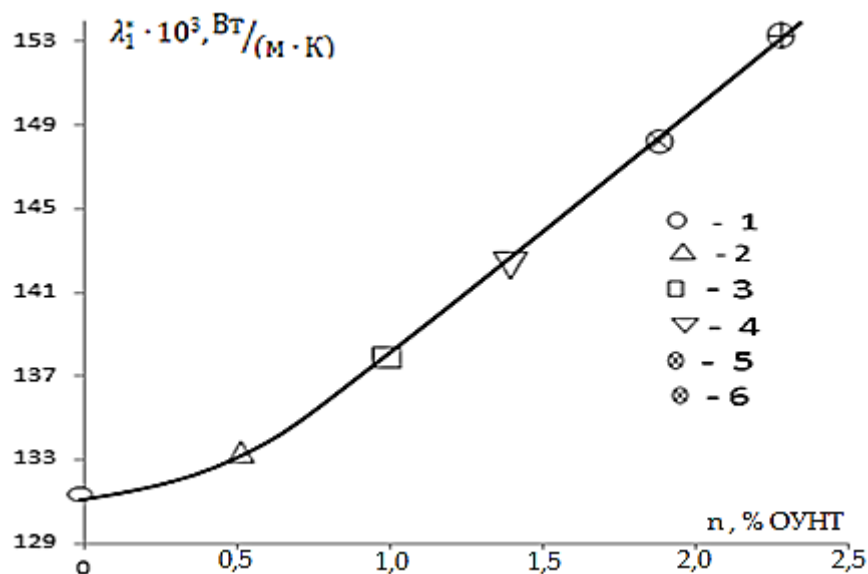


Рисунок 4.10. Зависимость  $\lambda^*$  исследуемых образцов от концентрации одностенных углеродных нанотрубок при атмосферном давлении: 1-х.ч.изобутан (2-метилпропан); 2-х.ч. изобутан (2-метилпропан)+0,5% ОУНТ; 3-х.ч.изобутан (2-метилпропан)+1,0% ОУНТ; 4-х.ч.изобутан (2-метилпропан)+1,5%ОУНТ; 5-х.ч.изобутан (2-метилпропан)+2,0%ОУНТ; 6-х.ч.изобутан (2-метилпропан)+2,5% ОУНТ.

Выражение (4.16) предназначено для численного определения теплопроводности экспериментально исследованных веществ (хладагент и его растворы с ОУНТ) с учетом их теплоемкости, а также изменения концентрации нанонаполнителей с погрешностью 2,0-4,2 % [165-А, 169-А, 171-А, 178-А, 181-А, 187-А, 188-А, 189-А].

#### 4.3. Аппроксимационные зависимости по теплопроводности исследуемых хладагентов при атмосферном давлении и различных температурах

На основе обработанных экспериментальных данных по теплопроводности х.ч. изобутана (2-метилпропан) с добавлением одностенных углеродных нанотрубок при различных температурах и атмосферном давлении и нижеприведенной функциональной зависимости, были выведены соответствующие графики (рисунки 4.18-4.4.23):

$$\frac{\lambda}{\lambda^*} = f\left(\frac{T}{T_1}\right), \quad (4.17)$$

где  $\lambda$  – теплопроводность исследуемых растворов при различных температурах  $T$ ;  $\lambda^*$  – теплопроводность растворов при температуре  $T_1$ , К;  $T_1=418$  К.

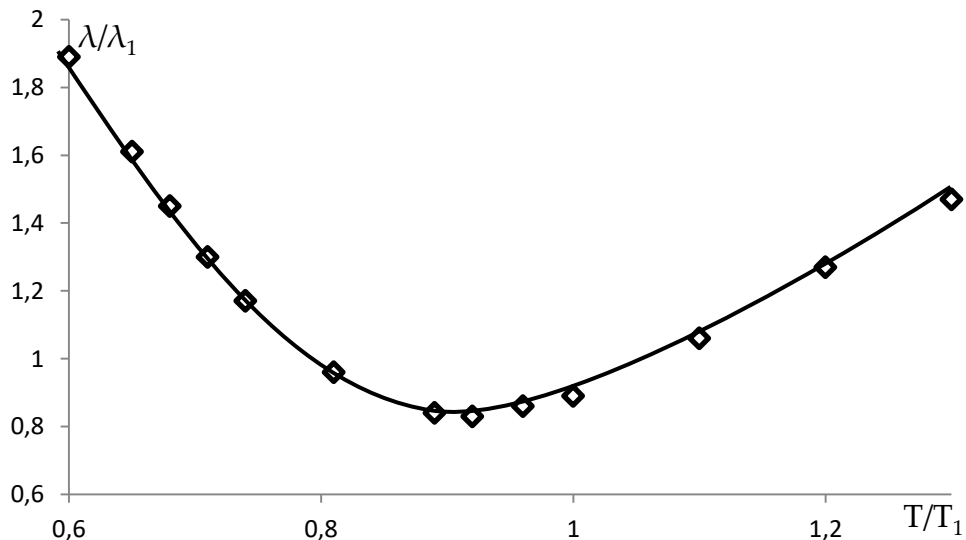


Рисунок 4.11. Зависимость относительной теплопроводности ( $\lambda/\lambda_1$ ) исследуемых растворов изобутана (2-метилпропана) как в чистом виде, так и с добавкой одностенных углеродных нанотрубок после 50 часов выдержки в хладагенте (жидкий изобутан (2-метилпропан)) от относительной температуры ( $\frac{T}{T_1}$ ) при атмосферном давлении [65].

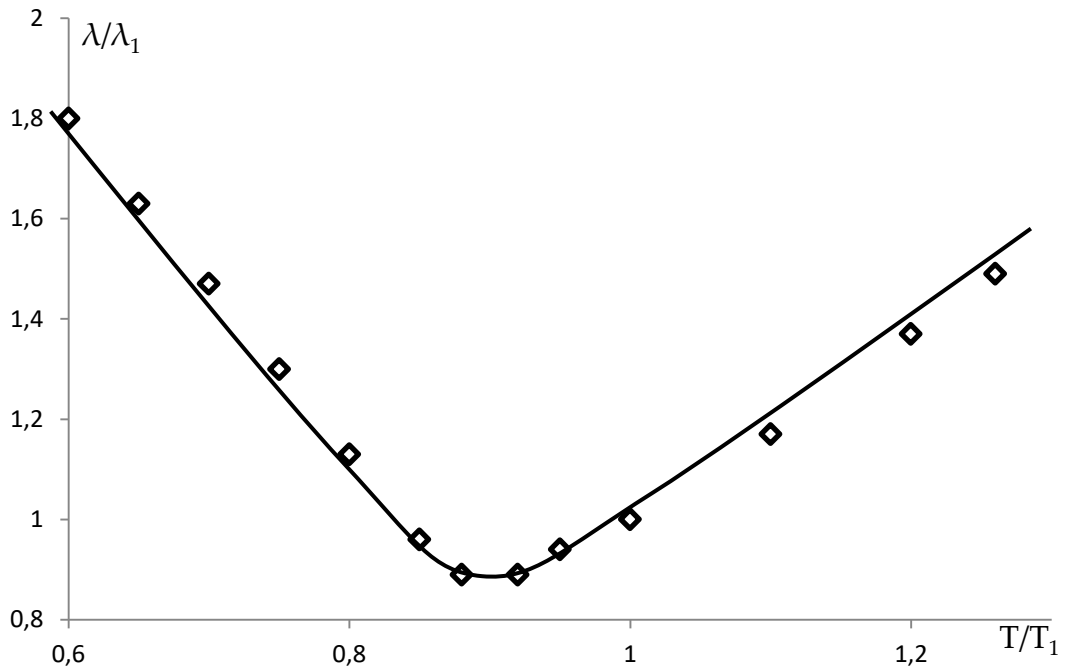


Рисунок 4.12. Зависимость относительной теплопроводности ( $\lambda/\lambda_1$ ) изобутана (2-метилпропан) как в чистом виде, так и с добавкой одностенных углеродных нанотрубок после 50 часов выдержки в хладагенте от относительной температуры ( $\frac{T}{T_1}$ ) при атмосферном давлении: 2-х.ч. изобутан (2-метилпропан) +0,5 % одностенных углеродных нанотрубок [65].

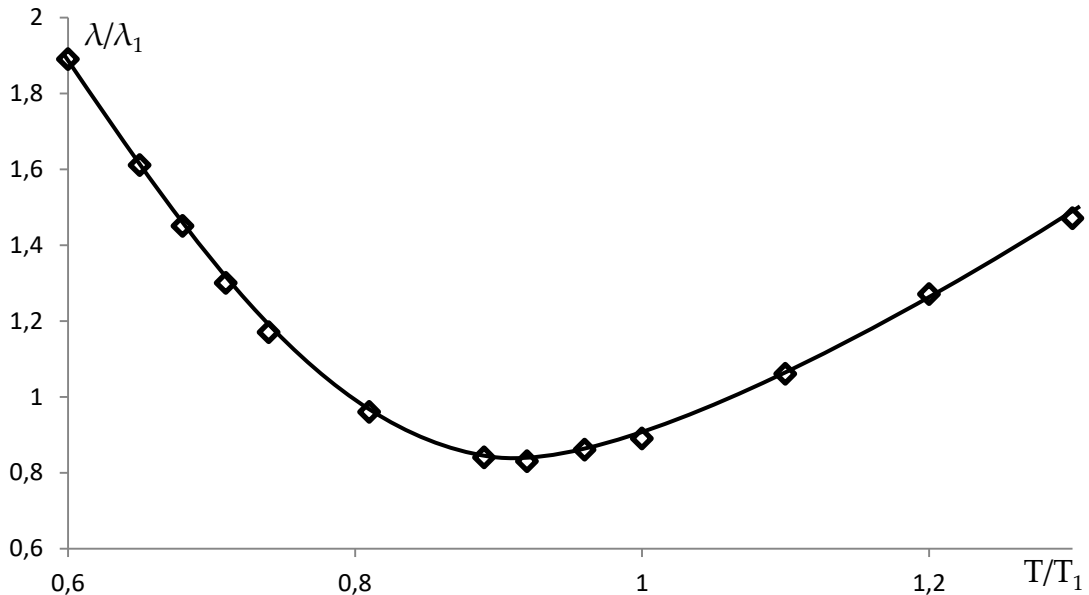


Рисунок 4.13. Зависимость относительной теплопроводности ( $\lambda/\lambda_1$ ) изобутана (2-метилпропан) как в чистом виде, так и с добавкой одностенных углеродных нанотрубок после 50 часов выдержки в хладагенте от относительной температуры ( $\frac{T}{T_1}$ ) при атмосферном давлении: 3-х.ч. изобутан (2-метилпропан) +1,0% одностенных углеродных нанотрубок [65].

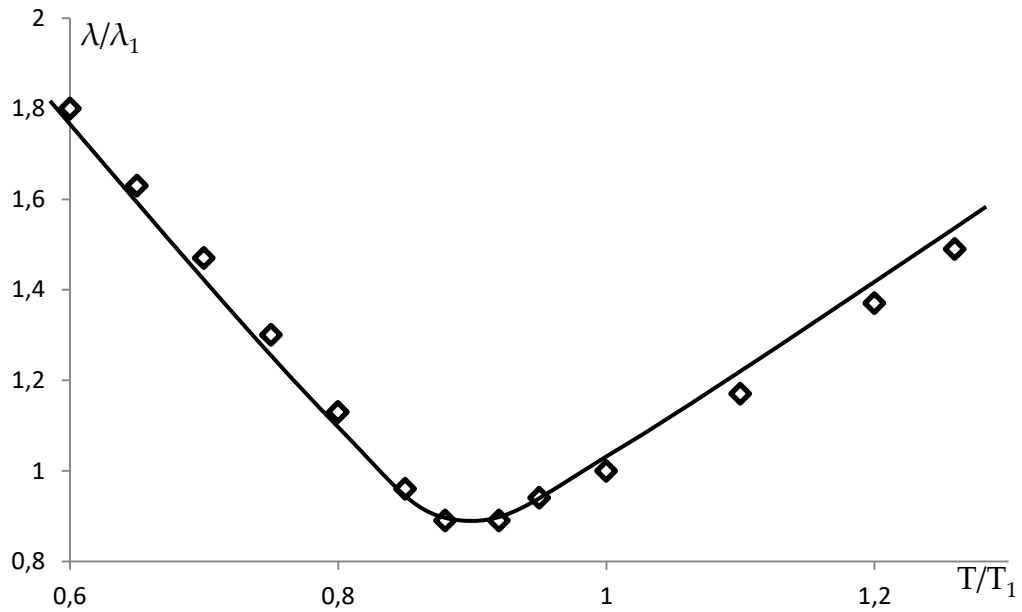


Рисунок 4.14. Зависимость относительной теплопроводности ( $\lambda/\lambda_1$ ) изобутана (2-метилпропан) как в чистом виде, так и с добавкой одностенных углеродных нанотрубок после 50 часов выдержки в хладагенте от относительной температуры ( $\frac{T}{T_1}$ ) при атмосферном давлении: 4-х.ч. изобутан (2-метилпропан) +1,5% одностенных углеродных нанотрубок [65].

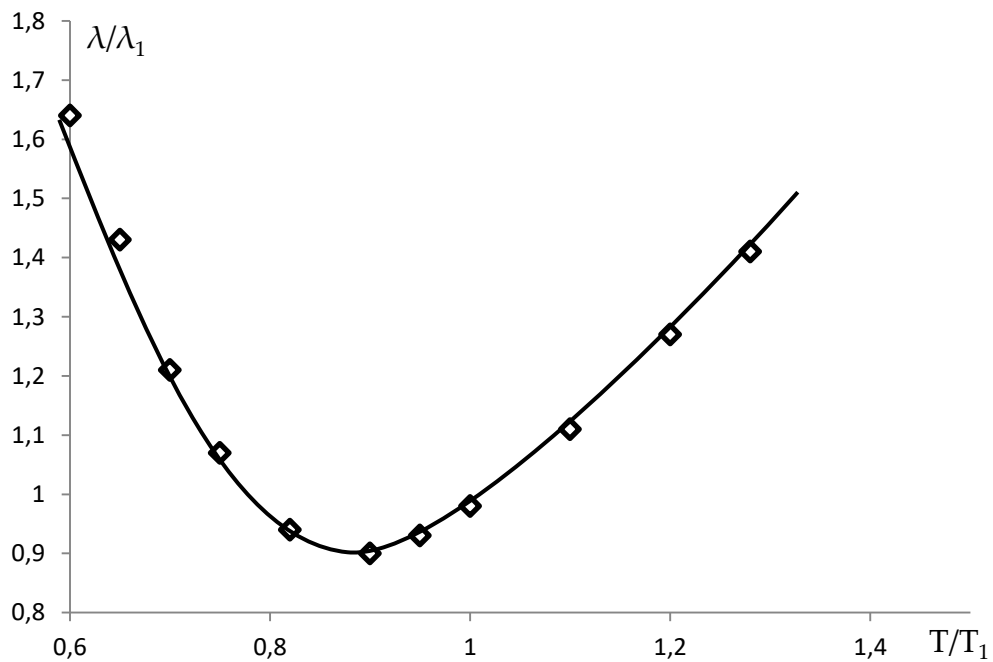


Рисунок 4.15. Зависимость относительной теплопроводности ( $\lambda/\lambda_1$ ) изобутана (2-метилпропан) как в чистом виде, так и с добавкой одностенных углеродных нанотрубок после 50 часов выдержки в хладагенте от относительной температуры ( $\frac{T}{T_1}$ ) при атмосферном давлении: 5- х.ч. изобутан (2-метилпропан) +2,0% одностенных углеродных нанотрубок [65].



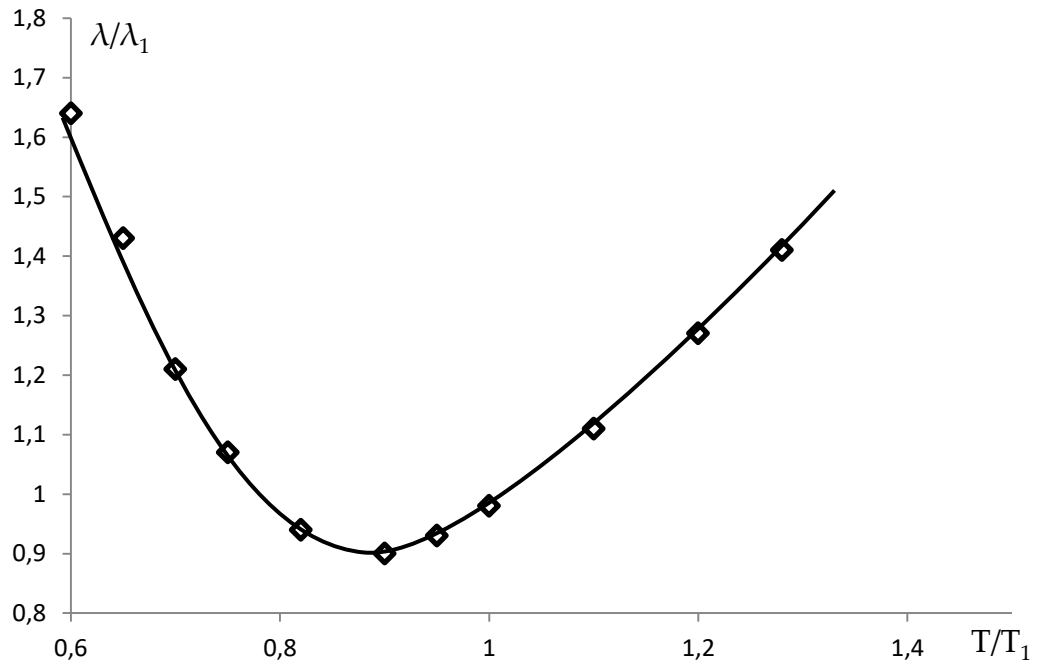


Рисунок 4.16. Зависимость относительной теплопроводности ( $\lambda/\lambda_1$ ) изобутана (2-метилпропан) как в чистом виде, так и с добавкой одностенных углеродных нанотрубок после 50 часов выдержки в хладагенте от относительной температуры ( $T/T_1$ ): б-х.ч. изобутан (2-метилпропан) +1,5% одностенных углеродных нанотрубок от относительной температуры ( $\frac{T}{T_1}$ ) при атмосферном давлении [65].

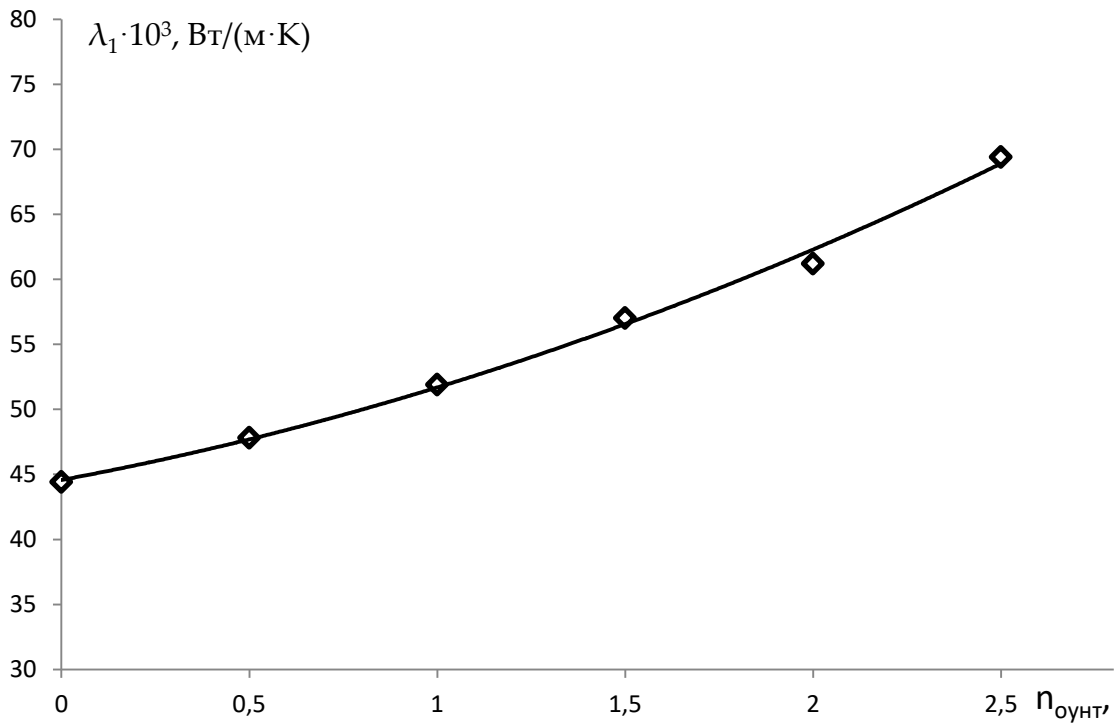


Рисунок 4.17. Зависимость  $\lambda_1$  от концентрации ОУНТ ( $n_{\text{ОУНТ}}$ ).

Уравнение кривых линий, показанных на рисунках 4.18 - 4.23 имеет вид [168-А, 174-А, 177-А, 180-А, 184-А, 190-А]:

$$\left\{ \sum_0^3 a_i^3 \left( \frac{T}{T_1} \right) \right\} \cdot \lambda_1 = \lambda \quad (4.18)$$

Анализ значения  $\lambda_1$  показал, что оно является функцией концентрации одностенных углеродных нанотрубок (ОУНТ) (рисунок 4.24).

Кривая линия, показанная на рисунке 4.24 описывается уравнением [165-А, 169-А, 171-А, 178-А, 180-А, 187-А, 188-А, 189-А, 190-А, 191-А, 192-А, 193-А]:

$$\lambda_1 = 1,2286 \cdot 10^{-3} (n_{\text{ОУНТ}})^2 + 7,414 \cdot 10^{-3} (n_{\text{ОУНТ}}) + 0,0436, \text{ Вт/(м.К)} \quad (4.19)$$

Значения коэффициента  $a_i$  в уравнении (4.18) приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1. Значения коэффициента  $a_i$  в уравнении (4.18).

Коэффициенты	Обр.№1	Обр.№2	Обр.№3	Обр.№4	Обр.№5	Обр.№6
$a_0$	7,435	6.9969	6,3393	5,8067	4.7228	4,3009
$a_1$	-14,353	-13,7929	-12.3919	-11,4565	-9.2648	-8.4803
$a_2$	7,789	7.7152	7.1872	6.5919	5.4807	5,1224

#### 4.4. Обработка экспериментальных данных по теплопроводности исследуемых хладагентов в критической области

Для получения аппроксимационных зависимостей теплопроводности хладагентов х.ч. изобутана (2-метилпропана) в критической области параметров состояния, нами было использовано следующее выражение (4.20) в виде закона соответственных состояний и экспериментальных данных, полученных на базе экспериментальной установки, т.е цилиндрического бикалориметра [180-А, 181-А, 187-А, 188-А, 189-А, 190-А, 191-А, 192-А, 193-А]:

$$\frac{\lambda_{\text{кр}}}{\lambda_{\text{кр}}^*} = f \left( \frac{T}{T_{\text{кр}}} \right), \quad (4.20)$$

где  $\lambda_{\text{кр}}$  – теплопроводность исследуемых растворов хладагентов на основе изобутана и н-бутана при различных температурах  $T$ , К;  $\lambda_{\text{кр}}^*$  – теплопроводность х.ч. растворов при температуре  $T_{\text{кр}}$ ;  $T_{\text{кр}} = 407,9$  К.

Результаты экспериментальных работ полученных данных по теплопроводности хладагентов (х.ч. изобутан (2-метилпропан)), как без добавки, а также и с добавкой одно- или многостенных углеродных нанотрубок показали, что в критической области ( $T_{кр}$  и  $P_{кр}$ ), также влияет внешнее давление. Результаты графически и в виде табличных данных представлены в главе 3.

Данные, приведенные в главе 3, нами были обработаны с помощью выражения (4.20). Выполнимость выражения (4.20) для всех изобар (2,5 МПа, 5,0 МПа, 10,0 МПа, 20,0 МПа, 50,0 МПа) для х.ч. изобутана (2-метилпропан) без добавки и с добавкой одностенных углеродных нанотрубок (ОУНТ) представлена на рисунках 4.25-4.29.

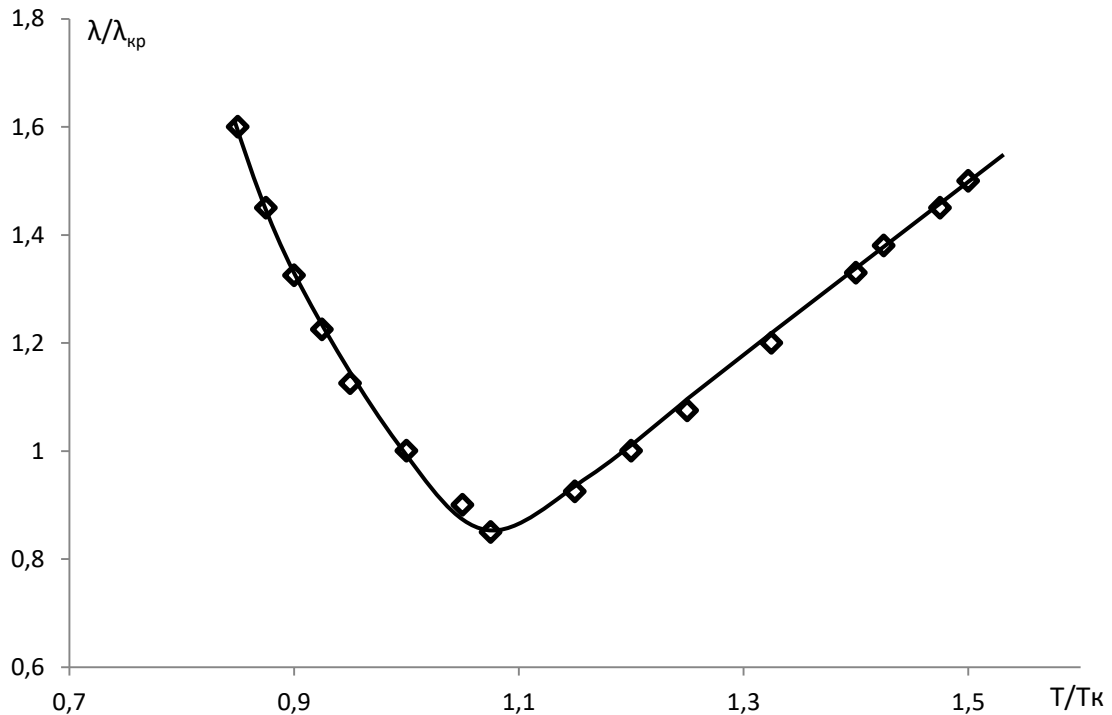


Рисунок 4.18. Зависимость относительной теплопроводности ( $\lambda/\lambda_{кр}$ ) жидкого х.ч. изобутана (2-метилпропана) в чистом виде, т.е. без добавки (ОУНТ) в критической области термодинамических параметров от относительной температуры ( $\frac{T}{T_{кр}}$ ) при давлении ( $p=2,5\text{МПа}$ ) [179-А, 180-А, 183-А, 184-А, 185-А, 190-А]

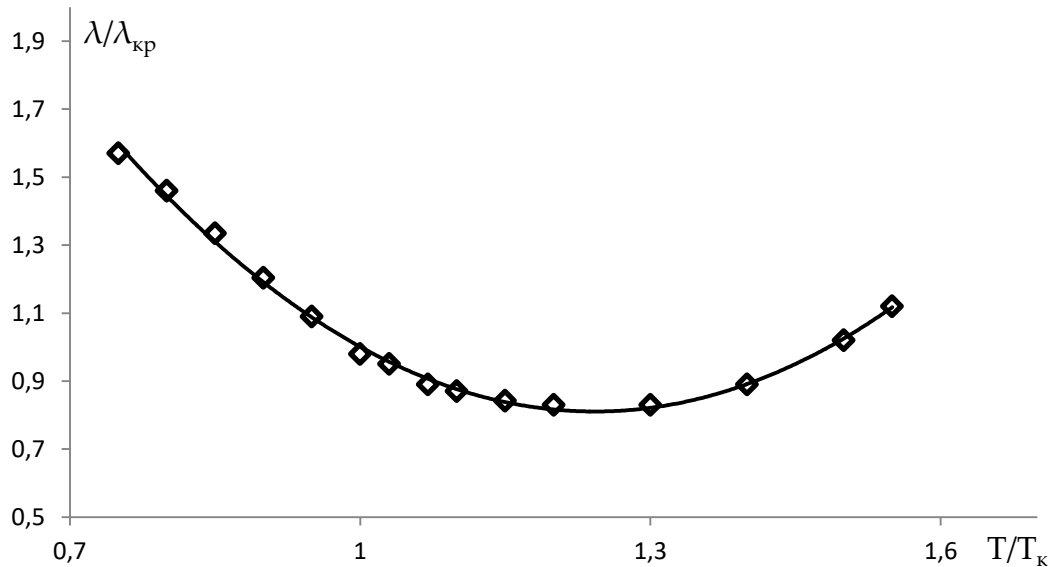


Рисунок 4.19. Зависимость относительной теплопроводности ( $\lambda/\lambda_{кр}$ ) жидкого х.ч. изобутана (2-метилпропана) в чистом виде, т.е. без добавки (ОУНТ) в критической области термодинамических параметров от относительной температуры ( $\frac{T}{T_{кр}}$ ) при давлении ( $p=5,0$  МПа) [190-А, 191-А, 192-А, 193-А].

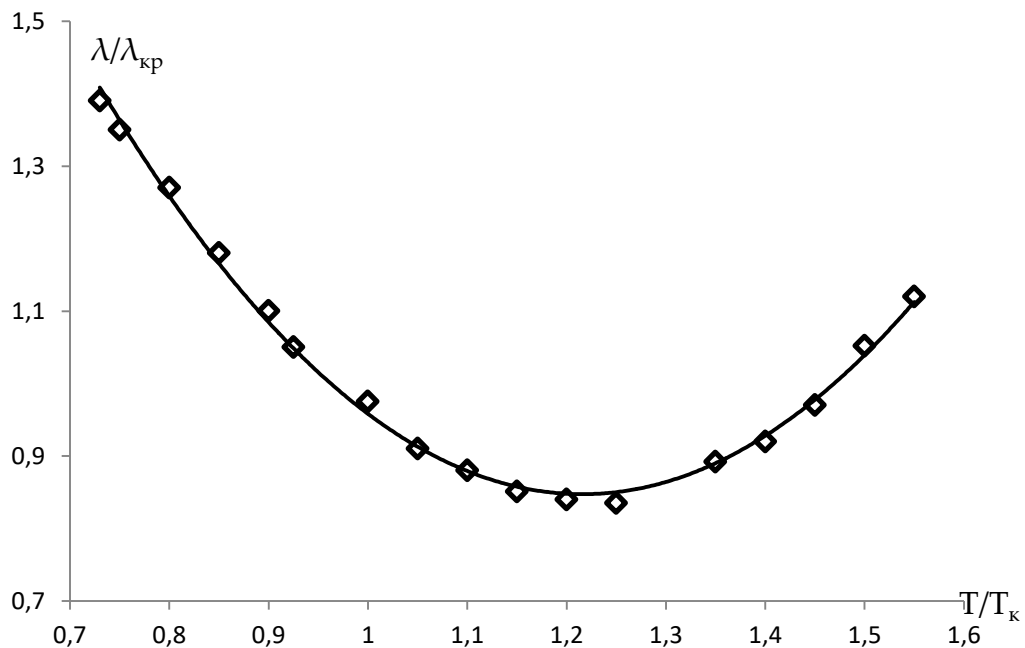


Рисунок 4.20. Зависимость относительной теплопроводности ( $\lambda/\lambda_{кр}$ ) жидкого х.ч. изобутана (2-метилпропана) в чистом виде, т.е. без добавки (ОУНТ) в критической области термодинамических параметров от относительной температуры ( $\frac{T}{T_{кр}}$ ) при давлении ( $p=10,0$  МПа) [179-А, 180-А, 183-А, 184-А, 185-А, 190-А, 191-А, 192-А, 193-А].

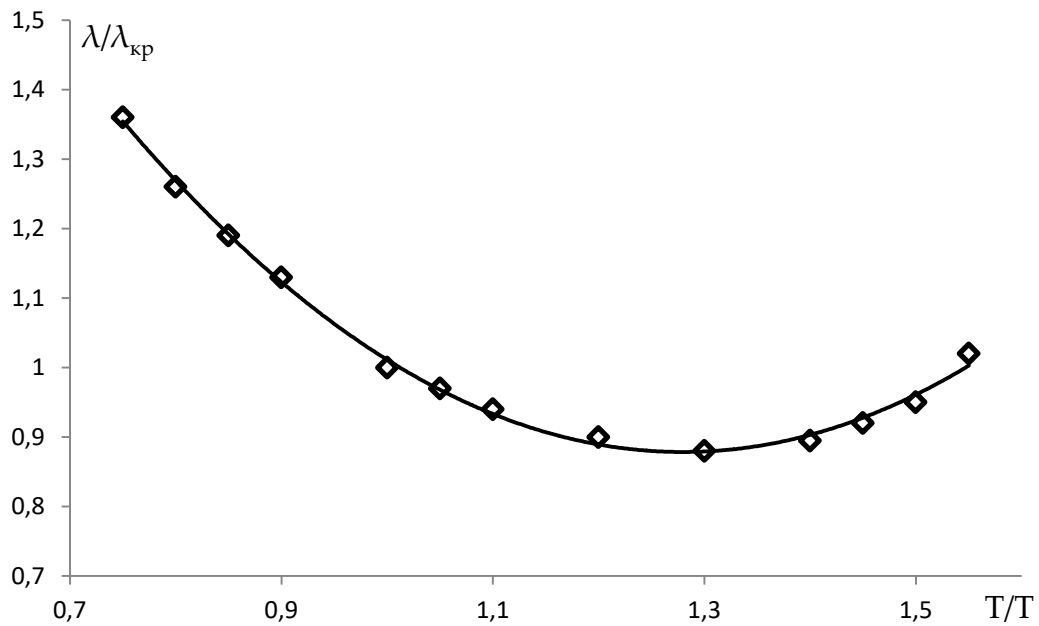


Рисунок 4.21. Зависимость относительной теплопроводности ( $\lambda/\lambda_{кр}$ ) жидкого х.ч. изобутана (2-метилпропана) в чистом виде, т.е. без добавки (ОУНТ) в критической области термодинамических параметров от относительной температуры ( $\frac{T}{T_{кр}}$ ) при давлении ( $p=20,0\text{МПа}$ ).

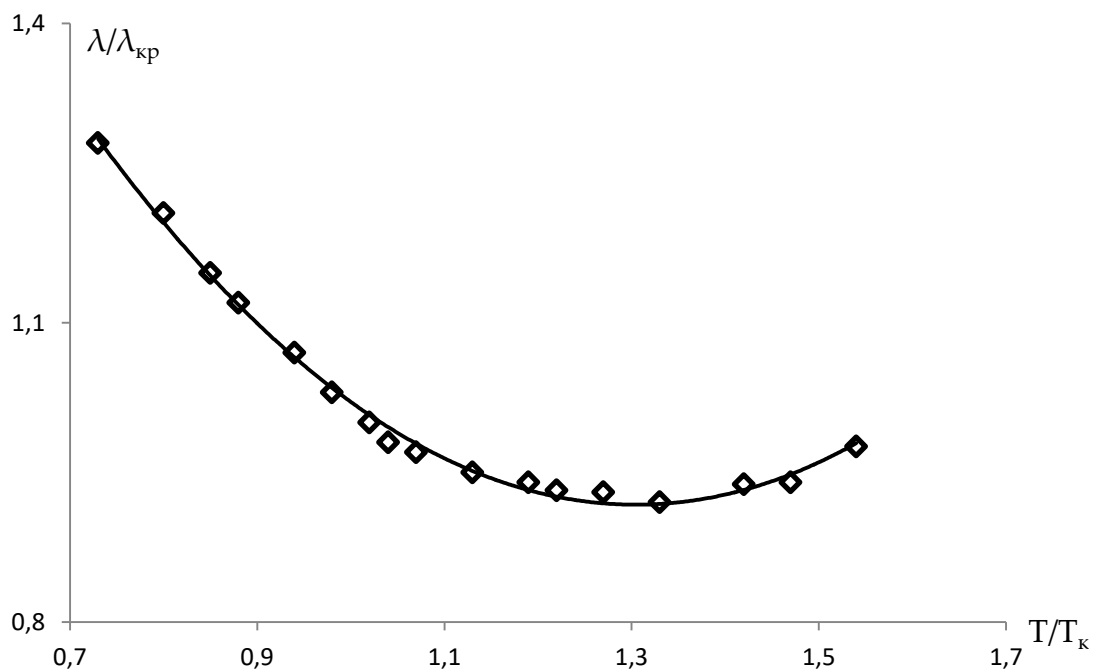


Рисунок 4.22. Зависимость относительной теплопроводности ( $\lambda/\lambda_{кр}$ ) жидкого х.ч. изобутана (2-метилпропана) в чистом виде, т.е. без добавки (ОУНТ) в критической области термодинамических параметров от относительной температуры ( $\frac{T}{T_{кр}}$ ) при давлении ( $p=50,0\text{МПа}$ ) [179-А, 180-А, 183-А, 184-А, 185-А, 190-А, 191-А, 192-А, 193-А].

Для получения коэффициентов кривых линий, представленных на рисунках 4.25-4.29, нами использованы компьютерные программы Excel, σplot и др.

Уравнения кривых линий оказалось, что подчиняются степенным показателям в следующем виде:

$$\lambda = \lambda_{кр} \{A(T/T_{кр})^2 + B(T/T_{кр}) + C\}, \text{ Вт/(м·К)} \quad (4.21)$$

Значения коэффициентов А, В и С в уравнении (4.21) приведены ниже (таблица 4.2).

Таблица 4.2. Значения коэффициентов А, В и С в уравнении (4.21) для кривых линий, показанных на рисунках 4.25-4.29.

Коэффициенты	p=2,5МПа	p=5,0МПа	p=10,0МПа	p=20,0МПа	P=50,0МПа
А	4,844	3,328	2,476	1,52	1,19
В	-11,472	-8.232	-6.030	-3,91	-2.926
С	7,765	5.899	4,507	3.41	2.83
Рисунок	4.25	4.26	4.27	4.28	4.29
Погрешность расчета уравнения, в %	~7,65	~4,41	~2,84	~1,22	~1,036
Общая среднеквадратическая погрешность расчета по уравнению 4.21			~3,43%		

Анализ значений коэффициента теплопроводности х.ч. изобутана (2-метилпропан) в критической области  $\lambda_{кр}$  показал, что оно является функцией давления (рисунок 4.30).

Как видно, из графика, приведенного на рисунке 4.30, коэффициент эффективной теплопроводности в критической области с повышением давления растет по параболическому закону.

Уравнение этой кривой (рисунок 4.30) имеет следующий вид:

$$\lambda_{кр} = -2,03 \cdot 10^{-5} p^2 + 2.086 \cdot 10^{-3} p + 4,376 \cdot 10^{-2}, \text{ Вт/(м·К)} \quad (4.22)$$

Уравнение (4.21) с учетом уравнения (4.22), можно написать в виде следующего выражения:

$$\lambda = \{A(T/T_{кр})^2 + B(T/T_{кр}) + C\} [-2,03 \cdot 10^{-5} p^2 + 2.086 \cdot 10^{-3} p + 4,376 \cdot 10^{-2}], \text{ Вт/(м·К)}. \quad (4.23)$$

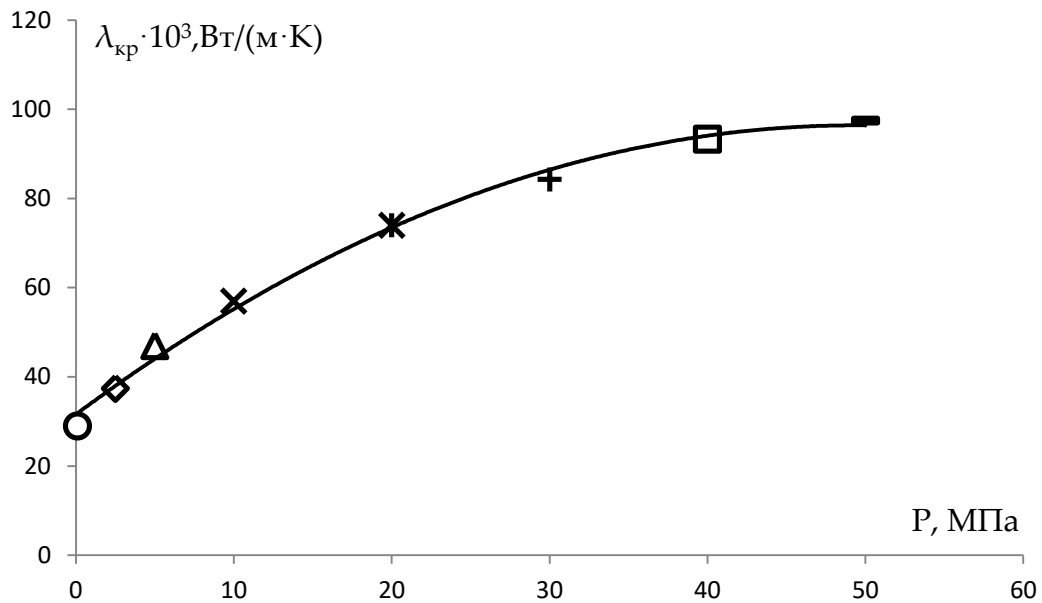


Рисунок 4.23. Зависимость ( $\lambda_{кр}$ ) чистого жидкого изобутана (2-метилпропана) от давления: 1- $p=0,101$  МПа, 2- $p=2,5$  МПа, 3- $p=5,0$  МПа, 4- $p=10,0$  МПа, 5- $p=20,0$  МПа, 6- $p=30,0$  МПа, 7- $p=40,0$  МПа, 8- $p=50,0$  МПа.

С помощью эмпирического уравнения (4.32) можно рассчитать коэффициент эффективной теплопроводности наножидкостей системы изобутан (2-метилпропан) в критической области параметров состояния с погрешностью среднеквадратического значения  $\sim 3,25\%$ .

#### 4.5. Численное моделирование температуры изгиба до и после критической температуры

Для получения единого эмпирического уравнения хладагентов с добавкой от 0 до 2,5%, ОУНТ в области фазового перехода (критической области), также нами было использовано выражение 4.20.

Выполнимость закона соответственных состояний (4.20) для критической области ( $p_{кр}=3,6$  МПа и  $T_{кр}=407,9$  К) представлена в виде графиков на рисунках (4.31-4.36) [189-А, 190-А, 191-А, 192-А, 193-А].

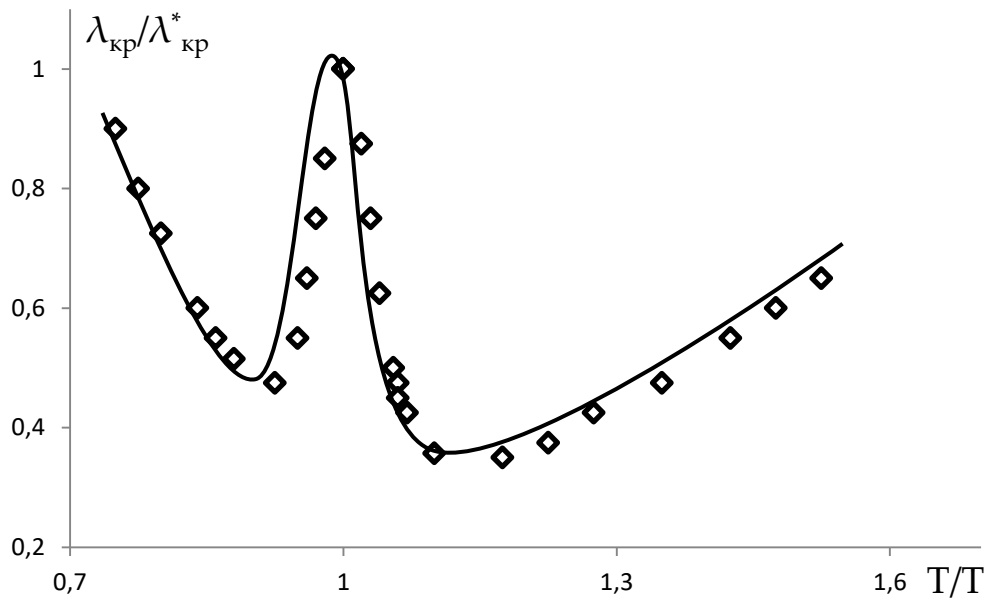


Рисунок 4.24. Зависимость  $\left(\frac{\lambda_{кр}}{\lambda_{кр}^*}\right)$  от  $\left(\frac{T}{T_{кр}}\right)$  для чистого жидкого хладагента - х.ч. изобутана (2-метилпропана) без добавки ОУНТ в критической области ( $T_{кр}=407,9$  К,  $p_{кр}=3,6$ МПа).

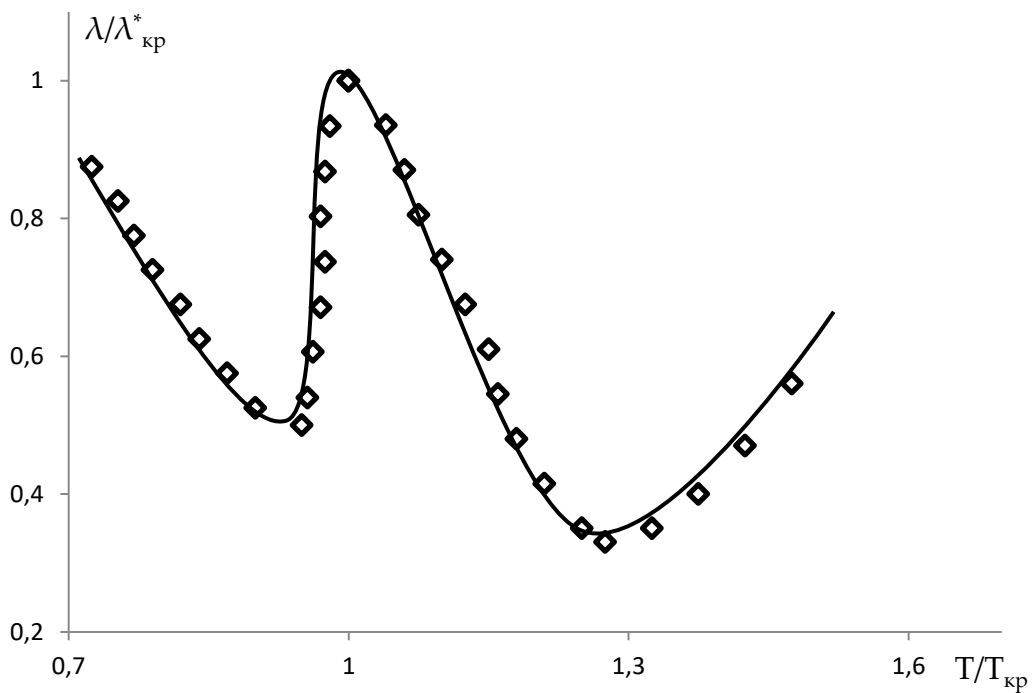


Рисунок 4.25. Зависимость  $\left(\frac{\lambda_{кр}}{\lambda_{кр}^*}\right)$  от  $\left(\frac{T}{T_{кр}}\right)$  для чистого жидкого хладагента - х.ч. изобутана (2-метилпропана)+0,5%ОУНТ после 50 часов выдержки в критической области ( $T_{кр}=407,9$ К,  $p_{кр}=3,6$ МПа) [189-А, 190-А, 191-А, 192-А, 193-А].



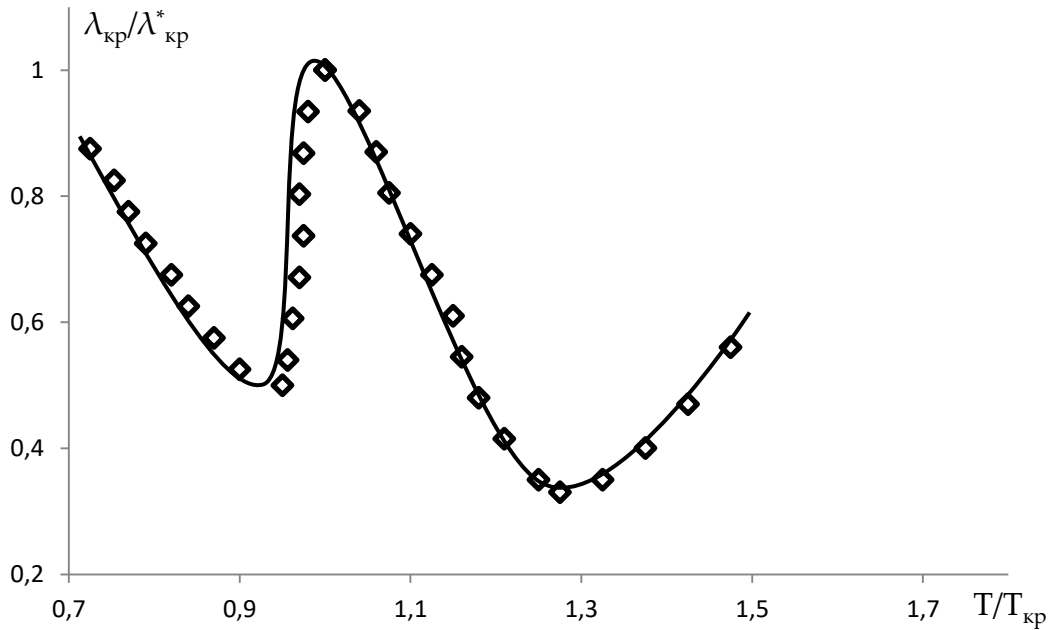


Рисунок 4.26. Зависимость  $\left(\frac{\lambda_{кр}}{\lambda_{кр}^*}\right)$  от  $\left(\frac{T}{T_{кр}}\right)$  для чистого жидкого хладагента х.ч. изобутана (2-метилпропан)+1,0% ОУНТ после 50 часов выдержки в критической области ( $T_{кр}=407,9$  К,  $p_{кр}=3,6$ МПа) [189-А, 190-А, 191-А, 192-А].

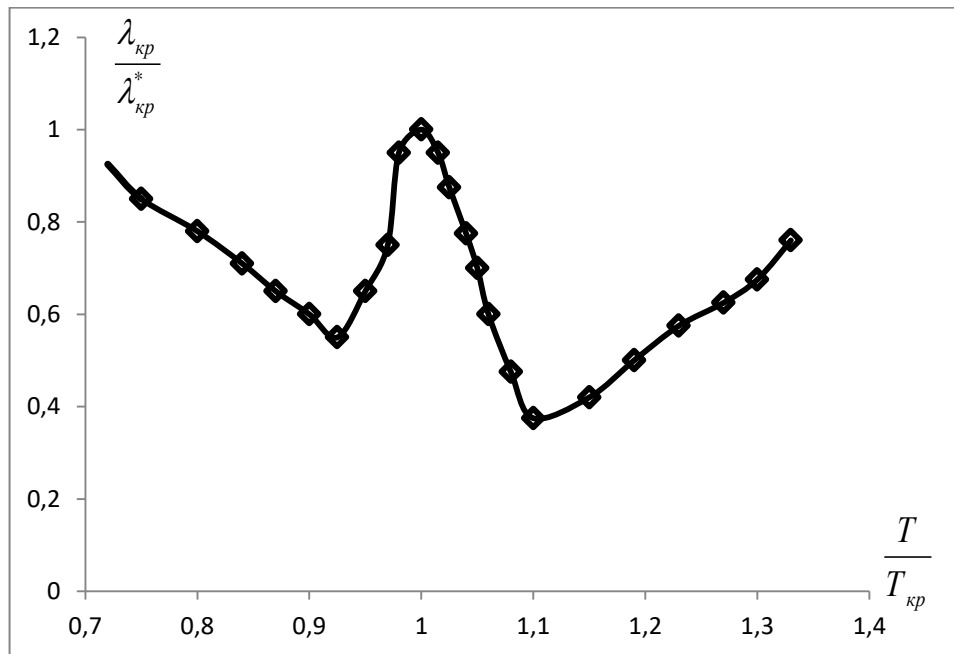


Рисунок 4.27. Зависимость  $\left(\frac{\lambda_{кр}}{\lambda_{кр}^*}\right)$  от  $\left(\frac{T}{T_{кр}}\right)$  для чистого жидкого хладагента - х.ч. изобутана (2-метилпропана)+1,5% ОУНТ после 50 часов выдержки в критической области ( $T_{кр}=407,9$  К,  $p_{кр}=3,6$ МПа).

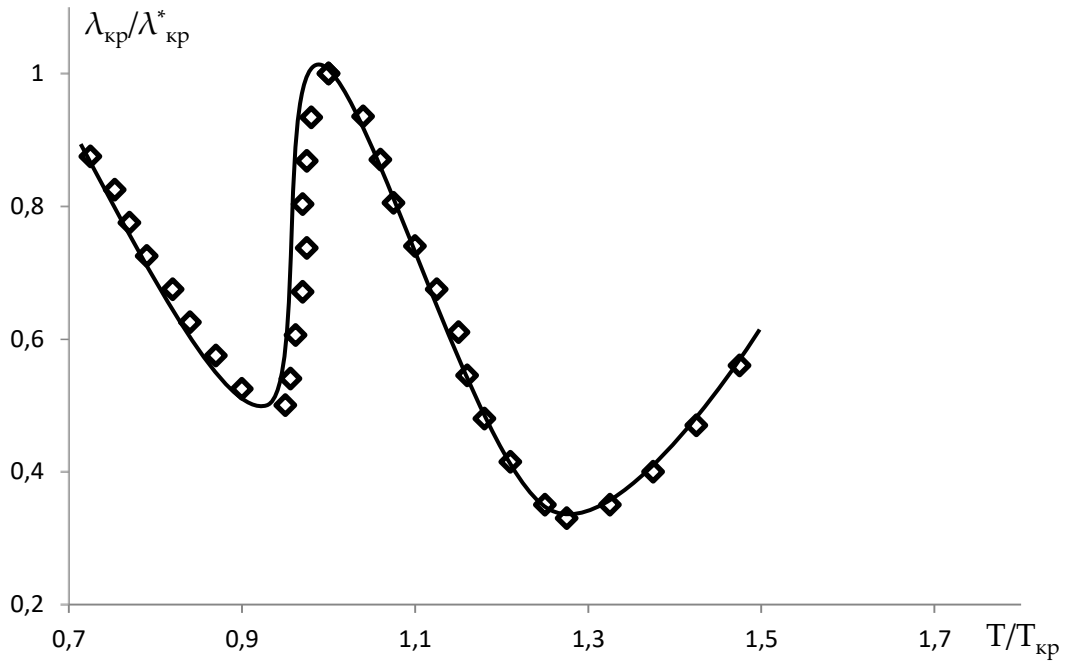


Рисунок 4.28. Зависимость  $\left(\frac{\lambda_{кр}}{\lambda_{кр}^*}\right)$  от  $\left(\frac{T}{T_{кр}}\right)$  для чистого жидкого хладагента - х.ч. изобутана (2-метилпропана) + 2,0% ОУНТ после 50 часов выдержки ( $T_{кр}=407,9$  К,  $p_{кр}=3,6$ МПа) [189-А, 190-А, 191-А, 192-А].

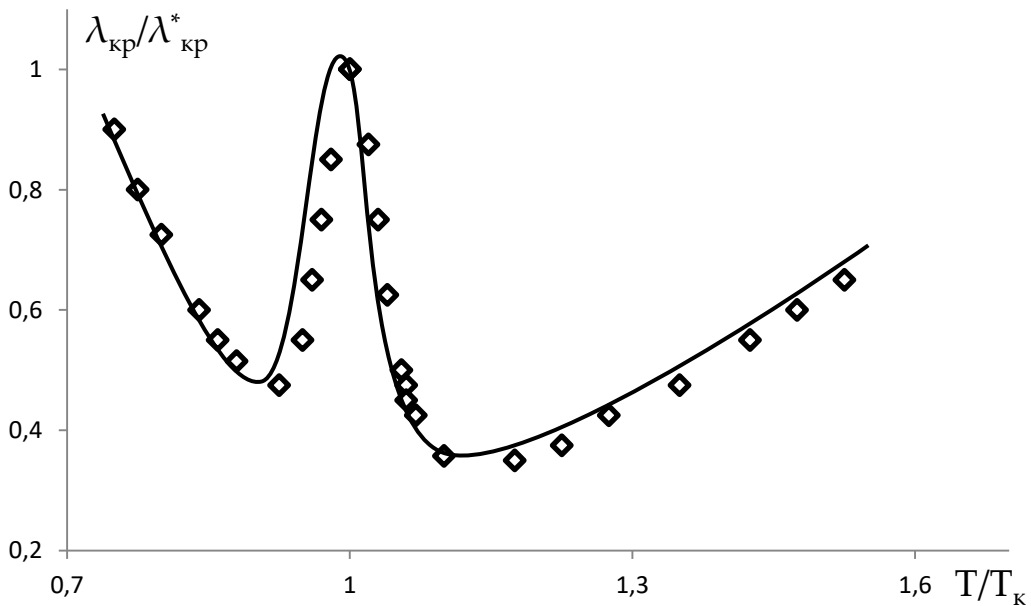


Рисунок 4.29. Зависимость  $\left(\frac{\lambda_{кр}}{\lambda_{кр}^*}\right)$  от  $\left(\frac{T}{T_{кр}}\right)$  для чистого жидкого хладагента х.ч. - изобутана (2-метилпропана) + 2,5% ОУНТ после 50 часов выдержки в критической области ( $T_{кр}=407,9$  К,  $p_{кр}=3,6$ МПа) [189-А, 190-А, 191-А, 192-А, 193-А]

Согласно результатам опытов, которые графически иллюстрированы на рисунках 4.31-4.36, кроме критической области хладагенты системы изобутан и одно- и многостенные нанотрубки обладают еще двумя точками изгиба, которые, как оказалось, зависят от концентрации нанотрубок в растворе. Путем графоаналитической обработки были получены данные, которые показаны в качестве таблицы (таблица 4.3).

Таблица 4.3. Влияние одностенной углеродной нанотрубки на изменение критической температуры и температуры изгиба в критическом состоянии по данным коэффициента эффективной теплопроводности исследуемых хладагентов.

<i>Образец</i>	<i><math>T_1</math> -температура изгиба линии до критической температуры <math>T_{кр}, K</math></i>	<i>Критическая температура, <math>T_{кр}, K</math></i>	<i><math>T_2</math> -температура изгиба линии после критической температуры <math>T_{кр}, K</math></i>
№1	381,4	407,9	475,2
№2	382,2	407,9	522,1
№3	383,4	407,9	509,9
№4	375,3	407,9	480,5
№5	367,1	407,9	499,5
№6	354,9	407,9	495,6

Обр.№1-х.ч.изобутан (2-метилпропан) без добавки ОУНТ; Обр.№ 2-х.ч.изобутан (2-метилпропан)+0,5%ОУНТ; Обр.№ 3-х.ч.изобутан (2-метилпропан)+1,0% ОУНТ; Обр.№ 4-х.ч. изобутан (2- метилпропан)+1,5%ОУНТ; Обр.№5-х.ч.изобутан (2-метилпропан)+2,0%ОУНТ; Обр. № 6-х.ч.изобутан (2-метилпропан)+2,5% ОУНТ.

На основе численных вычислений и расчетов было установлено, что добавление нанонаполнителей не влияет на критическую температуру изучаемого хладагента, а становятся лишь следствием изгиба кривой до и после критической области. Например, добавление ОУНТ от 0 до 2,5% в н-бутан и изобутан приводит к образованию изгиба линии в точке  $T_1$  температуры до критической области  $T_{кр}$ , т.е. до 1% добавления ОУНТ линия восходящая, а затем идет по нисходящей. Добавка 0,5% ОУНТ после критической температуры  $T_{кр}$  приводит к

образованию изгиба линии в точке  $T_2$  температуры, соответственно повышая ее, а затем уменьшая.

### **Выводы по четвертой главе**

1. Теплоемкость и теплопроводность являются одними из важнейших параметров жидкостей, суспензий и наножидкостей, которые широко применяются в инженерных расчетах для создания и разработок новых трансформаторов тепла, машин и механизмов, а также систем тепло- и хладоснабжения и их КПД, при определении активности компонентов, исследовании теплоотдачи без кипения жидкости в тракте охлаждения и др.

2. Применение результатов опытов и полученной математической модели, в значительной степени позволило уменьшить затраты на приобретение дорогого оборудования для выполнения соответствующих экспериментов. На основе полученных результатов по теплофизическим свойствам наножидкостей и полученной модели был выведен ряд расчетных зависимостей для определения коэффициента теплопроводности и теплоемкости при изменениях температуры, давления и концентрации углеродных нанотрубок (ОУНТ и МУНТ), что дало возможность бесприпятственно и эффективно создать конструкции и в соответствующих теплотехнических расчетах в металлургии, машиностроении, энергетике, системах конденсирования и в других отраслях.

3. Полученные результаты исследования теплоемкости и теплопроводности изучаемых хладагентов, позволили установить основные закономерности изменения данных параметров в зависимости от изменени параметров состояния и концентрации нанотрубок.

4. Экспериментальным способом было впервые изучено изменение теплопроводности, теплоемкости хладагентов системы х.ч. изобутан (2-метилпропан) + одностенные углеродные нанотрубки в области изменения температур (293-673)К и давления (0,101- 49,01) МПа.

5. Применяя теорию подобия (закон соответственных состояний) нами выведен ряд аппроксимационных уравнений, позволяющих дать логичное

объяснение изменению теплоемкости и теплопроводности изучаемых систем в результате влияния температуры.

6. Получены аналитические зависимости между теплопроводностью и теплоемкостью при различных температурах, давлениях и состава наножидкостей.

## ВЫВОДЫ

1. Разработаны автоматизированные комплексы измерения теплоемкости и коэффициента теплопроводности изучаемых хладагентов - н-бутана, изобутана (2-метилпропан) и их растворов с одно- и многостенным углеродным нанотрубками с охватом большой области изменения параметров состояния [166-А, 168-А, 172-А, 175-А, 176-А, 177-А, 182-А, 186-А, 187-А, 188-А, 189-А, 190-А, 191-А, 193-А].

2. Показана пригодность применения метода монотонного разогрева регулярного теплового режима второго рода, для измерения теплоемкости и метода  $a$ -калориметра для измерения температуропроводности исследуемых хладагентов с добавлением углеродных нанотрубок в различной области изменения температур и давления [166-А, 168-А, 172-А, 175-А, 176-А, 177-А, 182-А, 186-А, 187-А, 188-А, 189-А, 190-А, 191-А, 193-А].

3. На основе молекулярно-кинетических представлений объяснена зависимость теплопроводности, теплоемкости исследуемых наножидкостей от температуры, давления и концентрации ОУНТ и МУНТ [166-А, 168-А, 172-А, 175-А, 176-А, 177-А, 182-А, 186-А, 187-А, 188-А, 189-А, 190-А, 191-А, 193-А].

4. Установлено, что при добавке 0,5% МУНТ в чистом изобутане при  $T=300$  К теплопроводность растет на 75,3%, а при  $T=630$ К  $\Delta\lambda=22,3\%$ . Приведено качественное и количественное объяснение изменения теплопроводности, теплоемкости х.ч. изобутана (2-метилпропан), н-бутана, как в чистом виде, так содержащих до 2,5% одностенных многостенных углеродных нанотрубок с изменением давления, температуры и массовой концентрации нанонаполнителя.

5. При обработке и обобщении экспериментальных данных получены аппроксимационные зависимости, устанавливающие взаимосвязь теплопроводности, теплоемкости хладагентов от концентрации одностенных углеродных нанотрубок (ОУНТ и МУНТ), температуры и давления: 4.11, 4.12, 4.18, 4.21, и 4.23.

6. Показана применимость математической модели с взаимопроникающими компонентами (модель Максвелла-Дульнева) для получения значения

эффективной теплопроводности растворов системы жидкого и газообразного н-бутана и изобутана (2-метилпропана) и одностенных углеродных нанотрубок. Результаты расчета коэффициента теплопроводности исследуемых хладагентов показали, что используя данную модель, можно, не проводя экспериментальные исследования, получить значения коэффициента теплопроводности растворов [180-А, 183-А, 184-А, 185-А, 189-А, 190-А].

7. На основе моделирования динамики неравномерных процессов был получен коэффициент теплоотдачи, который с добавлением наночастиц растет по линейному закону. Предложено практическое использование полученных результатов в технологии наножидкостей для инженерных расчетов процессов и аппаратов химических производств, моделирования динамики неравномерных процессов и на его основе получен коэффициент теплоотдачи между системами и окружающей средой [165-А, 167-А, 170-А, 172-А, 178-А, 180-А, 181-А, 189-А].

### **Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы исследования диссертационной работы**

1. Составлены подробные таблицы теплопроводности, теплоемкости хладагентов системы (н-бутан, изобутан (2-метилпропан) + одно- и многотенные углеродные нанотрубки) в большой области изменения температуры (293-673)К, давления (0,101–49,01)МПа, а также массовой концентрации нанонаполнителей (от 0 до 2,5%) после 2-х и 50 часов выдержки добавок в хладагенте, который может найти свое применение в технологических оборудовании, теплообменных аппаратах и трансформаторах тепла и т.д.

2. Полученные аппроксимационные зависимости с достаточной эффективностью используются студентами, магистрами и аспирантами кафедры «Общая физика» Таджикского государственного педагогического университета им. Садриддина Айни и кафедры «Теплотехника и теплоэнергетика» ТТУ им. акад. М.С. Осими при реализации своих учебных и научно-исследовательских работ.

3. Результаты опытных исследований теплопроводности, теплоемкости исследуемых хладагентов можно воспользоваться для численного определения коэффициента активности каждого компонента, изучаемой наножидкости.

4. Полученные аппроксимационные зависимости можно использовать для расчета и прогнозирования термодинамических и теплофизических характеристик не изученных на практике названных растворов в большой области изменения температуры, давления и концентрации ОУНТ и МУНТ, что позволило заложить основу для конструирования материалов системы конденсирования.

5. Полученные в ходе исследования экспериментальные данные, а также математическая модель для вычисления изменений теплофизических параметров достаточно ощутимо способствует снижению затрат на дорогие эксперименты и приобретения соответствующего дорогостоящего оборудования.



## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Варгафтик, Н.Б. Справочник по теплопроводности жидкостей и газов / Н.Б. Варгафтик, Л.П. Филиппов, А.А. Тарзиманов, Е.Е. Тоцкий. Энергоатомиздат. -1990. – 352 с.
2. **Варгафтик, Н.Б.** Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. -1972. М.; Изд-во стандартов -720с.
- 3.**Варгафтик, Н.Б.** Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. -1963.М.; Изд-во стандартов-708с.
- 4.**Варгафтик,Н.Б.** Справочник по теплофизическим свойствам некоторых авиационных топлив в жидком и газообразном состоянии. -1961.М.; Изд-во стандарт- 214с.
- 5.**Теплопроводность жидкостей и газов/Н.Б.Варгафтик,Л.П.Филиппов А. А. Тарзиманов, Е.Е.Тоцкий.//М.:Изд-во стандартов, 1978-745с**
6. **Теплопроводность газов и жидкостей./Н.Б.Варгафтик, Л.П.Филиппов А. А. Тарзиманов, Р.П.Юрчак.//М.:Изд-во стандартов, 1970- 736с**
7. **Теплопроводность многокомпонентных жидкостей и газов/ Н.Б. Варгафтик, Л. П.Филиппов А. А. Тарзиманов, Е.Е.Тоцкий.//М.:Изд-во стандартов, 1981. М.: Изд-во стандартов. 1981, 336с.**
- 8.**Nieto de Castro С.А., Tufeu R., Le Neindry В.// Int. J. Thermophys.1983, Vol.4.N1.-pp.11-33.**
- 9.**Рабцев, Н.И., Казарян В.А.//Переработка газа и газового конденсата. Исследование теплопроводности углеводородных газов.//М.:Изд-во ВИНИЭ газпром.-1972.-----**
- 10.**Брыков, В.П.,Мухамедзянов Г.Х.,Усманов А.Г.//ИФЖ.1970.Т.18.№1.- С.82-89.**
11. **Брыков, В.П., Мухамедзянов Г.Х., Усманов А.Г.Исследование теплопроводности некоторых органических жидкостей при низких давлениях .//Сб. аспирантских работ.КХТИ. вып.1.Казань-1970.С.144-151.**
12. **Parkinson, С.,Gray P.// J.Chem. Soc. FaradayTrans. Part 1. 1972.-Vol 68,N6.-P.1065-1076.**

**13. Neimwoudt, Y.C.,** Le Neindry B., Tufeu R. et.al.// J.Chem. Eng.Data. 1987. Vol. 32.-N1.-P.1-8.

**14. Sonftleben, H.**//Z.Angew.Phys. 1964.-Bd.17.N2.-S.86-95.

**15. Краткий справочник физико-химических величин/** Под редакцией К.П. Мищенко, А.А.Равделя “Химия”, Л.: -1972, -200с.

**16. Гарзиманов, А.А.,** Маширов В.Е.//Теплоэнергетика.1967.-№12.-С.67-69

**17. Зарипова, М.А.** Влияние наночастиц на изменение теплофизических, термодинамических свойств некоторых кислородосодержащих, азотосодержащих органических жидкостей при различных температурах и давлениях: дис д-ра техн.наук./М.А. Зарипова.- Душанбе, 2016. -505с.

**18. Юсупов, Ш.Т.** Теплофизические и термодинамические свойств растительных масел и некоторых их растворов в широком интервале температур и плотностей: Автореф. дис...д-ра техн. наук./Ш.Т.Юсупов. Казань- 2012.-39с.

**19. Тагоев, С.А.** Влияние растворителей на поведение теплопроводности и теплоёмкости хлопкового масла в широком интервале температур и давлений: Дис....кан.техн.наук./С.А. Тагоев. Душанбе, 2002.-120с.

**20. Курбонов, Ф.Б.** Термодинамические свойства софлорового масла// Автореф. дис.....кан.техн.наук. Душанбе, 2006.-24с.

**21. Раджабов, Ф.С.** Теплоёмкость и плотность водных растворов аэролина в зависимости от температуры и давления//Автореф. дис....кан.ф-м.наук. Худжанд, 2002.-17с.

**22. Ходжаева, У.Т.** Тепло- и электрофизические свойства изоляционных пластиковых кабельных изделий, экспонированных в различных условиях Республики Таджикистан// Автореф. дис...кан.техн.наук. Душанбе, 2006.-26с.

**23. Самиев, К.А.** Теплофизические свойства алюминиево – берилловых сплавов с редкоземельными металлами// Автореф. дис...кан.техн.наук. Душанбе, 2007.-26с.

**24. Сафаров, М.М.** Теплофизические свойства простых эфиров/М.М. Сафаров, М.А.Зарипова//LAPLAMBERT academic Publishing GmbH&Co. KG.- 2012. - 144с.

**25.Сафаров, М.М.** Теплофизические свойства простых эфиров и водных растворов гидразина в зависимости от температуры и давления. / Махмадали Махмадиевич Сафаров//Дис. .... д-ра техн. наук. Душанбе, 1993. –495 с.

**26.Сафаров, М.М.**Теплофизические свойства простых эфиров в широком интервале параметров состояния (теплопроводность и плотность). Монография /М.М. Сафаров, К.Д. Гусейнов.// Душанбе. - 1996. –196с.

**27.Гусейнов, К.Д.** Исследование термодинамических свойств ряда кислородосодержащих органических веществ в широком интервале параметров состояния: / Камал Дадаш огли Гусейнов.//Дисс...д-ра.т.н. Баку1979.–392 с.

**28. Zaripova, M.A.**Thermal conductivity of water /ethylhydrazine solutions. /М.М. Safarov, M.A. Zaripova, T.R. Tilloeva, H.A. Zoirov. //Conference book. 30-Internatio-nal Thermal Conductivity Conference and 18 Interna-tional; Thermal Expansion Sym-posium. Pittsburg, PennsylvaniaUSA, . 29–September.- 2009. -P. 26.

**29.Гуломов, М.М.** Влияние наноструктурных частиц на изменение термодинамических и адсорбционных свойств на линии увлажнения /М.А. Зарипова, М.М. Сафаров, А.С. Назруллоев, М.М. Гуломов,Н.Б. Давлатов,А.Г. Мирзомамадов,С.С.Абдуназаров, З.Ю. Норов.//10<sup>й</sup> Всероссийской симпозиум с международным участием, «Термодинамика и материаловедение». Физико-технический институт имени А.Ф.Иоффе. РАН.- 2015. - С.42.

**30.Zaripova, M.A.** Experimental study of the thermal conductivity of hydrazinehydrate at high value softhesta teparometers /М.М.Safarov, M.A. Zaripova //Measurement Techniques,Volume 36.Number 4.- 1993. -P. 435-438.

**31.Zaripova,M.A.**Temperature conductivity of hydrazine hydrate at the concentration of nano catalic  $TiO_2$ . /H.A. Zoirov, M.A. Zaripova, N. Minina, M.M.-Safarov, S.A.Tagoev, T.R. Tilloeva, A.F. Toshov.//Program and Extended abstracts, of 31<sup>th</sup> Thermal conductivity conference, 19<sup>th</sup> International Thermal expansions symposium, June 26-30.Saguenay, Quebec.-2011. -P.16.

**32.Zaripova, M.A.** Influence carbon nanotube,  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $TiO_2$  to exchange thermophysical properties Hydrazinehydrate (rocket fuel) in dependence temperature

and pressures. /H.A. Zoirov, M.M. Safarov, M.A. Zaripova e. t. //8<sup>th</sup>International Conference: Concrete in the low Carbon Era, Dundee, UK. 9-11. -2012. -13p.

**33.Зарипова, М.А.** Экспериментальные установки для измерения теплопроводности и плотности водных растворов гидразина и фенил гидразина/М.М. Сафаров, М.А.Зарипова, Иман Бахроми Маниш, А.Н. Нурматов//Монография: - Иран.-Изд. Эсхаг,Тегеран, пл. Энгиллаб.-2013.-238с.

**34.Гуломов, М.М. дис.** Влияние углеродных нанотрубок и нанопрошков кремниевой кислоты на изменение теплофизических, термодинамических и седиментационных свойств некоторых жидких углеводородов и их смесей./Масрур Мирзохонович Гуломов /Диссер...д.т.н., Душанбе, -390с. (Том. 2-110с. Том. 1 -280с).

**35. Гуломов, М.М.** Влияние углеродных нанотрубок и нанопрошков кремниевой кислоты на изменение теплофизических, термодинамических и седиментационных свойств некоторых жидких углеводородов и их смесей./Масрур Мирзохонович Гуломов / Автореферат. д.т.н., Казань, 2022.-46с.

**36. Нуриддинов, З.** Теплофизические свойства фталатов в зависимости от температуры и давления:/Зиёдулло Нуриддинов.//Автореф. дис. ... к.т. н. –Баку, 1991. –20 с.

**37. Зарипова, М.А.** Экспериментальные установки для измерения теплопроводности и плотности водных растворов гидразина и фенилгид разина/М.М. Сафаров, М.А.Зарипова, Иман Бахроми Маниш, А.Н. Нурматов//Монография: - Иран.-Изд. Эсхаг,Тегеран, пл. Энгиллаб.-2013.-238с.

**38.Зарипова, М.А.**Тепло- и температуропроводность магнитных жидкостей при атмосферном давлении / Д.С.Джураев, М.М.Сафаров, М.А. Зарипова, Х.А.Зоиров//Вестник Таджикского технического университета им. Академика М.С. Осими. - 2009.-2(6).-С.6-10.

**39.Зарипова, М.А.**Влияние наночастицы на изменение теплопроводности гидразингидрата в зависимости от температуры при атмосферном давлении //М.А. Зарипова, Т.Р. Тиллоева, Н.Б.Давлатов, М.М. Сафаров, Иман Бахроми Маниш // Сборник материалов научно-практической конференций, посвященной 1150-

летию персидско-таджикского ученого-энциклопедиста, врача, алхимика и философа Абу Бакра Мухамада ибн Закария Рози /Институт химии АН Республики Таджикистан. -2015. -С.121-125.

**40. Гиллоева, Т.Р.** Теплофизические и термодинамические свойства коллоидного водного раствора наносеребра/ дис..к.т.н., Казань, 2016, 160с.

**41. Berber, S.** Unusually high thermal conductivity of carbon nanotubes /Kwon Y.K., Tomanek D//Lett.-2000.- N.84.-P.4613.

**42. Дьячков, П. Н.О.** Нанотрубки: свойства, применения./М.: БИНОМ. - 2006. -355 с.

**43. Елецкий, А. В.** Углеродные нанотрубки и их эмиссионные свойства // УФН. -2002.-172. - № 4. -403с.

**44. Димитриев, А.С.** Введение в нанотеплофизику./А.С.Димитриев.-М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, М.:2015.-790с.

**45. Джашитов, В. Э.** О возможности применения метода элементарных балансов к расчету нестационарных температурных полей наноструктур / Панкратов В. М. //Нано-и микросистемная техника.- 2008. - № 10 (99).- С. 16 – 22.

**46. Мальцева, П.П.** От исследования к разработкам. Сб. статей/ Подред. П.П. Мальцева//Нано техника. - 2005.- 592 с.

**47. Девяткин, В. В.** Химия для любознательных, или о чём не узнаешь на уроке/Ляхова Ю. М.//Академия Холденг. - 2000.-С. 48.

**48. Mandelbrot, B.** The Fractal Geometr of Nature/ W.H.Fremeen Press/ San fransisco -1982.

**49. Murshed, S.** Correction and comment on “thermal conductance of nanofluids: is the controversy over//journal of Nanoparticle Research.11–2009.p.511-512.

**50. Дульнев, Г.Н.** Методы расчета теплового режима приборов/Парфенов В.Г., Сигалов А.В//Радио и связь.- 1990.-312 с.

**51. Ахундов Т.С.** Исследование теплофизических свойств углеводородов ароматического ряда.:/Тахир Сабинович Ахундов //Автореф.дис....д-ра техн. наук. -1974.-57с.

**52. Michels, A.** Method for the determination of thermal conductivity of gas at high pressures/ Botzen A. A// Physics.-1952.–Vol.18/ -P.605-612.

**53. Wen, D.** Experimental investigation into the pool boiling heat transfer of aqueous based Alumina nanofluids/Ding Y.//Journal of Nanoparticle Research. - 2005.p. -265-274

**54.** <http://webbook.nist.gov>.

**55.** [http://crab.rutgers.edu/~maslen/Courses/PChemII/12\\_Thermo\\_Data\\_Tables/Thermo.table.1.pdf](http://crab.rutgers.edu/~maslen/Courses/PChemII/12_Thermo_Data_Tables/Thermo.table.1.pdf).

**56. Ozerinc, S.** Enhanced thermal conductivity of nanofluids : a state-of-the-art review/ Kakac S., Yazicioglu A // Microfluid Nanofluid.-8:2010.-pp.145-170.

**57. Yu, W.** Review and Comparison of Nanofluid Thermal Conductivity Heat Transfer Enhancement/ France M., Routbort J. et.al. // Heat Transfer Engineering. - 2008.-29(5).- pp.432-460

**58. Chen, G.** Application of SAXS to the study of particle-size-dependent thermal conductivity in silica nanofluids/ Yu W., Singh D. et al // Journal of Nanoparticle Research.- 10: 2008.-pp.1109-1114.

**59. Пул, Ч.(мл.)** Нанотехнологии./Оуенс Ф. // М. Техносфера. – 2006. - 336с.

**60. Polts, H.** Die Wärmeleitfähigkeit von III. Abhängigkeit der von der Schichtdicke bei organischen Flüssigkeiten // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 1965. - Bd.8. - № 4. – S. 609 –620.

**61. Zaripova, M.A.** Applications: Influence of Carbon nanotube to exchange thermophysical properties of hydrazine hydrate (rocket fuel) in dependence temperature and pressures./H.A. Zoirov, M.M. Safarov, M.A. M. M. A.G. -2011.P. -456-457.

**62. Голубев, И.Ф.** Бикалориметр для определения теплопроводности газов и жидкостей при высоких давлениях и различных температурах // И.Ф.Голубев Я. М Назиев // Теплоэнергетика.-1963.- №12. -С.78-82.

**63. Маджидов, Х.** Теплопроводность газообразных простых эфиров в зависимости от температуры.//Х.Маджидов, М.М. Сафаров/ Изв. АН Тадж. ССР, №1, Душанбе, 1982,-С. 112 -115.

**64. Маджидов, Х.** Теплопроводность газообразных кетонов в зависимости от температуры// Х.Маджидов, М.М. Сафаров / Теплофизика высоких температур, Т.21, №6, 1983,М.- С.1229-1232.

**65. Маджидов, Х.** Теплопроводность диметилфталата при различных температурах и давлениях//Х.Маджидов,З.Нуриддинов., М.М. Сафаров / ДАН.Тадж. ССР, №4, Т. 26, 1983, Душанбе -С.220-223.

**66. Сафаров, М.М.** Теплофизические свойства окиси алюминия с металлическими наполнителями в различных газовых средах.//М.М.Сафаров / Диссер... .....к.т.н., Душанбе, 1986,198с.

**67. Madzhidov,Kh.** Effective thermal conductivity of aluminum oxide with metallic fillers in gaseous media and a vacuum at various temperatures.//Kh. Madzidov, М.М. Safarov/Journal of Engineering Physics and Thermo physics, 1986, Volume50, Number 3, Pages 465-469.

**68. Madzhidov,Kh.** Method of calculating the thermal conductivity of porous granular materials with metal filler in different media.//Kh Madzidov, М.М. Safarov / Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 1986, Volume 51, Number 2, Pages 940-943.

**69. Маджидов, Х.** Метод расчета эффективной теплопроводности смесей заметно отличающихся величин теплопроводности компонентов.//Х.Маджидов,С.Зубайдов,М.М.Сафаров./ДАН Тадж.ССР. №5,- 1987,- Душанбе,- С.297-300.

**70. Савенков, В.К.** Аналитические методы расчета теплопроводности зернистых материалов.//В.К.Савенков,Б Х.Маджидов, М.М.Сафаров/ Тез.докл. Респ. конф. молодых ученых, посв. 70-летию Физико-технического Института АН. Тадж. ССР, 1987, Душанбе,- С.11.

**71. Маджидов, Х.** Теплопроводность и электропроводность некоторых термотропных жидких кристаллов.// Х.Маджидов, Б.Сабуров, Н.Саидов, М.М.Сафаров. /ДАН Тадж.ССР, №6, 1989, Душанбе,- С.380-385.

**72. Маджидов, Х.** Применение закона соответственного состояния для расчёта теплопроводности жидких кристаллов//Х.Маджидов,Б.Сабуров, Н. Саидов, М.М.Сафаров /ИФЖ,- Т.58,- №2, -Минск,- 1990,- С. 340-344.

**73. Маджидов, Х.** Теплопроводность и электропроводность некоторых жидких кристаллов в зависимости от температуры.//Х.Маджидов, Б. Сабуров, Н. Саидов, М.М.Сафаров/ ТВТ,- Т.28,- №4,- 1990,-М.-С.39-44.

**74. Маджидов, Х.** Расчет теплопроводности простых эфиров при высоких параметрах состояния.//Х.Маджидов, М.М.Сафаров /ИФЖ,Т.59, №6,1990, Минск,- С. 896-904.

**75. Маджидов, Х.** Об использовании дифференциального уравнения для расчета эффективной теплопроводности двухкомпонентных пористых сред.// Х. Маджидов, В.К.Савенков, М.М.Сафаров/ Изв.АН Тадж.ССР, №1, 1991, Душанбе,- С.77-79.

**76. Маджидов, Х.** Теплопроводность особо чистого алюминия в зависимости от температуры.//Х.Маджидов, Б.Аминов, А.Вахобов, Ф.У.Обидов, М.М. Сафаров /ДАН Тадж.ССР, №2, Т.34, 1991, Душанбе, -С.93-95.

**77. Маджидов, Х.** Расчет теплопроводности простых и смешанных эфиров на линии насыщения.//Х. Маджидов, А.И.Богданов, С.Зубайдов, М.М. Сафаров/ Тр. Респуб .научно-практ . конф., 1991, Курган-Тюбе.-С 57.

**78. Маджидов, Х.** Теплопроводность и плотность простых эфиров. // Х. Мад жидов, М.М. Сафаров/ИФЖ, Т.-63, -№3,- 1992, -Минск,- С.309-313.

**79. Маджидов, Х.** Применение уравнения Тейта для расчета теплопроводности растворов подсолнечного масла и изомергексана .//Х. Маджидов,М.М. Сафаров,С.Зубайдов/Сб. Вопрос физико – химических свойств веществ. (Межвузовский сборник),Душанбе, Вып.1,1992,-С. 117-123.



**80. Madzhidov, Kh.** Thermal conductivity and density of ethers//Kh. Madzhidov, M.M. Safarov/Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 1992, -Volume 63, -Number 3,-Pages 309-313.

**81. Сафаров, М.М.** Расчет теплопроводности полимерных растворов при различных температурах и давлениях. //М.М. Сафаров, М.А. Зарипова, А.С.Назруллоев / Тез.науч.прак.конф. 28-30 октября 1993, Душанбе,- С.33.

**82.Сафаров, М.М.** Модифицированное уравнение Тейта для расчета теплопроводности простых эфиров/ ИФЖ, Т.66, №6, 1994,Минск, С.721-724.

**83.Safarov, M.M.** Heat conductivity of organic liquids containing Oxygen and Water Muxtures of Hydrazine in Wide State.//М.М. Safarov,М.А.Zaripova,М.Т.Turgunboev. / 23 –Thermal Conductivity, 29 oct.-1 nov. 1995,-USA, -OakRidg, -P.126.

**84.Зарипова,М.А.** Теплопроводность водных растворов аэрозина при высоких параметрах состояния.//М.А.Зарипова,М.М.Сафаров/ Сб. ТУТ. Вып.3, Душанбе,- 1997,- С.31-35.

**85.Сафаров, М.М.** Теплопроводность водных растворов диметил гидразина в широком интервале температур и давлений. //М.М. Сафаров, М.А.Зарипова, М. Т. Тургунбоев./ИФЖ.-Т.71,- №2.-1998,-Минск,-С.375-383.

**86.Safarov, M.M.** Heat conductivity of dimethylhydrazine water solutions with dependence on Temperature and Pressure.// М.М. Safarov, М.А. Zaripova, М.Т.Turgun-boev. /15<sup>th</sup> ECTP, Conference Book 1999,- Germany,- P.407.

**87. Safarov, M.M., Ibragimov Kh.I.** Thermal conductivity of diethylglycol in dependence concentration water, pressure and temperature 26<sup>th</sup> ITCC and 14<sup>th</sup> ITEC Cam-bridge, Massachusetts, USA, 6-8 August, 2001,- P.59.

**88.Safarov, M.M.** Thermal conductivity of vegetale oils of wide range temperature, pressures and concentrations solvents.//М.М. Safarov, S.A. Tagoev, Sh.T. Usupov./18<sup>th</sup> European conference on thermophysical properties. France,-2008,- p.-27-28.

**89. Сафаров М.М.** Теплопроводность полупроводниковых систем CdSb-NiSb<sub>2</sub> в зависимости от температуры.//М.М. Сафаров, З.Н. Едалиева, М.С.

Сайдуллоева. /Материалы научно-практической конференции “Актуальные проблемы технологического образования высших, средних специальных и средних учебных заведений” Душанбе-2009,-С. 35-37

**90.Сафаров, М.М.** Теплопроводность системы «вода – герметик» в зависимости от температуры и давления.//М.М. Сафаров, Ш.А. Аминов, М.А.Зарипова, Ш. З. Нажмуддинов, Х.А. Зоиров./Вестник Таджикского технического университета. 2009.-Т. 4-8.- №8.-С.3-12.

**91.Safarov, M.M.** Thermal conductivity and thermodynamic properties of water ethylhydrazine solutions.//M.M.Safarov, M.A.Zaripova, T.R.Tilloeva, H.A. Zoirov./ Proceedings of the Thirtieth International thermal conductivity conference, 2009, Pittsburg, Pennsylvania, USA,-pp.841-847 (edited by Daniela S, Caal and Peter S,Gaal).

**92.Сафаров, М.М.** Теплопроводность коллоидного раствора нано серебра в зависимости от температуры.//М.М.Safarov, Т.Р.Тиллоева. /Тезисы докладов 13 Российской конференции по теплофизическим свойствам веществ (с международным участием), Новосибирск-28 июня-1 июля,-2011.-С.184.

**93.Арсланов, В.А.** Экспериментальная установка для исследования теплопроводности газов при температурах до 773 К и давлениях до 200 МПа/Тарзиманов А.А.//Труды КХТИ. – 1971. – Вып.47. – С.150 –156.

**94. Чудновский,А.Ф.**Теплообмен в средах. /Гостех-издат. – 1954. – 444 с.

**95. Кудрявцев Е. В.** Нестационарный теплообмен/Чекалев К.Н., Шуманов Н.В.//Изд-во АН СССР. –1961. – 158 с.

**96. Мень А.А.** Лучисто-кондуктивный теплообмен в среде с селективными оптическими свойствами./А.А.Мен,О.А.Сергеев.//ТВТ.–1971.-Т.9.– Вып.3.-С. 370с.

**97. Логачева,В.А.,** Афонин Н.Н., Вахтель В.М. и др. Взаимодействие компонентов в двухслойной пленочной системе. Fe+TiO<sub>2</sub>, полученной методом маг-нетронного распыления./Конденсированные среды и межфазные границы, 2016, Т.18, №3,-С.345-355.

**98. Polts, H.** Die Wärmeleitfähigkeit von III. Abhängigkeit der von der Schichtdicke bei organischen Flüssigkeiten // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 1965/ - Bd.8. - № 4. – S. 609 –620.

**99. Zaripova, M.A.** Applications: Influence of Carbon nanotube to exchange thermo physical properties of hydrazine hydrate (rocket fuel) in dependence temperature and pressures./H.A. Zoirov, M.M. Safarov, -2011.-P. -456-457..

**100. Гусейнов, К.Д.** Исследование термодинамических свойств ряда кислородосодержащих органических веществ в широком интервале параметров состояния:/ Камал Дадаш огли Гусейнов.//Дисс...д-ра.т.н.- Баку, 1979.–392 с.

**101. Zaripova, M.A.** Thermal conductivity of water ethylhydrazine solutions. /M. M. Safarov, M.A. Zaripova, T.R. Tilloeva, H.A. Zoirov. //Conference book. 30-International Thermal Conductivity Conference and 18 International Thermal Expansion Symposium. Pittsburg, Pennsylvania USA, August 29–September.-2009.-P.26.

**102. Лыков, А.В.** Теория теплопроводности. М.: Выш.шк.-1967.-559 с.

**103. Zaripova, M.A.** Influence nanocatal to exchange of isobaric heat capacity ternary systems (hydrazine- hydrate+water+oxide aluminium) in dependence temperature and pressures./H.A. Zoirov, S.A. Tagoev, M.M. Safarov, A.G. Toshov, M.A. Zaripova.// Program and Extended abstracts, of 31<sup>th</sup> Thermal conductivity conference, 19<sup>th</sup> International Thermal expansions symposium. -2011.-P.18.

**104. Зарипова, М.А.** Автоматизированный теплофизический комплекс для измерения теплопроводности жидкостей при высоких параметрах состояния /М. М.Сафаров, С.Б. Доброхотов, М.А.Зарипова.- №8. -1994. –С. 13-19.

**105. Кондратьев, Г.М.** Регулярный тепловой режим./ ГИТТЛ. -1954.-408с.

**106. Кондратьев, Г.М.** Приложение теории регулярного охлаждения двухсоставного шара к определению теплопроводности плохих проводников тепла //Изв. АН СССР. Отд.техн.наук–1950. -№4.- С.536 – 542.

**107. Неручев, Ю.А.** Оценка достоверности теплофизических характеристик органических веществ в критической области./Ю.А.Неручев, М.Ф.

Болотников. / Химия и компьютерное моделирование. /Бутлеровские сообщения. - 2002.-№9.- С.138-139.

**108. Гуломов, М.М.** Влияние температуры, давления и концентрации нанонаполнителей на изменение теплофизических свойств углеродосо держащих растворителей./ М.М.Сафаров, Ш.А.Аминов, М.А. Зарипова, М.М. Гуломов //Вестник ТТУ им. академика М.С.Осими.-№1(29).- 2015.–С. 19-21.

**109.Амирханов, Х.И.** Изохорная теплоемкость технически важных жидкостей:(Сб.науч.тр.)/Гос.ком.СССР по стандартам. ГОСслужба стандарт. - 1984.-182с.

**110. Шингарев, Р.В.** Экспериментальное исследование теплопроводности сжатых природных газов и углекислот: /Р.В. Шингарев//Дис..... канд. техн. наук. -1952. – 147с.

**111. Казанский, М.Ф.** Водяной термостат фототиратронами автотерморегулятором /М.Ф. Казанский// Научные записки Киевского государственного педагогического института. /Сер. Физико-математические науки. -1948.–Т.12.-№3.-С. 127-137.

**112. Kraussold, N.** Fereschung Gebiete Yugh.W.–1934.– Vol.5. - № 4. –186s.

**113.Голованец, В.А.** Исследование структурно-механических свойств рыбных фаршей.//Автореф..... к.т.н. М.:1979-23с.

**114.Гинзбург, А.С.** Теплофизические характеристики пищевых продуктов / А.С.Гинзбург , Г.И. // Красовская . Справочник. – 1990.-287с.

**115. Зарипова, М.А.** Влияние фуллерена  $C_{60}$  на изменение теплопроводности жидкого гидразина в широком интервале параметров - М.М. Сафаров, М.А.Зарипова, Н.Б.Давлатов, Т.Р. Тиллоева// Материалы Девятой Международной теплофизической школы. Теплофизические исследования и измерения при контроле качества веществ, материалов и изделий. 6-11 октября - 2014.- С.456-467.

**116. Зарипова, М.А.** Расчет температуропроводности простых эфиров в зависимости от температуры и давления /М.М.Сафаров, М.А. Зарипова Измерительная техника.- № 9.-1997.- С.41-43.

**117. Зарипова, М.А.** Температуропроводность коллоидного раствора нано серебра в зависимости от давления при комнатной температуре /М.М. Сафаров, М. А. Зарипова, С.А.Тагоев, Т.Р.Тиллоева, Х.А. Зоиров, Д.С. Джураев. -2012.- №3. - С.51-53.

**118. Зарипова, М.А.** Теплофизические свойства гидразинзамещенных водных растворов в широком интервале параметров состояния / М.М. Сафаров, М. А. Зарипова, М.Т.Тургунбоев, Ф.С.Раджабов, В.С. Давлатова.-1996.-Вып.11-С.52.

**119. Зарипова, М.А.** Теплопроводность относительно чистых нанокристаллических нанопорошков, изготовленных из непереходных и переходных металлов.//М.А.Зарипова, М.М.Сафаров, Иман Бахроми Маниш, Т. Р.Тиллоева, Б.М. Махмадиев /Сборник 3 Международной научно-технической конференции “Современные методы и средства исследований теплофизических свойств веществ”. -2015. -С.69-70.

**120. Зарипова, М.А.** Применение критериев Нуссельта для обработки экспериментальных данных и определение коэффициента теплоотдачи./М.А. Зарипова, Т.Р.Тиллоева, Х.А.Зоиров и др. //Материалы республиканской научно-практической конференции «Современные проблемы химии, химической технологии и металлургии». – 2009.-С.39-41.

**121. Зарипова, М.А.** Расчет коэффициентов переноса массы, импульса и кинетической энергии газообразного гидразингидрата и его продукты разложения / М.М.Сафаров, Х.А. Зоиров, Ш.А.Аминов. Иман Бахроми Маниш, А.Ф.Тошов // Материалы 8 Международной теплофизической школы, посвященный 60 - летию профессора Сафарова М.М. Душанбе-Тамбов, 8-13 октября .- 2012.- С.206-208.

**122. Зарипова, М.А.** Температуропроводность наножидкостной системы низкотемпературного топлива и фуллерен  $C_{60}$ /М.М.Сафаров, М.А. Зарипова Н.Б. Давлатов, Х.А.Зоиров//Материалы 7-Международной научно-практической конференции “Перспективы развития науки и образования, посвященной 20-летию

Конституции Республики Таджикистан и 90 –летию. 23-24 октября.- 2014.- С. 147-151.

**123. Зарипова, М.А.** Влияние наноразмерной окиси железа ( $Fe_2O_3$ ) на изменение теплофизических свойств гидразингидрата/М.М.Сафаров, М.А. Зарипова, Х.А. Зоиров.//Материалы 8 Международной теплофизической школы, посвященной 60-летию профессора Сафарова М.М. 8-13 октября.- 2012.- С.115-117.

**124. Сафаров, М.М.** Р-р-Т зависимости водных растворов гидразина/ М.М. Сафаров, А.В. Картавченко. //Журнал Физическая химия.-1993.-Т.67.-№4. - С. 710 -712.

**125. Зарипова, М.А.** Расчет температуропроводности водных растворов азрозина при различных температурах и давлениях/ М.М.Сафаров, Зарипова, М. А.Расчёт температуропроводности водных растворов азрозина при различных температурах и давлениях// М.Т. Тургунбоев, Х.А.Зоиров // Вестник Таджикского государственного педагогического университета им. С.Айни.- №5(41).- 2011.- С.9-18.

**126. Зарипова, М.А.** Применение критерия Нуссельта для обработки экспериментальных данных по теплопроводности теплоносителей. / М.А. Зарипова, Х. А.Зоиров, М.М.Сафаров,Э.Ш.Тауров,Т.Р.Тиллоева.//Сб. трудов международной конференции «Фазовые переходы, критические и нелинейные явления в конденсированных средах» Махачкала.7-10 сентября.- 2009.-С.64-69.

**127. Парфенов, В.Г.** Регрессионный и корреляционный анализ. Обработка результатов наблюдений при измерениях.:/ В.Г. Парфенов. -1983. – 78с.

**128. Рабинович, С.Г.** Методика вычисления погрешности результатов измерения./С.Г. Рабинович //Метрология. –1970. –№1.–С.3–12.

**129. Патент №ТJ 292,** Устройство для определения температуропроводности магнитных жидкостей/М.М.Сафаров,Д.С.Джураев,М.А. Зарипова, Ш.З. Нажмудинов, Ф.Наджмизода,Н.П. Мухамедиев, Т.Р.Тиллоева, Х.А. Зоиров//Малый патент TJ 292, заявлено 31.03.2009, заявка №0900296. Зарегистрировано в Гос.реестре изобретений РТ от 27.01.2010г. G 01 N 27/00; 27/74

**130. Rossini, F.D., Pitzer K.S., Arnett R.L., Braun R.M., Rimentel G.C.,** Selected value of physical and thermodynamic properties of hydrocarbons and related compounds, Pittsburg, USA, -1953.-p.468.

**131. Гуломов, М.М.** Влияние углеродных нанотрубок (0,1-0,5г), на изменение теплопроводности жидкого диэтилового эфира при различных температурах и давлениях/ М.М.Сафаров, М.А. Зарипова, М. М. Гуломов //Вестник Таджикского национального университета, (научный журнал). -2015.- №1/6(134).- С.57-61.

**132. Гуломов, М.М.** Итенсификация азотосодержащих ракетных топлив с учетом добавки наночастиц и расчет их термодинамических характеристик /М.А. Зарипова, М.М.Сафаров, Н.Д. Давлатов, А.С.Назруллоев, Т.Р.Тиллоева, З.Н. Едалиева, М.М. Гуломов, Э.Ш. Тауров.//Материалы 8 Международной научно-технической конференции "Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики (АНТЭ-2015)" 19-21 октября, КАИ. - 2015. - С.517-522.

**133. Гуломов, М.М.** Влияние углеродной нанотрубки (УНТ) и температуры на изменение теплопроводности диэтилового эфира в закритической области/ М.М. Сафаров, М.А. Зарипова, М.М. //Измерительная техника -2015.-С.13-19.

**134. Gulomov, M.M.** Effect of Fullerenes  $C_{60}$ ,  $C_{70}$  and CNTs on the Thermophysical Properties of Nitrogen and Oxygen-Containing Liquids (Rocket Fuel) //M.M.Safarov, M.A.Zaripova, M.M.Gulomov, N.B.Davlatov/Advanced Materials and Technologies, Tambov-2016.-№1.- p.17-28(Scopus)

**135. Гуломов, М.М.** Влияние нанотрубок (УНТ) на изменение теплопроводности диэтилового эфира в зависимости от температуры при атмосферном давлении /М.А.Зарипова, М.М.Сафаров, М.М.Гуломов //Материалы конференции "Состояние химической науки и ее преподавание в образовательных учреждениях" Республики Таджикистан.-2015.- С. 169-172.

**136. Гуломов, М.М.** // Влияние углеродных нанотрубок на изменение теплопроводности жидкого диэтилового эфира. Материалы научно-практической конференции, Кургантюбе.-2015.-С. 60-62.

**137. Гуломов, М.М.** Влияние углеродной нанотрубки (УНТ), температуры и давления на изменение теплопроводности диэтилового эфира в до критической области/ М.М. Сафаров, М.А.Зарипова, М.М. Гуломов//Вестник Таджикского технического университета им. академика М.С. Осими.- №2 (230).-2015.-С.15-22.

**138. Дульнев, Г.Н.,** Заричняк Ю.П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов. /Справочная книга.Л., "Энергия", 1974, 264с.

**139. Гуров, К.П.,** Карташкин Б.А., Учасе Ю.Э. Взаимной диффузии в многофазных металлических системах./М.:Наука, 1981.-350с.

**140. Александров, О.В.,** Козловский В.В. Моделирование взаимодействия никеля с карбидом кремния при формировании омических контактов ./ФТП, 2009, Т.43, №7,- С.917-923.

**141. Молохина, Л.А.,** Рогалин В.Б., Филин С.А. и др. Математическая модель роста фаз в двухкомпонентных многофазных системах при изотермическом отжиге. / Журнал физической химии. 2017, Т.91.-№9,-С.1468-1475.

**142. Weber, H.F.** Untersuchungen über die Wärmeleitung in Flüssigkeiten // Chem. Bd. 10, herausg. Von G. Wiedemann. 1880. H.5. S.103.-1973. – 336 с.

**143. Зарипова, М.А.** Теплофизические свойства гидразинзамещенных водных растворов в широком интервале параметров состояния / М.М. Сафаров, М. А. Зарипова, М.Т.Тургунбоев, Ф.С.Раджабов, В.С. Давлатова.-1996.-Вып.11-С.52.

**144. Васильев, Л.Л.** Теплофизические свойства пористых материалов. /Танаева С.А//Наука и техника. -1971. – 267 с.

**145. Мень, А.А.** Лучисто-кондуктивный теплообмен в среде с селективным оптическими свойствами/О.А. Сергеев А.А. Мень, // Теплофизика высоких температур. – 1971. – Т.9.-вып.2.– С.353 – 359.

**146. Платунов, Е.С.** Теплофизические измерения/Е.С. Платунов, С.Е. Буравой, В.В. Курепин, Г.С. Петров.//Под общ.ред. Е.С. –Л.: -1986. –256с.



**147. Зарипова, М.А.** Влияние наножелеза на изменение теплопроводности жидкого гидразина и пути оптимизации парогенераторов ТЭЦ в зависимости от температуры, давления  $P=0,101$  МПа// М.А.Зарипова, Иман Бахроми Маниш, М.М. Сафаров./Вестник Аграрного университета. -2014. - №2.(62).-С.96-99.

**148. Зарипова, М.А.** Влияние нанометалла (Co) и УНТ на изменение теплопроводности диметилгидразина при различных температурах и давлениях / М. М.Сафаров, М.А. Зарипова, Иман Бахроми Маниш // Материалы 7 – Международной научно-практической конференции “Перспективы развития науки и образования, посвященной 20-летию Конституции Республики Таджикистан и 90 –летию. 23-24 октября.-2014.- С. 154-157.

**149. Роко, М. К.** Нанотехнологии в ближайшем десятилетии. Прогноз направления исследований / Под ред. М.К. Роко, Р. С. Уильямса, П. Аливисатоса. -2002.- 132с.

**150.Зарипова, М.А.** Расчет теплопроводности электролитов в зависимости от концентрации растворителя при атмосферном давлении /М.М. Сафаров, М. А. Зарипова // Труды преподавателей и сотрудников ДГПИ им.К. Джуроева.-1993.- С.8.

**151. Зарипова, М.А.** Взаимосвязь теплопроводности с структурой воды в водных растворах гидразина в области критических параметров.// Иман Бахром Маниш,С.К., Давлатшоев, М.А.Зарипова, М.М.Сафаров./Материалы Девятой Международной теплофизической школы, Теплофизические исследования и измерения при контроле качества веществ, материалов и изделий,6-11 октября.- 2014. -.С.453-456.

**152. Патент ТД 316.** Способ определения теплопроводности магнитных жидкостей методом лазерной вспышки /М.А.Зарипова, М.М.Сафаров, Д.С. Джуроев, М.А.Зарипова, Ш.З.Нажмуудинов, Н.П. Мухамедиев, Т.Р.Тиллоева, Х.А. Зоиров,Ш.А. Аминов//Малый патент, заявлено 25.09.2009. заявка №0900357. За зарегистрировано в Гос.реестре изобретений РТ от 7.04. 2009г.Г 01 N21/00 Государственное патентное ведомство Респ. Таджикистан.

**153. Терехов, В.И.** Механизм теплопереноса в наножидкостях: современное состояние проблемы (Обзор)/Калинина С.В., Леманов В.В//Ч.1. Синтез и свойства нано жидкостей. Теплофизика и аэромеханика.- 2010.-Том 17.- №1.-С.1-15.

**154. Стальнов, П.И.** Метод повышения точности физико-химических измерений./П.И.Стальнов// Тезисы докладов /Вторая международная теплофизическая школа. 25-30 сентября .-1995.- С.238.

**155. Гуломов, М.М.** Влияние углеродной нанотрубки (УНТ) и температуры на изменение теплопроводности диэтилового эфира в закритической области/ М. М. Сафаров, М.А. Зарипова.

//Измерительная техника-2015.-С.13-19.

**156. Железный, В.П.** Теплофизические свойства растворов хладагентов в компрессорных маслах: Монография./В.П. Железный, Ю.В. Семенюк //Одесса-Феникс.2013.-419с.

**157. Цветков, О.Б.** Холодильные агенты. /Монография.2-изд., переработана и доп.СПб. СПбГУН и ИП. 2004.216с.

**158. Рувинский, Г.Я.,** Лавренченко Г.К., Канаев В.В. Разработка кубических единиц уравнения состояния для описания термодинамических свойств малоизученных веществ и систем компрессорного масла фреон.// Сборник ГСССД “Физические константы и свойства веществ”.1989.-№28.-С.140-150.

**159. Железный, В.П.,** Проценко Д.А., Анчербак С.Н. и др; Экспериментальное исследование термодинамических свойств растворов изобутана в компрессорном масле. /ХМИ Азмол. Часть 1.Холодильная техника и технология-2006.-№5.-С.41-50.

**160. Проценко, Д.А.,** Семенюк Ю.В., Ниченко С.В., Железный, В.П.. Экспериментальное исследование термодинамических свойств растворов изобутана в компрессорном масле. /ХМИ Азмол. Часть 2.Холодильная техника и технология-2006.-№4 (102).-С.29-34.

**161. Железный, В.П.,** Проценко Д.А., Анчербак С.Н. и др. Экспериментальное исследование термодинамических свойств растворов

изобутана в компрессорном масле. /ХМИ Азмол.Холодильная техника и технология-Одесса,2005.-С.85-90.

**162. Ниченко, С.В.,**Семенюк Ю.В., Железный, В.П. Исследование давления насыщенных паров, плотности, капиллярной постоянной и поверхностного натяжения растворов изобутана. /Reniso WF 15A// ХМИ Азмол.Холодильная техника и технология-Одесса, 2007.-С.96-97.

**[163 – А]. Джумаев, С.С.** Комплексная солнечная установка для получения тепловой и электрической энергии. /Ф.Абдужалилзода, С.Х.Мирзоев, М.М.Сафаров, М.М.Гуломов, Х.Х.Назаров, Р.Дж.Давлатов, А.Р.Раджабов, С.С.Рафиев, М.А.Зарипова, Д.Ш.Хакимов,Б.М.Махмадиев, Д.А.Назримадов, **С.Джумаев**, К.Н.Файзиев //Материалы Международной конференции “Фазовые переходы, критические и нелинейные явления в конденсированных средах”, Махачкала,15-20 сентября 2019,- С.420-422.

**[164 – А] Джумаев, С.С.** Вклад нанотрубок OCSIA1 и сажи на поведение реологических и термодинамических свойств простых эфиров и хладагентов.// Д. Ш.Хакимов,М.М.Сафаров,М.М.Гуломов,Б.А.Тимеркаев,А.Р.Раджабов,Х.Х.Ойматова, З.К. Хусайнов, С.С. Рафиев, **С.С. Джумаев**, Ш.Р. Сафаров. /Материалы 6 Международной научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов “Энергосбережение и эффективность в технических системах”,Тамбов,3-5 июня 2019, -С.169-170.

**[165 – А]. Джумаев, С.С.** Новый способ получения тепла и электричества в условиях Таджикистана.// Ф. Абдужалилзода, С.Х. Мирзоев, М.М. Сафаров, М.М. Гуломов, Х.Х. Назаров, Р.Дж. Давлатов, А.Р. Раджабов, С.С. Рафиев, М.А. Зарипова, Д.Ш. Хакимов, Б.М. Махмадиев, Д.А. Назримадов, **С.С. Джумаев**, Б.Г.Файзиев./ Материалы 6 Международной научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов “Энергосбережение и эффективность в технических системах”, Тамбов, 3-5 июня 2019,- С.178-179.

**[166 – А] Jumaev, S.S.** Experimental study of thermal conductivity of liquid hydrocarbon mixtures with addition of fillers// S.H. Mirzoyev, M.M. Safarov,

A.R.Rajabov, **S.S. Jumaev**, M.M. Gulomov, Matlabi Jabborzoda. /IARIA, 2CFP, ICQNM-2020, 15 -19 November, 2020, Ispane,Valenciya, 2020, p.

[167 – A] **Jumaev**, S.S. Influence of C60 and C70 fullerenes on the change of thermal activity of vapors of hydrocarbon heat carriers // T.R.Tilloeva, M.M.Safarov, S.S.Jumayev, M.M.Gulomov,N.E.Jumayeva,Z.Yu.Norov. /IARIA, 2 CFP, ICQNM-2020, 15 - 19 November, 2020, Ispane, Valenciya, 2020,p.

[168 – A]. **Сафаров М.М.**, Сафаров Ш.Р., Мухамадалии К., **Джумаев С.С.** Влияние температуры, давления, концентрации МСУНТ, ОСУНТ, OCSiAL и композитных материалов на изменение теплопроводности хладагентов. 16 международной научно практического конференции аспирантов, магистрантов и специалистов “Энергосбережение и эффективности в технических системах”, // Тамбов, 3-5 июня 2019,- С. 188-189.

[169– A]. **Сафаров М.М.** Гуломов М.М. Хакимов Д.Ш., Ойматова Х.Х., Сафаров Ш.Р., Махмадалии К., Рафиев С.С., **Джумаев С.С.** Влияние металлических наночастиц на изменение реологических свойств углеродов. /Reniso WF 15A ХМИ Азмол.Холодильная техника и технология-Одесса // Тамбов, 3-5 июня 2019,- С. 72-73.

[170– A]. **Сафаров М.М.** Гуломов М.М. Хакимов Д.Ш., Ойматова Х.Х., Сафаров Ш.Р., Зарипова М.А., Хусайнов З.К., Рафиев С.С., **Джумаев С.С.**, Файзиев Б.Г., Температуропроводность металлических материалов в турбанасосных агрегатах в поле центробежных сил. / Материалы международной конференции “Фазовые переходы, критические и нелинейные явления в конденсированных средах”, Махачкала,15-20 сентября 2019,- С.170-172.

[171– A]. **Сафаров М.М.** Гуломов М.М. Хакимов Д.Ш., Ойматова Х.Х., Сафаров Ш.Р., Тиллоева Т.Р., Хусайнов З.К., Назирмадов Д.А., **Джумаев С.С.**, Файзиев Б.Г., Реологические свойства растворов на основе бензола с учетом изменение концентрации нанокомпозитов ( $H_2I_4$ ), температуры и давления. /Материалы 6 Международной научно-технической конференции студентов, молодых ученых

и специалистов “Энергосбережение и эффективность в технических системах”/ Махачкала, 15-20 сентября 2019,- С.173-175.

[172– А]. Сафаров М.М. Гуломов М.М. Хакимов Д.Ш., Ойматова Х.Х., Сафаров Ш.Р., Мухамадали К., Рафиев С.С., Джумаев С.С., Влияние температура, давления и концентрации многостенных нанотрубок на изменение теплофизических свойств теплоносителей и хладагентов. / Материалы 6 Международной научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов “Энергосбережение и эффективность в технических системах” / Махачкала, 15-20 сентября 2019,- С.167-169.

[173– А]. Сафаров М.М. Хакимов Д.Ш., Гуломов М.М., Тимаркаев Б.А., Раджабов А.Р., Ойматова Х.Х., Хусайнов З.К., Рафиев С.С., Джумаев С.С., Сафаров Ш.Р. Влияние наночастиц OCSIAL и сажи на изменение термодинамических свойств простых эфиров и хладагентов. / Материалы 6 Международной научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов “Энергосбережение и эффективность в технических системах” / Махачкала, 15-20 сентября 2019,- С.180-181.

[174– А]. Сафаров М.М. Раджабов А.Р., Джумаев С.С., Гуломов М.М., Раджабова Д.Ш., Матлаби Джабборзода., Розиков К.Н. Мирзоева К. Экспериментальные исследования теплопроводности жидких углеводородных смесей при добавке в них наноагентов. Вестник филиала МГУ им. М.В. Ломоносова серия естественных наук, 2019. 1.3-(3). –С.46-55.

[175– А]. Сафаров М.М., Джумаев С.С., Саидзода К.Б., Умарзода Ш.У., Неъматов Г.Н., Файзиев Б.Г., Гуломов М.М. Влияние наночастиц с эффектами памяти на поведение теплопроводности композитных материалов и хладагентов. /Материалы республиканской научно-практической конференции посвященной “20 летию изучения и развития естественных, точных и математических наук в сфере науки и образования “ на тему современные проблемы физики конденсированного состояния и ядерной физики”, ТНУ., Душанбе, 2020,-С. 55-57.

[176 – A]. **Safarov M.M.**, Rajabov A.R. **Jumaev S.S.**, Gulomov M.M., Rajabova D.Sh., Matlabi Jabborzoda. Experimental study of thermal conductivity of Liquid hydrocarbon mixture at the addition of fillers in them. Rostoc-2020,. Germany, 8-9, October, 2020, p. 58.

[177 – A]. **Safarov M.M.**, Tilloeva T.R., **Jumaev S.S.**, Gulomov M.M. Jumaeva N.E., Norov Z. Yu., Taurov E. Sh. Influence of  $C_{70}$  fullerenes on the change of thermal conductivity of hydrocarbon heat carriers. Matlabi Jabborzoda. Rostoc-2020,. Germany, 8-9, October, 2020, p. 95.

[178– A]. **Сафаров М.М.** Тиллоева Т.Р., **Джумаев С.С.**, Гуломов М.М. Джумаева Н.А., Норов З.Ю., Гортышов Ю.Ф., Алтуних В. А. Влияние фуллеренов  $C_{60}$  и  $C_{70}$  на изменение тепловой активности паров углеводородных теплоносителей. Вестник ТНУ, Д..... Душанбе, 2020.-С.

[179– A]. **Сафаров М.М.**, Гуломов М.М. **Джумаев С.С.**, Влияние углеродных нанотрубок на поведение теплопроводности хладагентов. Материалы 3 международной конференции СПТЭ- 2020, Москва, НИУМЭИ, 19-23 октября 2020.-С.

[180– A]. **Safarov M.M.**, Gulomov M.M. **Jumaev S.S.**, The influence of carbon nanotubes on the thermal conductivity of hydrocarbon mixture. Materials of the 3 International conferences SPTE- 2020,. Moscow, National Research University.- Moscow Power Engineering Institute, 19-23 October 2020, p.

[181– A]. **Сафаров М.М.** Матлаби Джабборзода., Раджабова Д.Ш., **Джумаев С.С.**, Гуломов М.М., Раджабов А.Р., Абдужалилзода Ф., Раджабова Д.Ш., Джумаева Н.А., Исмонов Ф.Д., Рафиев С.С. Коэффициент изотермического сжимаемости и текучести некоторых органических водных растворов. / Сборник статей республиканской научно- теоретической конференции на тему: “Основы развития и перспективы химической науки в РТ”, посвященной 60- летию химического факультета и памяти д.х.н, профессор академик НАН РТ, Нумонова Ишонкула Усмоновича, (12-14) сентября 2020, -С. 47-49.

[182– А]. Сафаров М.М., Бобоеров А.Х., Файзиев Б.Г., Саидзода К.Б., Умарзода Ш.У., Джумаев С.С. Применение программного продукта Comsol multiphysics для определения структуры композитных материалов и для расчета теплофизических свойств / Материалы республиканской научно-практической конференции посвященной “20 летию изучения и развитиях естественных, точных и математических наук в сфере науки и образования “ на тему современные проблемы физики конденсированного состояния и ядерной физики”, ТНУ., Душанбе, 2020,-С. 225-255.

[183– А]. Гуломов М.М. Джумаев С.С. Влияние одностенных углеродных нанотрубок на изменение теплопроводности изобутана при различных температурах и давлениях. / Известия академия наук Таджикистана // 2020.-С.49-62, Ринц.

[184– А]. Сафаров М.М., Гуломов М.М., Джумаев С.С. Влияние одностенных углеродных нанотрубок на изменение теплопроводности изобутана. // Сборник научных трудов 3 Международный Косигинский форум “ Современные задачи инженерных наук ” Международный научно технический симпозиум- “ Энергоэффективности и экологической безопасности процессов аппаратов химической и смежных отраслей промышленности ” посвященной 110-летию А.Н. Плановского. М. (20-21 октября 2021г.) –С. 196-199. Ринц , Doi 10/37816/ecste- 2021-1-196-199. (Scopus).

[185– А]. Сафаров М.М., Раджабова Д.Ш., Джумаев С.С. Влияние наночастиц на изменение теплопроводности органической жидкостей включая критической области. / Материалы международной научно- практической конференции “Энергетика Таджикистана .. Проблемы энергосбережения энергоэффективности и использования возобновляемых источников энергия ” посвященной 30-летию независимости РТ, 90-летию МЭИ в г. Душанбе, 4- июня 2021г.- С. 214, Ринц.

[186– А]. Сафаров М.М., Джумаев С.С., Раджабова Д.Ш., Умарализода С.С., Мансури Умарали., Гортышов Ю. Ф. Влияние углеродных нанотрубка на изменение теплоемкости хладагентов (изобутан). / Материалы республиканской практической конференции ( с международным участием). “Теплоэнергетика и

теплофизический свойства веществ,” посвященной 30-летию государственной независимости РТ, 65-летию ТТУ им. Акад М.С. Осими и 50-летию МТФШ (26-28 августа 2021г) Душанбе –С. 182-186.

**[187– А]. Сафаров М.М., Джумаев С.С., Гуломов М.М.** Влияния однослойных углеродных нанотрубок (ОСУНТ) на изменение теплоемкости жидкого Н-бутана, при различных температурах (140,2-270,5) К и давления (0,101-49,01) МПа. Сборник статей 5 Международной научной конференции “Вопросы физической и координационной химии”, посвященной памяти докторов химической наук, профессоров Якубова Хомида Мухсинович и Юсуфова Зухуриддина Нуриддиновича- (15-16 ноября 2021г.), Душанбе, - С. 67-71, Ринц.

**[188– А]. Сафаров М.М., Джумаев С.С., Гуломов М.М., Тиллоева Т.Р., Умарализода С.С., Мансури Умарали.** Влияние (ОСУНТ) и (МСУНТ) на изменение теплоемкости изобутана при различных температурах и давлениях. Сборник трудов 12 МТФШ “Теплофизика и информационные технологии” 19-21 октября 2021г. г. Тамбов -2022-С. 165-171, Ринц.

**[189– А]. Джумаев С.С.,** Влияние одностенных углеродных нанотрубок на изменение изобарной теплоемкости Н- бутана в газообразном и жидкой фазе. Вестник Технический университет Таджикистана 4(47), 2021, Душанбе, -С. 23-29, ВАК, Ринц, (единоличный автор).

**[190– А]. Джумаев С.С., Сафаров М.М., Тиллоева Т.Р., Гортышов И.Ф.** Влияние фуллеренов  $C_{60}$  и  $C_{70}$  на изменение тепловой активности паров углеводородных теплоносителей. / Вестник филиала МТУ им. М. В. Ломоносов в г. Душанбе, Серия Естественных наук, 2019, 1.3-(3). С.-62.

**[191– А]. Jumaev S.S., Safarov M.M., Rajabov A.R., Gulomov M.M.** e, t. Experimental stade thermal eonductivity of liquid Lydrocarbons mixtures with addition of fillers. IARIA, 2 CFP, ICNNI- 2020, 15-19 octobers 2020, PP.

**[192– А]. Jumaev S.S., Safarov M.M.** e.t. Influenes of  $C_{60}$ ,  $C_{70}$  fullerens on the change of thermal activity of vapors of hydrocarboni heat carries. IARIA, 2 CFP, ICNM- 2020, 15-19 octobers 2020, PP.



[193– А]. Малый патент Республики Таджикистан. Сафаров М.М., Саидзода К.Б. и др. Способ определение теплопроводности твердых тел. Патент РТ, 03.05.2021, №Т71186, 7с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### Определение погрешности измерения плотности

Нами рассчитана погрешность измерения плотности с помощью метода расчета погрешности экспериментальных данных, приведенного в работе [107].

$$\Delta\rho = \sqrt{\left(\frac{\partial\rho}{\partial\Delta_4}\right)^2 (\Delta\Delta_4)^2 + \left(\frac{\partial\rho}{\partial\Delta_5}\right)^2 (\Delta\Delta_5)^2 + \left(\frac{\partial\rho}{\partial\Delta_6}\right)^2 (\Delta\Delta_6)^2 + \left(\frac{\partial\rho}{\partial V_H}\right)^2 (\Delta V_H)^2 +$$


---


$$+ \left(\frac{\partial\rho}{\partial m_1}\right)^2 (\Delta m_1)^2 + \left(\frac{\partial\rho}{\partial m_2}\right)^2 (\Delta m_2)^2 + \left(\frac{\partial\rho}{\partial V_{II}}\right)^2 (\Delta V_{II})^2 + \left(\frac{\partial\rho}{\partial\Delta_1}\right)^2 (\Delta\Delta_1)^2 + \left(\frac{\partial\rho}{\partial\Delta_2}\right)^2 (\Delta\Delta_2)^2 +$$


---


$$+ \left(\frac{\partial\rho}{\partial V_C}\right)^2 (\Delta V_C)^2 + \left(\frac{\partial\rho}{\partial\Delta_3}\right)^2 (\Delta\Delta_3)^2 + \left(\frac{\partial\rho}{\partial\Delta T}\right)^2 (\Delta\Delta T)^2 + \left(\frac{\partial\rho}{\partial\Delta P}\right)^2 (\Delta\Delta P)^2 \quad (\text{п 2.1})$$

где

$$\frac{\partial\rho}{\partial\Delta_4} = -\frac{(m - m_2 + m_1)V_C\Delta_3}{(V_{II}\Delta_1\Delta_2 + V_C\Delta_3\Delta_4 + V_H\Delta_5\Delta_6)}$$

$$\frac{\partial\rho}{\partial\Delta_5} = -\frac{(m - m_2 - m_1)V_H\Delta_6}{(V_{II}\Delta_1\Delta_2 + V_C\Delta_3\Delta_4 + V_H\Delta_5\Delta_6)^2}$$

$$\frac{\partial\rho}{\partial\Delta_6} = -\frac{(m - m_2 + m_1)V_H\Delta_5}{(V_{II}\Delta_1\Delta_2 + V_C\Delta_3\Delta_4 + V_H\Delta_5\Delta_6)^2}$$

$$\frac{\partial\rho}{\partial V_H} = -\frac{(m - m_2 + m_1)\Delta_5\Delta_6}{(V_{II}\Delta_1\Delta_2 + V_C\Delta_3\Delta_4 + V_H\Delta_5\Delta_6)^2}$$

$$\frac{\partial\rho}{\partial m_1} = \frac{1}{V_{II}\Delta_1\Delta_2 + V_C\Delta_3\Delta_4 + V_H\Delta_5\Delta_6}$$

$$\frac{\partial\rho}{\partial m_2} = \frac{1}{V_{II}\Delta_1\Delta_2 + V_C\Delta_3\Delta_4 + V_H\Delta_5\Delta_6}$$

$$\frac{\partial\rho}{\partial V_{II}} = -\frac{(m - m_2 + m_1)\Delta_1\Delta_2}{(V_{II}\Delta_1\Delta_2 + V_C\Delta_3\Delta_4 + V_H\Delta_5\Delta_6)^2}$$

$$\frac{\partial\rho}{\partial\Delta_1} = -\frac{(m - m_2 + m_1)\Delta_2 V_{II}}{(V_{II}\Delta_1\Delta_2 + V_C\Delta_3\Delta_4 + V_H\Delta_5\Delta_6)^2}$$

$$\frac{\partial\rho}{\partial\Delta_2} = -\frac{(m - m_2 + m_1)\Delta_1 V_{II}}{(V_{II}\Delta_1\Delta_2 + V_C\Delta_3\Delta_4 + V_H\Delta_5\Delta_6)^2}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial V_c} = - \frac{(m - m_2 + m_1) \Delta_3 \Delta_4}{(V_{II} \Delta_1 \Delta_2 + V_c \Delta_3 \Delta_4 + V_H \Delta_5 \Delta_6)^2}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial \Delta_3} = - \frac{(m - m_2 + m_1) V_c \Delta_4}{(V_{II} \Delta_1 \Delta_2 + V_c \Delta_3 \Delta_4 + V_H \Delta_5 \Delta_6)^2}$$

С помощью уравнения (п 2.1) с учетом соотношений (2.21-2.28) вычислена доверительная граница погрешности измеряемой плотности в относительной форме при  $\alpha = 0,95$ . Необходимая информация для количественной оценки погрешности содержится в табл. П.1.1.

Расчеты показали, что доверительная граница погрешности измерений плотности в относительной форме при  $\alpha = 0,95$  составляет 0,03 %, методическая погрешность - 0,01%, инструментальная погрешность 0,06%, общая относительная погрешность измерений - 0,1%.

### Определение погрешности измерения температуропроводности

Для проверки правильности постановки экспериментов по температуропроводности на экспериментальной установке были проведены контрольные измерения с водой. Экспериментальные значения температуропроводности контрольных образцов приведены в табл. П.1.1.

Таблица П.1.1. Результаты экспериментального определения температуропроводности воды (контрольных измерений) в зависимости от температуры при атмосферном давлении

Т, К	293	303	313	323	333	343	353
$a_{\text{лит}} 10^8, \text{ м}^2/\text{с}$	14,3	14,9	15,3	15,7	16,0	16,3	16,6
$a_{\text{конт}} 10^8, \text{ м}^2/\text{с}$	14,6	14,7	15,4	15,9	16,5	16,6	16,9
$\sigma, \%$	2,1	1,34	0,65	1,27	3,1	1,84	1,81

Согласно расчетному уравнению доверительная граница погрешности результатов измерений температуропроводности по методу  $a$ -калориметра, определяется из соотношения

$$\Delta a = \sqrt{\left(\frac{\partial a}{\partial m}\right)^2 (\Delta m)^2 + \left(\frac{\partial a}{\partial R}\right)^2 (\Delta R)^2 + \left(\frac{\partial a}{\partial l}\right)^2 (\Delta l)^2}$$

$$\text{где } \frac{\partial \alpha}{\partial m} = \frac{1}{\left(\frac{2,405}{R}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{l}\right)^2}, \quad \text{м}^2/\text{с}^2,$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial R} = \frac{m}{-2\left(\frac{2,405}{R}\right)\frac{1}{R^2}}, \quad \text{м/с};$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial l} = \frac{m}{-\frac{2\pi}{l^3}} = -\frac{ml^3}{2\pi}, \quad \text{м/с};$$

$$\sigma = \frac{\Delta \alpha}{\alpha} \cdot 100\% = 1,8 \%$$

Необходимая информация для количественной оценки погрешности температуропроводности методом регулярного теплового режима первого рода содержится в табл.П 2.2.

Таблица П.2.2. Исходные данные для количественной оценки доверительной границы погрешности результатов измерений температуропроводности по методу регулярного теплового режима первого рода:

№ п/п	Наименование	Величина
1	Высота полости измерительной ячейки l, м	$15 \cdot 10^{-2}$
2	Погрешность измерения толщины измерительной ячейки (нутромером) $\Delta l$ , м	$3 \cdot 10^{-5}$
3	Радиус цилиндра $\Delta R$ , м	$8,5 \cdot 10^{-2}$
4	Погрешность измерения радиуса цилиндра (штангенциркулем) $\Delta r$ , м.	$1 \cdot 10^{-5}$
5	Доверительная граница погрешности измерений температуропроводности в относительной форме при $\alpha=0,95$ %	1,2
6	Методическая погрешность, %	0,2
7	Инструментальная погрешность, %	0,4
8	Общая относительная погрешность измерения теплопроводности по методу монотонного разогрева, %	1,8

Расчеты показали, что максимальная общая относительная погрешность экспериментальных данных по температуропроводности при доверительной вероятности  $\alpha = 0,95$  не превышает 1,8%.