

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ
ТАДЖИКИСТАН
ТАДЖИКСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени С. АЙНИ**

На правах рукописи

УДК 536.12.34-56

**ИСМОНОВ Фируз Довудович
ВЛИЯНИЕ НАНОЧАСТИЦ ДИОКСИДА ТИТАНА НА ИЗМЕНЕНИЕ
ПЛОТНОСТИ И ВЯЗКОСТИ ВОДЫ**

Специальность 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

**ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени кандидата технических наук**

**Научный руководитель:
Заслуженный деятель науки и техники
Таджикистана, доктор технических наук, профессор
МАДЖИДОВ Хамид**

Душанбе – 2024

СОДЕРЖАНИЕ

	Основные условные обозначения и сокращения.....	5
	Введение.....	6
Глава 1	СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА О СПОСОБАХ И МЕТОДАХ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТОПЛИВ, ОХЛАДИТЕЛЕЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ	13
1.1	Наночастицы оксидов металлов. Структура, свойства и методы их получения.....	16
1.2	Углеродные нанотрубки и их свойства.....	19
1.3	Детонационные наноалмазы, структура, свойства и их применение.....	20
	Выводы по первой главе.....	35
Глава 2	ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТЕНДЫ И МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЯ ПЛОТНОСТИ И ВЯЗКОСТИ НАНОЖИДКОСТЕЙ.....	37
2.1	Экспериментальный стенд для определения плотности жидкостей и растворов при атмосферном давлении. Методика измерения плотности жидкостей, растворов (наножидкостей) при атмосферном давлении.....	37
2.2	Экспериментальная установка для исследования динамической вязкости растворов.....	41
2.3	Вискозиметр высокого давления с выносным капилляром...	42
2.4	Методика проведения эксперимента по измерению вязкости при высоких параметрах состояния.....	49
2.5	Расчетное уравнение вискозиметра с выносным капилляром	51
2.5.1	Поправка к расчетному уравнению вискозиметра, присущая методу капилляра.....	53

2.6	Поправки, обусловленные нестационарностью метода.....	55
2.7	Оценка погрешности измерения теплофизических свойств исследуемых веществ.....	61
2.7.1	Определение погрешности измерения плотности наножидкостей.....	64
2.7.2	Расчет погрешности динамической вязкости исследуемых веществ.....	64
	Выводы по второй главе.....	65
Глава 3	ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ЗНАЧЕНИЕ ПЛОТНОСТИ И ВЯЗКОСТИ ИССЛЕДУЕМЫХ РАСТВОРОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ И ДАВЛЕНИЯХ.....	67
3.1	Экспериментальное исследование плотности наножидкостей при различных температурах и давлениях.....	67
3.2	Экспериментальное изучение коэффициента динамической вязкости наножидкостей при различных температурах и давлениях.....	80
3.3	Аппроксимационные зависимости для расчета плотности и вязкости исследуемых растворов при атмосферном давлении и температуры	92
	Выводы по третьей главе.....	98
Глава 4	ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПО ПЛОТНОСТИ ИССЛЕДУЕМЫХ РАСТВОРОВ СИСТЕМЫ (H₂O+TiO₂) И УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ. РАСЧЕТ КАЛОРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РАСТВОРОВ.....	102
4.1	Расчет разности теплоемкостей системы (H ₂ O + TiO ₂) при различных температурах и атмосферном давлении.....	102
4.2	Расчет разности теплоемкостей исследуемых растворов при различных температурах и давлениях.....	102

4.3	Расчет внутреннего давления исследуемых растворов системы ($H_2O + TiO_2$) при различных параметрах состояния и концентрации наночастиц.....	114
4.4	Расчет изотермического коэффициента сжимаемости водных растворов диоксида титана.....	117
4.5	Расчет изотермического коэффициента сжимаемости водных растворов диоксида титана в зависимости от давления при комнатной температуре.....	119
4.6	Обработка и обобщение плотности растворов системы ($H_2O + TiO_2$) при различных температурах и давлениях.....	121
4.7	Получение уравнения состояния (УС) типа Мамедова–Ахундова для растворов системы (H_2O+TiO_2) при различных температурах и давлениях.....	126
4.8	Применение уравнения типа Тейта для расчета вязкости и плотности электролитов и растворов с эффектами памяти	137
	Выводы к четвертой главе.....	144
	Выводы.....	146
	Список используемых источников информации.....	150
	Приложение.....	168

Основные условные обозначения и сокращения

λ - коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);

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

C_v - изохорная теплоемкость, Дж/(кг·К);

τ - время, с;

T - температура, К;

Q - количество тепла, Дж;

F_o - критерий Фурье;

P - давление, Па;

ΔT - разность температур, К;

Pr - критерий Прандтля;

Gr - критерий Грасгофа;

ρ - плотность, кг/м³;

$t_{a,n-1}$ - коэффициент Стьюдента;

α - доверительная вероятность;

α_p - коэффициент теплового расширения, К;

β_T - изотермическая сжимаемость, 1/Па;

P_i - внутреннее давление, Па;

M - молярная масса, кг/моль;

m - темп регулярного охлаждения, 1/с;

U - напряжение, В;

$\alpha_{\text{луч.}}$ - коэффициент теплоотдачи излучением, Вт/(м²·К);

ε - степень черноты;

ν - коэффициент кинематической вязкости, м²/с;

d - диаметр ядра бикалориметра, м;

G_1 - вес поплавка в воздухе, кг;

G_2 - вес поплавка в исследуемых объектах, кг;

$V_{\text{п}}$ - объем кварцевого поплавка, м³;

$V_{\text{н}}$ - объем манганиновой проволоки, м³;

ВВЕДЕНИЕ

Развитие нанотехнологий, разработка и создание наноматериалов выявило множество новых задач, связанных с их тепловыми свойствами. Открытие и изучение различных объектов наномира: наночастиц, нанопроволок и нанопроволочных сверхрешеток, нанотрубок, фуллерена, а также сложных наноматериалов на их основе (наножидкостей и нанокомпозитов, кластеров и наноагрегатов, «ковриков» из нанотрубок и т.д.) показало множество противоречий при использовании описания их тепловых свойств на базе классических закономерностей. Наконец, создание в последнее время сложных устройств на базе нанообъектов (нанотранзисторов, наноэлектро-механических устройств, нанотермоэлектрических устройств и т.д.) требует серьезного анализа в них тепловых процессов.

Разработка высокоэффективной новой техники, технологии и материалов с заранее заданными свойствами для различных отраслей народного хозяйства, как и в целом для ускорения научно-технического прогресса, невозможно без знания свойств веществ и материалов. Уровень развития промышленности характеризуется не только объемом производства и ассортиментом выпускаемой продукции, но и показателями ее качества. Одним из основных направлений повышения эффективности является улучшение качества используемых материалов и изделий.

Исследование теплофизических (плотность, теплоемкость) и реологических (коэффициент динамической и кинематической вязкости) свойств веществ имеют давнюю историю. В последнее время эти исследования приобрели качественно новый характер. Для совершенствования и оптимизации технологических процессов необходимы научно обоснованные инженерные расчеты, которые нуждаются в информации о теплофизических и термодинамических свойствах рабочих веществ в широком интервале изменения параметров

состояния. Использование недостоверных или даже приближенных данных по свойствам веществ в инженерных расчетах приводит к существенному завышению металлоемкости установок и снижению их технико-экономических показателей. В связи с этим, дальнейшее уточнение теплофизических и реологических свойств рабочих веществ представляет собой значительный резерв совершенствования технологических процессов [1-23].

Сведения о теплофизических и реологических свойствах водных растворов двуокиси титана весьма важны для познания и развития физики жидкого состояния веществ. Они необходимы для выяснения механизма межмолекулярных взаимодействий и моделей структуры растворов, процессов образования и разрушения молекулярных комплексов. С их помощью можно решить проблемы смешиваемости и растворимости, выяснить изменение степени ассоциации компонентов при смешении и др.

Одним из важных теплофизических свойств жидкостей и газов является плотность, которая необходима для калорического расчета процессов и аппаратов и входит в критериальные уравнения теплообмена, отражая особенности термодинамической поверхности. Большое теоретическое значение представляет собой исследование жидкостей, что связано с фундаментальными физико-химическими проблемами.

Актуальность диссертационной работы заключается в том, что исследование теплофизических и реологических свойств воды, как чистого компонента, так и с включением других компонентов, таких как наночастицы диоксида титана позволяет найти наиболее приемлемый вариант их использования в качестве рабочего тела. С целью получения соответственного уравнения состояния по свойствам изучаемых растворов (вода+TiO₂) с переменной концентрацией составных компонентов, температуры и давления необходимы данные по их плотности и вязкости, чему и посвящена настоящая работа.

Цель диссертационной работы: исследовать влияния наночастиц TiO_2 на изменение плотности и вязкости воды в зависимости от температуры, давления и их концентрации.

Достижение цели требовало решить следующие **задачи**:

1. Модернизировать экспериментальные стенды для измерения плотности и вязкости наножидкостей, работающих методом гидростатического взвешивания и капиллярного вискозиметра с выносным капилляром.

2. Получить экспериментальные значения по плотности и коэффициенту динамической вязкости исследуемых веществ в зависимости от температуры и давления.

3. Установить зависимость плотности и динамической вязкости воды + наночастиц TiO_2 (0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3%) при различных температурах (283 – 433 К) и давлениях (0,101 - 49,01 МПа).

4. Получить аппроксимационные зависимости, устанавливающие взаимосвязь плотности, динамической вязкости с температурой, давлением, концентрацией нанонаполнителей и особенностями структуры исследуемых образцов.

5. Произвести расчет термодинамических, калорических и изотермических характеристик системы вода+наночастицы TiO_2 .

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. На созданных и модернизированных аппаратах впервые получены экспериментальные данные по плотности и вязкости системы наножидкостей (вода + наночастицы TiO_2 (0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3%)) в интервале температур (283 – 433)К и давлений (0,101 - 49,01)МПа.

2. На основе экспериментальных данных по плотности, вязкости исследуемых образцов впервые произведена оценка термодинамических, калорических и изотермических характеристик наножидкостей (вода + наночастицы TiO_2 (0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3%)).

3. Интерпретация экспериментальных данных по плотности и вязкости системы (вода + наночастицы TiO_2) в зависимости от температуры, давления и массовой концентрации наночастиц TiO_2 .

4. Впервые для расчета значения плотности и вязкости некоторых наножидкостей системы (вода + наночастицы TiO_2 (0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3%)) в зависимости от температуры и давления использовано уравнение типа Гейта.

5. Получены аппроксимационные зависимости, описывающие плотность и вязкость наножидкостей системы (вода + наночастицы TiO_2 (0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3%)) в зависимости от температуры и давления.

На защиту выносятся:

1. Модернизированные экспериментальные стенды для исследования плотности и вязкости наножидкостей, позволяющих измерять вышеназванные характеристики в широком интервале параметров состояния.

2. Экспериментальные данные по вязкости и плотности исследуемых образцов при $T=(283-433)$ К, $P=(0,101-49,01)$ МПа и различных концентрациях наночастиц TiO_2 (0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3%).

3. Интерпретация экспериментальных данных по плотности и вязкости системы (вода + наночастицы TiO_2) в зависимости от температуры, давления и массовой концентрации наночастиц TiO_2 .

4. Расчетные данные по калорическим, изотермическим свойствам некоторых наножидкостей системы (вода + наночастицы TiO_2 (0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3%)) в зависимости от температуры и давления.

5. Аппроксимационные зависимости и уравнения состояния для расчета плотности и вязкости исследуемых растворов в широком интервале температур (283 – 433) К и давлений (0,101 - 49,01) МПа.

6. Методы расчета калорических и изотермических свойств наножидкостей и механизмов переноса импульса в исследуемых наножидкостях.

Практическая ценность работы:

1. Результаты диссертационной работы являются новыми, базируются на строгих физико-химических утверждениях и экспериментальных исследованиях, которые рекомендуются в качестве расчетного и справочного материала при решении общих задач тепло- и массообмена, а также при разработке принципиально новых и более эффективных технологий создания теплотехнического оборудования. Они могут быть также использованы в образовательном процессе.

2. Дополнен и расширен банк данных теплофизических и термодинамических характеристик системы (вода + наночастицы TiO_2 (0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3%)) в зависимости от температуры и давления, новыми данными.

3. Разработанные экспериментальные стенды могут быть использованы для экспресс определения плотности и вязкости технологических материалов в научных лабораториях.

Внедрение результатов исследования:

- полученные результаты экспериментальных исследований, эмпирических уравнений и уравнение состояния по плотности и термодинамическим свойствам воды и TiO_2 (0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3%) в зависимости от температуры, давления и содержания TiO_2 используется в Институте промышленности Министерства промышленности и новой технологии Республики Таджикистан при расчетах технологических процессов, а экспериментальные данные используются как справочные;

- полученные эмпирические уравнения и уравнение состояния могут использоваться для инженерных расчетов, аспирантами для выполнения диссертационных работ и студентами, магистрантами и докторантами при выполнении курсовых, дипломных работ и диссертаций.

Диссертационная работа выполнена по плану координации научно-исследовательских работ в области естественных и общественных наук НАНТ на 2015 - 2020 годы по теме: «Теплофизические свойства веществ» (госрегистрация №81081175 и №01.86.0103274) по проблеме 1.9.7 - Теплофизика.

Достоверность результатов исследования:

- для экспериментальных работ результаты получены с помощью сертифицированного лабораторного оборудования с привлечением современных физико-химических методов анализа;
- предложенная идея базируется на анализе практики и обобщения проведенных исследований, как автора, так и других исследователей;
- использовано сравнение авторских данных и данных, полученных другими исследователями по рассматриваемой тематике;
- установлена идентичность теоретических результатов и обширных экспериментальных данных, представленных в различных источниках;
- использованы современные методики сбора и обработки данных с привлечением компьютерных программ.

Личный вклад автора состоит в выборе методов и разработке алгоритмов решения поставленных задач при выполнении работы, установлении основных закономерностей, протекающих в теплофизических и термодинамических процессах при получении водных растворов, получении данных по теплофизическим (плотность и вязкость), калорическим, изотермическим свойствам, обработке и анализе полученных результатов, формулировке основных выводов диссертационной работы. Все результаты диссертационной работы получены автором под руководством научных руководителей.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на:

1. Республиканской научно-методической конференции на тему «Проблемы использования инновационных технологий в преподавании естественных наук», Душанбе, (2018);
2. Республиканской научно-методической конференции на тему «Основные проблемы использования инновационной технологии» посвященной на реализацию компетентного подхода в преподавании естественных наук и информационных технологий, Душанбе, (2018).

3. Республиканской научно-методической конференции на тему «Современные проблемы развития естественных и математических наук в Республике Таджикистан», Душанбе, (2019);
4. Международной научно-практической конференции “ Перспективы развития науки и образования ”, Душанбе, (2019);
5. Международной научно-практической конференции “Энергетика Таджикистана: актуальные проблемы и пути их решения”, посвященной 80-летию профессора кафедры электроэнергетики ДФ МЭИ в г. Душанбе, Иноятова М.Б. и 70-летию Шамсиева М.В., приуроченная ко “Дню энергетика”, Душанбе, (2019).

По результатам работы опубликовано 17 статей (из них 7 рекомендуемых ВАК при Президенте РТ) и 10 тезисов докладов.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов, списка использованной литературы и приложений. Работа изложена на 172 страницах машинописного (компьютерного) текста. Она содержит 45 рисунков, 41 таблицы, 190 наименований источников литературы и 28 страниц приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ:

Во введении приведена актуальность направления исследования, в связи с чем представлена цель и, зависящие от нее, задачи работы, показана научная новизна и перечислены основные положения, представленные к защите.

В первой главе приводится литературный обзор и анализ проблем по теме диссертации.

Показано, что полученные экспериментально-теоретические данные по плотности, теплоемкости и коэффициенту теплопроводности наножидкостей используются проектировщиками и инженерами в ходе разработки и конструировании новых механизмов, устройств и машин, там, где требуются качественные и максимально точные расчеты

составных параметров, таких как коэффициент полезного действия, процессы тепло- и массопереноса.

Во второй главе приводятся: описания и схемы экспериментальных стендов, использованных в работе для измерения плотности и вязкости наножидкостей при изменении температуры и давления; методика проведения соответствующих опытов; методика вычисления погрешностей, допущенных во время проведения опытов.

В третьей главе приводятся: результаты соответствующих измерений плотности, вязкости и калорических свойств системы вода и TiO_2 (0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3%) в зависимости от температуры (283–433)К, давления (0,101-49,01)МПа и содержания TiO_2 , а также представлены полученные эмпирические уравнения.

В четвертой главе посвящена, анализу, обработке и обобщению данных, полученных в ходе соответствующих измерений плотности и вязкости исследуемых растворов в зависимости от температуры и давления методом приведенных координат.

В приложении приводится сравнение экспериментальных данных исследуемых веществ, полученных на модернизированных и разработанной установках с расчетными в широкой области изменения параметров состояния.

Диссертационная работа выполнена в научной лаборатории кафедры «Общей физики» Таджикского государственного педагогического университета им. Садриддина Айни.

Глава 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА О СПОСОБАХ И МЕТОДАХ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТОПЛИВ, ОХЛАДИТЕЛЕЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ

Сегодня человечество вступило в эпоху новейших и передовых технологий, техники связанных с великими открытиями, приводящим к более глубокому изучению энергетического устройства мира, наномира и супрамолекулярных процессов. Фуллерен является одним из самых удивительных и ярких примеров среди таковых открытий 20-го века. Хотя издавна было известно, что атомы углерода и титана способны создавать сложные молекулярные структуры (объемные и разветвленные), которые в свою очередь составляют основу практически всей органической химии, открытие способности углерода всего лишь из одного атома образовывать достаточно стабильную каркасную молекулу, для научного мира стало неожиданным. Экспериментально данный факт был подтвержден еще в 1985 году, в ходе которого было доказано, что 60 и более атомов углерода способны создать такую молекулу, причем при естественно протекающих процессах в природе [24]. До этого были авторы, которые высказали свои предположения о стабильности молекул связывая данный факт с замкнутой углеродной сферой. Е. Осава (Япония) еще в 1970 году высказал свои предположения по поводу стабильности молекулы C_{60} , которую он представил в виде усеченного икосаэдра [25], а в 1973 году самыми первыми оказались советские химики Д.А. Бочвар и Е.Г. Галперин [26], которые выполнили квантово - химические расчеты такой гипотетической структуры замкнутого полиэдра C_{60} . По результатам данных расчетов [25,26] было установлено, что подобная структура углерода обладает закрытой электронной оболочкой и действительно должна обладать высокой энергетической стабильностью. Однако эти работы мало кем были известны до момента практически случайного экспериментального

подтверждения данного факта в астрономии (вторя половина 80-х годов) [27].

Таким образом, уже 1990 году физики и химики стали посвящать свои исследования вопросам получения фуллерита, изучению его структуры и свойств, которые оказались в эпицентре внимания научного мира. Это открыло путь к новым возможностям и новым направлениям применения данного вещества в создании различных соединений и структур с уникальными физико-химическими свойствами [28-36].

Среди самых известных модификаций углерода широкое распространение получил графит. Его применяют в производстве карандашных грифелей вплоть до блоков замедления нейтронов в ядерных реакторах [30-33]. Атомы углерода в графитовой структуре занимают очень необычное местоположение, т.е. вследствие соединения атомов углерода образуются кольца шестиугольной формы, которые в свою очередь создают своеобразную сетку, располагаясь во множество слоев. На вершинах этих шестиугольников атомы углерода расположены ровно 0,142нм друг от друга, а ближайшие атомы внутри слоев представляют ковалентную связь между собой, представляя прочную гексагональную сетку.

Известны и другие формы углерода, например, аморфный и белый углерод, карбин и т.д., но они являются лишь смесью совсем небольших частей алмаза и графита, образуя композит. Ранее считалось, что существуют всего лишь два вида расположения углеродных атомов, которые создают кристаллическую форму углерода. Однако на сегодняшний день известно более миллиона разнообразных углеродных соединений с атомами других элементов. Несмотря на это изучение чистого углерода ученые начали не так давно. В результате 20-летнего исследования учеными был открыт новый – третий вид (форма) чистого углерода [24-36].

1.1. Наночастицы оксидов металлов. Структура, свойства и методы их получения

В молекулярной форме углеродом стали широко заниматься уже в 1985 году (открытие C_{60}). Затем были открыты и другие молекулы этого элемента, количество атомов которых в одной молекуле достигал 70, 76 и даже 84 единиц и др. Все эти молекулы представляют некую замкнутую поверхность, где, собственно, и размещаются углеродные атомы [24, 30, 32].

Структурная форма фуллерена представляет шестиугольную фигуру, именно на этих вершинах размещается углеродный атом. Как было установлено, графитовая структура также обладает формой шестиугольника.

Таким образом, утверждения о том, что графит может и должен выступать основным сырьем в производстве как фуллерена, так и других молекул углерода, имеющих замкнутую поверхность, путем его разложения на мелкие фрагменты и последующим формированием требуемого материала [15, 16, 28-41].

Если считать, что молекулу C_{60} образуют графитные частицы, имеющих форму шестиугольника, то радиус молекулы приблизительно соответствует 0,37 нм. С помощью рентгеноструктурного анализа установлен их точный радиус, который соответствует 0,357 нм. Расчет и точные замеры имеют расхождение всего в 2%.

Этим подтверждаются аналогии в структуре графита и фуллереновой молекулы, которая предусматривает скручивание в сферообразную форму шестиугольной сетки графита, часть из которых переходят в пятиугольники. По результатам многочисленных исследований было установлено, что у фуллерита кристаллический порядок очень велик. Молекулы, достигая комнатных температур начинают конденсироваться, при этом создавая плотно-упакованную структуру (гранцентрированная кубическая (ГЦК) и гексогональная),

каждая молекула которой имеет 12 ближайших соединений. Молекулы фуллерена в кристаллической форме фуллерита создают ГЦК - решетку. В связи с тем, что диаметр шестидесятиатомной молекулы графита составляет 0,71 нм, то и размер элементарной ячейки решетки соответственно будет значительным, т.е. каждая сторона куба равна 1,42 нм на расстоянии 1 нм друг от друга. Обычно стороны куба в кристаллах, которые имеют ГЦК-решетку и состоят из атомов составляет не более 0,4 нм на расстоянии 0,3 нм друг от друга [28].

По мере снижения температуры до 250К фуллерит претерпевает фазовое превращение первого рода, в результате которого его ГЦК - решетка перестраивается в обычную кубическую, увеличиваясь в объеме на 1%.

Многообразие углеродных фаз, которые образуются после соответствующих обработок фуллерита C_{60} при давлении и температуре до 10 ГПа и 1800К соответственно в условиях квазигидростатического сжатия, показаны авторами [15,16,35,36] на диаграмме состояния. Плотность кристаллического фуллерита составляет 1,7 г/см³, в то время как плотность графита составляет 2,3 г/см³, а алмаза 3,5 г/см³ [33-36].

Фуллерит не обладает высокой химической активностью. Его молекула остается стабильной в инертной атмосфере аргона даже до $T=1200K$. Однако, в присутствии кислорода и температуры 500К происходит изменение, в результате чего образуется значительное количество углекислого газа. Если длительность процесса составляет более нескольких часов, то ГЦК-решетка фуллерита разрушается до неупорядоченной структуры, где 12 единиц атомов кислорода приходятся на каждую из исходных молекул фуллерита полностью утративших свою форму. При температуре близкой к комнатной процесс окисления выполняется лишь в результате облучения фотонами, обладающих энергией 0,5 - 5 эВ.

Фуллериты хорошо растворимы в неполярных растворителях. Среди них такие как: сероуглерод (CS_2), толуол (C_7H_8), бензол (C_6H_6),

тетрахлорметан (CCl_4), декан ($C_{10}H_{22}$), гексан (C_6H_{14}), пентан (C_5H_{12}) (указаны в порядке убывания растворимости). В твердом состоянии фуллерит представляет собой полупроводник, ширина запрещенной зоны которого составляет 1,5 эВ, что свидетельствует о том, что в результате облучения видимым светом, его электросопротивление уменьшается. Не столько позже было установлено, что кроме фуллерита также и его смеси с различными веществами обладают фотопроводимостью. Так, например, добавление калия или натрия в кристаллические пленки C, повысило их электропроводность в несколько раз [15,16,33-35,40].

Как уже было отмечено, по структуре графит и фуллерен являются близкими друг к другу. Исходя из этого можно говорить о том, что среди способов получения фуллерена наиболее эффективным считается термическое испарение графита либо в результате омического нагрева графитового электрода, либо лазерного облучения. Умеренный нагрев приводит к разрушению связей среди отдельных слоев. Затем из образовавшихся фрагментов, имеющих шестиугольные конфигурации, образуется фуллерен [30-36]. Полученный конденсат кроме кластеров C_{60} и C_{70} , также в своем составе имеет и значительное количество более легких кластеров, из которых подавляющая часть в результате выдержки на протяжении нескольких часов при температуре более $500^\circ C$, либо наоборот при относительно низкой температуре, но в неполярном растворителе переходит в формы C_{60} , C_{70} . Испарением графитового стержня на сегодняшний день предлагают множество способов и методик получения фуллеренов, подробное описание которых дано в [15,16,30,35,36]. Также известны и другие виды сырья для получения фуллерена, например, мезофаза, представленная в форме жидкого кристалла, получаемую пиролизом соединений с содержанием большого количества углерода при $T=370-500^\circ C$. Авторы [15,16,30,36] показали способ получения фуллерена путем пиролиза нафталина при $T=1300K$, а

авторы [30, 36] привели его синтез путем катализа каменноугольной смолы.

1.2. Углеродные нанотрубки и их свойства

Углеродные нанотрубки — это структуры цилиндрической формы, длина которых не более нескольких сантиметров, а диаметр доходит до нескольких десятков нанометров. Структурно эти трубки являются скрученные в трубочку плоскости из графита с несколькими слоями. Концы этих плоскостей заканчиваются полусферой, т.е. половиной фуллереновой молекулы, которую называют головкой [30,36]. Многостенные (multi - walled) нанотрубки бывают значительного разнообразия форм как в поперечном, так и в продольном ее направлении [30, 36,41].

Также науке известны структуры, похожие на вложенные друг в друга цилиндры, либо призмы, или напоминают форму свитка. Однако, несмотря на столь внушительное многообразие форм нанотрубок, характерное расстояние между этими слоями составляет 0,34нм.

Впервые углеродные нанотрубки были обнаружены японским ученым С. Ииджима [42]. Ученый обратил внимание на отходы, откладывающиеся на катоде в опытах при получении молекул C_{60} , C_{70} , в которых и обнаружил образцы, имеющие продолговатую форму с полостью в несколько десятков ангстрем в диаметре [42].

Эти вещества имеют необычные электрические, магнитные и оптические характеристики [43-59]. От того по какой схеме сворачивается в трубку графитная плоскость, зависит что она из себя будет представлять – проводник, полуметалл, полупроводник, либо сверхпроводник.

Этот материал имеет прочную структуру как на растяжение, так и на изгиб. Например, для однослойного представителя этих материалов модуль Юнга равен 1-5 ТПа, что является на порядок больше в отношении стали. Даже при оказании значительных механических

напряжений они не поддаются разрушению, а перестраивают свою структуру [43-45].

Благодаря их уникальным качествам, в том числе и электрическим свойствам, на сегодня в области наноэлектроники они считаются практически основным материалом, на их основе изготавливают нанометровые электронные устройства, которые в свою очередь в перспективе могут выступать в качестве аналогов своим большим по размерам прототипам, применяемых в различных электронных схемах приборов разного назначения и компьютеров.

Кроме того, их широко используют в создании гетероструктур, т.е. металл-полупроводник, образующийся в местах соединения двух разных нанотрубок. Достигают необходимого результата путем создания дефектов в структуре при получении нанотрубок, в следствие замены шестиуголь-ников на пяти и семиугольники. В результате с одной стороны она представляет собой металл, а с другой полупроводник [20-36]. Нанотрубки вместо наконечника (острие) используют в атомно-силовом либо туннельно-сканирующем микроскопе, позволяющего подхватить и переместить атомы и молекулы с подложки.

1.3. Детонационные наноалмазы, структура, свойства и их применение

Основным характерным показателем представителей детонационных наноалмазов (НА) принято считать их внушительно малый размер. На практике доказано, что гексогенотропиловая смесь является самой подходящей в получении наноразмерного алмаза. В процессе детонации подобных взрывчатых веществ температура в среднем достигает около 4000К, а давление растет до 30ГПа. При таких условиях в процентном соотношении реальное количество производимого наноалмаза составляет около 14% [15, 16,60, 61].

Первым шагом в синтезе наноалмаза является получение первой алмазной шихты (АШ). Она в своем составе содержит наноалмаз, графитообразные структуры и примеси, которые считаются

загрязнителями, к которым обычно относят металлы и их различные соединения. Процесс выделения наноалмаза из состава первичной шихты протекает резко, что и является отличительной чертой шихты от других углеродистых материалов. Это связано с пространственной структурой шихты, получаемой по итогам многоразовых агрегаций первоначальных частиц, которые не представляют ни смесь наноалмаза, ни алмазный углерод. Алмазная шихта является высокодисперсной с большим количеством дефектов в структуре и имеет повышенную реакционную способность.

Среди множества методов очистки наноалмаза самым распространенным считается двухступенчатая очистка путем обработки алмазных смесей с применением Ph водными растворами азотной кислоты.

Наноалмазы состоят из трех слоев - ядро размером (4 - 6) нм, которое включает (70 - 90)% атомов углерода; промежуточный слой вокруг, который включает рентгеноаморфные структуры углерода толщиной (0,4 - 1,0) нм и имеет (10 - 30)% атомов углерода; поверхностный слой, который включает еще и гетероатомы (N,O,H). Атомы азота равномерно распределены по всем слоям (2,5 масс.%) [15, 16,60, 61].

Наноалмаз практически не поддается окислению и считается инертным материалом. Однако при долгом воздействии сильных кислот, либо кислотных смесей (HNO_3 , H_2SO_4 , HCl) получают активный наноалмаз.

У очищенного наноалмаза переходный слой неоднородный, т.е. с внутренней поверхности представляет собой слой углерода в виде луковиц «Onion Like Carbon (OLC)», которые созданы группами из шести атомов (гексагонов). Также и промежуточный слой состоит из графитовых монослоев, получаемых в периферийных частях. Но даже зная эти важные тонкости, полная информации об этих слоях отсутствует.

Сложность структуры промежуточного слоя скорее всего заключается в том, что в процессе синтеза алмаза перестройка углеродной частицы в алмазную остается не завершённой и его структура образуется за счёт хаотических комбинаций разнородных паразитов, которые выделяются из наноалмаза в результате его экстракции либо термодесорбции, что наряду с его высокой активностью является одной из причин, приводящей к сложностям в прогнозировании поведения детонационного наноалмаза [60, 61].

Наноалмазы, в составе материалов считаются структурообразователями, приводящими к росту прочности композита.

В перспективе значительное применение наноалмаза может пасть на долю производства полимер - алмазных композитов, катализаторов, которые будут способны переносить заряд, а также модифицированных биологически стойких бетонов.

Авторы [37] отмечают, что в композите ПС+С₆₀ увеличение процентного содержания С₆₀ до 30% приводит к уменьшению температуры стеклования в пределах 15 градусов. В работах [60-64] авторы привели результаты изучения системы полиметилметакрилат (ПММА)+С₆₀, полиэтилен, поливиниловый спирт, полиамид - 6, полистирол, полиметилметакрилат, синтетический каучук СКИ - 3, блоксополимер, в которых с изменением содержания фуллерена наблюдаются структурные изменения, возрастают упругопрочностные характеристики, проявляются даже и триботехнические качества. Анализ литературы показывает, что и структура, и физические свойства полимерных композитов при нанометровых размерах изучены мало, и потенциальные сферы их использования установлены в недостаточном объёме.

Наножидкостями принято считать суспензии, состоящие из наноразмерных частиц твердой фазы, размеры которых обычно составляют от 1 до 100нм и жидкой составляющей (вода, гликоль и

масло). Дисперсная фаза в составе жидкой составляющей раствора становится следствием повышения теплопроводности, интенсификации конвективного теплообмена относительно обычных жидкостей, что позволяет считать их самыми эффективными «Охлаждающими средами будущего». В последнее время наножидкости были исследованы для количественной оценки эффективности теплообмена, массообмена, чтобы определить конкретные механизмы их диффузии (транспорта) и механизмы создания критических параметров с целью разработки конкретных методов их производства, возможностью управления и измерения.

Результаты опытов, которые приведены в доступной литературе по теплофизическим и транспортным свойствам подобных жидкостей, в большей своей степени направлены на изучение процессов теплопередачи, которые обычно охватывают температуры в окрестностях температуры окружающей среды. В связи с этим возникает необходимость в дополнительных данных по вязкости и падению давления, достоверность которых закреплена экспериментально. Эти данные требуются для того, чтобы можно было получить возможность доступа к характеристикам используемых в качестве теплоносителей наножидкостей для соответствующей оценке их способностей работать и при умеренно низких температурах (между температурой плавления льда и температурой окружающей среды) [145, 146]. Работы [15, 16] посвящены исследованию теплопроводности и динамической вязкости наножидкостей (этиленгликоль+ нанодисперсный Al_2O_3 концентрацией (1 - 3)%) при температурах от 0 до 50°C. Эти наночастицы имеют повышенную склонность к агрегации в кластеры со средним размером около 105 нм, измеряемого при помощи системы дистанционного обучения (СДО) аппарата Malvern Zetasizer Nano ZS, что является в 10 раз больше или меньше заявленного среднего размера диспергированных наночастиц. Теплопроводность экспериментально была исследована на приборе для горячего переходного диска TPS 2500S, который был

инструментирован с 7577 зондом (2,001 мм в радиусе) максимальной погрешностью в пределах: $\pm 5,0\%$. Вращающимся дисковым реометром «Хааке Марс II» были исследованы реологические свойства и динамическая вязкость. Прибор инструментирован двойным конусом зонда (60 мм в диаметре), погрешность которого составляет ($k=2$) в пределах: $\pm 5,0\%$. Al_2O_3 с этиленгликолем представляет собой нанодисперсию, которая показывает тепловое соотношение, улучшающее проводимость (9 - 29)%, которая увеличивается с объемной долей и температурой наночастиц. Al_2O_3 этиленгликоль - это нанодисперсия, проявляющая ньютоновское поведение во всех диапазонах температуры с наночастицами объемной доли.

Результаты экспериментов, также сравнивались и проведенными ранее другими исследователями экспериментов и с результатами расчетных исследований. Например, корреляция Максвелла (теплопроводность) и формулы Эйнштейна (динамическая вязкость) [15, 16].

В последние годы наметился значительный прогресс в области нанотехнологий. И весьма разнообразны способы получения наночастиц металлов [8]. Одним из наиболее эффективных методов является метод консолидации инертного газа (IGC). Принцип данного метода заключается в испарении металла в камере охлаждения, заполненной инертным газом с относительно малой плотностью. Благодаря конвективной диффузии металлический пар перетекает от теплового источника к охладителю. По причине снижения температуры и быстрого падения равновесного давления пара происходит перенасыщение, что в свою очередь является причиной быстрого появления кластеров и их роста, которые постепенно доходят до стенок камеры и депозитируют на них. Авторы [8] исследовали формирование металлических нанокластеров «снизу-вверх» многомасштабным методом моделирования с помощью информационно-вычислительных

технологий, который состоит из квантово-механических расчетов межчастичных сил, молекулярной динамики атомной структуры и из моделирования турбулентнообразного перемешивания с формированием кристаллического ядра, быстро растущее в результате коагуляции и коалесценции. Таким образом, можно выявить ассоциацию среди разных физических свойств и процессов образования наночастиц. Для исследования условий, при которых образование нанопорошков металлов возможно, необходимы знания их размеров и структуры. Компьютерное моделирование применяют для определения фундаментальных основ наносистем, например, металлических наночастиц, чтобы в дальнейшем самостоятельно их собирать, а также получать знания о возможности контроля этих сборок с возможностью реального дальнейшего контроля любого процесса сборки.

В работах [15,16,65] приводятся результаты экспериментального исследования наночастиц и их использования для определения тепловых свойств углеродных нанотрубок. Массивы углеродных нанотрубок, которые были выровнены в вертикальном положении, обладают наиболее низким коэффициентом отражения любого материала в дальнем, а также в видимом инфракрасном (ИК) диапазоне (от 50 мкм и более). Это его свойство позволяет получать другие источники и детекторы для видимого и инфракрасного излучения. Однако, в этом направлении все же остаются не решенные вопросы.

В работе [4, 65] предложены в качестве потенциальной энергии, а точнее - энергии с возобновляемыми источниками - для их использования вместо традиционных растворителей, поскольку из-за очень низкого давления паров они нуждаются в дополнительной энергии. Они являются солью, которые при малых температурах (менее 100 градусов по Цельсию) находятся в жидком состоянии, считаются относительно идеальными в будущем для различных целей химического катализа, процессов отделения, электрохимии, в том числе и теплоносителей в солнечной водонагревательной установке.

Представленные данные теплофизических термодинамических и электрохимических свойств аналогичных веществ требуют точности. Авторами [66, 67] представлен широкий спектр анализа литературных данных ионных жидкостей за 7 лет начиная с 2002 года по p - ρ - T данным и соответственный результат при высоких значениях давления, плотности и температуры и одни из последних исследований при $T = (283,15 - 413,15)\text{K}$, $p = (0,101 - 140)\text{Мпа}$, полученных с помощью нового прибора Anton-Paar DMA НРМ вибрирующей трубки денситометра с экспериментальной неопределенностью $\Delta\rho/\rho = \pm (0,01 - 0,08)\%$. Приведены результаты плотности, по сравнению с имеющимися в литературе. У ионной жидкости (ила) плотность в условиях атмосферного давления и $T = (283,15 - 363,15)\text{K}$ также измеряется с использованием Anton - Paar DMA 5000 вибрирующей трубки денситометра. Уравнение состояния для выбора (p - ρ - T) значений были созданы с учетом влияния температуры и давления для вычисления тепловых характеристик ионных жидкостей, таких как изотермическая сжимаемость, изобарическая тепловая расширяемость, различия в изобарной и изохорной теплоемкостях, коэффициент теплового и внутреннего давления.

С начала 19-го века по сегодняшний день существуют проблемы гидродинамического граничного условия высокомолекулярных соединений (ВС), имеющие большое значение в области науки и техники. Начиная с этого момента подавляющее число исследователей делали не однократные попытки сформулировать общий закон ВС в точке «флюид - твердое тело» [15,16,66].

Автор работы [66] привел способ коэффициента межфазного трения, возникающего между твердой и жидкой фазами, которые составляют ВС, используя метод метана и расхода воды в углеродных нанотрубках с диаметром полости разного размера. Моделированием равновесной молекулярной динамики *equilibrium molecular dynamics* (EMD) сперва

определяют трение между твердой и жидкой фазами. Длину скольжения определяют отношением сдвиговой вязкости жидкости к коэффициенту трения. Длина скольжения представляет собой меру усиления потока, которая в свою очередь определяется наблюдаемой скоростью, либо моделированием, либо экспериментально [15, 16]. Затем авторы [15, 16] использовали прямое моделирование динамики молекулярных неравновесных систем *not equilibrium molecular dynamics* (NEMD), для определения длины скольжения скорости потоковой передачи, которые были определены путем моделирования (модель течения Пуазейля). Представленные модели авторов [15, 16], которые предсказывали эти процессы, показали удовлетворительное совпадение с результатами NEMD моделирования, т.е. настоящей моделью можно рассчитать внутреннее трение жидкости с дисперсионной фазой в ней. Для установления минимальной либо предельной длины проскальзывания твердого материала и жидкости зачастую применяют данную модель. С помощью NEMD напрямую измерить этот показатель очень сложно. Применение EMD в случае с водой, заточенной в углеродных нанотрубках, является более рентабельным относительно методов NEMD, поскольку этот метод в измерении длины проскальзывания допускает значительно больше статистических ошибок. Представленный метод можно считать универсальным, обладающим высокой надежностью, который можно применять для нахождения ВС с большой точностью.

Авторы работ [15,16,67] представили результаты экспериментального исследования коэффициента теплопроводности наножидкости диоксида циркония (ZrO_2) и диоксида титана (TiO_2) с массовыми концентрациями 3%, и математическое моделирование. Данная статья [15] посвящена характеристике водной основы наножидкостей, в составе которых имеются наночастицы оксида цинка (ZnO) с изменением концентраций в составе $n = (0,1 - 5,0)\%$. Выбор малых концентраций основан на том, чтобы по максимальной

возможности уменьшить степень загрязнения и соответственного падения давления. Сперва стабильность исследуемых веществ была проанализирована на приборе Zetasizer Nano ZN (Malvern), который работает на принципах динамического рассеяния света Dynamic Light Scattering (DLS), измерения среднего диаметра наночастицы и значения дзета-потенциала. Дополнительно был проанализирован уровень pH наножидкости, а затем измерена ее теплопроводность и динамическая вязкость, после чего был выполнен анализ температурной и концентрационной зависимости. Методом горячего диска на устройстве ТПС 2500 S была экспериментально исследована теплопроводность. Температура опыта составляла от 10 до 70°C, при которой также проводилось измерение вязкости. Исследование вязкости проводилось магнитной подвеской AR-G2 реометра (TA Instruments). После этого в специально предназначенном устройстве уже была измерена теплопередача исследуемых наножидкостей при температуре окружающей среды. Для этого был использован метод горизонтальной трубы с равномерно распределенным тепловым потоком вдоль нее, внутри которой с заданной скоростью протекает исследуемая жидкость. Оценка теплопередачи выполнялась как при ламинарном, так и при турбулентном течении жидкости [15, 16]. Числа Рейнольдса и Нуссельта были определены с помощью ранее измеренных коэффициентов теплопроводности и вязкости.

В работе [68] приведены результаты влияния (ZnO) на изменение магнитных суспензий AR - G2 при некоторых изменениях температуры.

Автор отмечает влияние pH дзета-потенциала на порядок распределения частиц в зависимости от их размера, на реологические свойства, на вязкость системы, от которых зависит стабильность изучаемых веществ в целом. Исследованию процессов теплообмена посвящено множество работ, согласно которым около изоэлектрической точки (ИЭТ) наблюдается рост теплопроводности (ТС) (>20%),

содержащей 3% мас. диоксида циркония (ZrO_2) и диоксида титана (TiO_2). Автор [70] в своей работе представил экспериментальные данные, которые также подтверждают влияния рН значения на стабильность наножидкостей. Теория Дерягина - Ландау - Феембаха - Овербека (ДЛФО) гласит о том, что, когда рН становится равным либо близким по значению к инфракрасным полосам в области (ИПО), наночастицы становятся нестабильными и коагулируют, т.е. образуют кластеры и соответственно выпадают в осадок. Благодаря сильной атомно - силовой среды наночастиц, образовавшиеся кластеры скапливают внутри себя большое количество жидкости, за счет чего их объемная доля возрастает. Такие кластеры являются не являются сферообразными, а имеют нерегулярную структуру в виде цепочек и т.п., с помощью которой и совершается теплоперенос, создавая долгую связь. Понимание рН эффектов дает возможность понять и определить фундаментальный характер поведения наножидкостей [15, 16].

Чтобы повисит качество теплофизических характеристик границы используют частицы проводящих микро- и наночастиц в жидких полимерах, которые известны как тепловые интерфейсные наноматериалы (ТИНМ). Так, например, в роли основной жидкости в таких системах может быть использовано кремний-органическое масло либо этиленгликоль, в которых применяют частицы Al, Cu, Ag, Ti.

Как уже было выше сказано, с целью повышения контактной теплопроводимости возможно применение углеродных нановолокон как и углеродные нанотрубки. Однако, несмотря на широкое свое распространение, существуют сильные отличия в экспериментальных данных по термическому контактному сопротивлению, полученными в свое время разными учеными и исследователями. По-видимому, такое расхождение связано с применением различных технологий получения подобных структур и геометрической составляющей данных частиц. Технология и методика получения материалов сильно влияют на характеристики получаемых материалов, например, на плотность, на

образующиеся в них внутренние дефекты, на характер межчастичных контактов наноструктур, а также, в результате повышенного фононного рассеяния, на контактные характеристики нанотрубок и нановолокон с подложками на уровне наноразмера.

В работе [10] приводятся результаты диаграммы состояния жидкого фуллерена с размерами молекул (0,1 - 1) нм, а размеры наночастиц соответственно равны (1 - 100) нм. Диаграммы состояния составлены для фуллеренов C_{60} , C_{70} .

В работе [69] изучены методы синтеза полифункциональных производных фуллерена C_{60} , содержащих различные функциональные и фармакофорные группы. К ним относятся фрагменты нитрооксидных, алкильных и др. групп [70, 71].

Авторы [72] воспользовались эластомером СКИ-3 ГЩСЕ 14925 - 79 с молекулярной массой $M = 9.105$. Испытания на механическую и тепловую устойчивость проводили параллельно с рентгенографированием образцов на установках ДРОН -3 и КРМ - 1, для чего применяли медное излучение и фильтрацию никелем. Дотирование фуллереновых проб C_{60} производили методом набухания эластомера в насыщенном растворе C_{60} в CCl_4 при $20^\circ C$ с изменением его концентрации от $C = (0 - 2,5 \cdot 10^{-2})$ масс. %.

В работе [74] приводятся результаты экспериментального исследования повышения энергетической эффективности органических и гибридных солнечных элементов на основе фуллерена C_{60} в качестве акцепторной компоненты, которая может быть достигнута созданием объемно распределительного гетероперехода. В результате перемещения донор-акцепторных компонентов значительно повышается его площадь. Полученные автором [10] результаты свидетельствуют об эффективности термического отжига для повышения плотности тока короткого замыкания фотовольтаических ячеек на основе объемно-распределенного гетероперехода $CuPe$.

В работе [10] приводятся результаты исследования свойств нанокомпозитных пленок, которые представляют собой важную задачу современного материаловедения, так как служат базой для создания новых материалов с заданными электронными и оптическими свойствами. В данной работе приведены результаты изучения электрических и оптических свойств пленок C₆₀-Ti. Пленки с разными долевыми отношениями числа атомов титана к числу молекул фуллерена получили термическим испарением из двух испарителей и конденсацией в вакууме на кремниевых подложках, покрытых подстилающим слоем окисла, при остаточном давлении воздуха 2·10⁻⁴Па. Различие долевого соотношений атомов металла и молекул фуллерена в зону формирования пленок, в свою очередь, достигалось изменением места расположения подложки относительно испарителей.

В работе [74] проведены экспериментальные и теоретические исследования взаимодействия атомов металлов Ti, Fe, Cu, Sn, In, Bi с фуллеренами C₆₀. Пленки образцов фуллеритов с металлами Ti, Fe, Cu толщиной (1 - 2) мкм получены совместным вакуумным испарением и последующей конденсацией на пленке монокристаллического кремния Si(100), образцы с Sn, In, Bi наносились на подложки слоями: Sn-C₆₀ (dSn=600 нм, dC₆₀=1200 нм), In-C₆₀ (dIn= (5 - 10) нм, dC₆₀=1000 нм), Bi-C₆₀ (dBi= (5 - 10) нм, dC₆₀=1000 нм). Для термической активации взаимодействия молекул C₆₀ с атомами металлов, а также диффузии атомов Sn, In, Bi в структуру пленки с In, Bi, отжигались при T = 373К, для пленки с Sn температура отжига составляла T = 473К.

В работе [76] авторами изучены аморфные полимеры с содержанием фуллерена (полистирол (ПС), полиметилметакрилат (ПММА) и кристаллизующийся полиэтилен с высокой и низкой плотностью, изоактический полипропилен (ИПП)). Исследование тепловых свойств полученных композиционных материалов было выполнено на приборе фирмы Netzsch DSCF – 204, так называемом термоанализаторе. Исследования

позволили установить, что кристаллосольваты получают лишь в полимерах, способных кристаллизоваться, получаемых, обычно, в растворителях бромбензолов. В аморфных полимерах не наблюдается их образование, что объясняется отсутствием кристаллических агрегатов.

Целью данной работы [75] является установление закономерностей ингибирования радикально цепного окисления бензилового спирта галогенопроизводными фуллеренами. Ингибирующее действие фуллеренов C_{60} , $C_{60} F_{36}$, $C_{60} F_{48}$, $C_{60} C_{16}$ были тщательно исследованы в реакции окисления бензилового спирта. Бензиловый спирт, содержащий 50 об.% хлорбензола и $1,83 \cdot 10^{-2}$ моль/л инициатор - 2,2-азо-бис-изобутиронитрила, окислялся при температуре $50^\circ C$. Бензиловый спирт марки «ч» очищали путем перегонки через колонку с активированным оксидом алюминия и углем. Затем выполнялась дистилляция при вакууме в атмосфере аргона.

В работе [77] авторы модифицировали полистирол (ПС) фуллеренами и изучали диэлектрические и сорбционные свойства полученных композитов. Фуллеренсодержащие полистирольные пленочные композиты получали путем растворения навески полистирола в растворе фуллерена в ксилоле с заданной концентрацией C_{60} . Далее полимерные растворы выливали на стеклянную подложку и высушивали при комнатной температуре до полного удаления растворителя. Содержание C_{60} в композите варьировали (0,01 - 0,1) масс.%. В связи с перспективами использования фуллерита C_{60} в различных областях микро - и оптоэлектроники особый интерес представляет получение и исследование новых типов гетероструктур на его основе, как с органическими, так и неорганическими полупроводниками. За последние десятилетия огромные успехи были достигнуты в области органических солнечных элементов на основе планарных и объемных (композитных) гетеропереходов с использованием фуллерита C_{60} [78]. Среди неорганических полупроводников наиболее изученными являются гетеропереходы фуллерита C_{60} с кремнием [78]. Однако в литературе

практически отсутствуют сведения об исследовании гетеропереходов, образованных фуллеритом C_{60} с другими неорганическими полупроводниками. В работе [79] сообщается о получении и исследовании электрических и фотоэлектрических свойств гетеропереходов фуллерита C_{60} моноселинидами галлия (GaSe) и индия (InSe), которые являются представителями широкого класса полупроводниковых слоистых соединений AIIIВVI. На противоположную поверхность пластинок методом вакуумной сублимации наносили пленки фуллерита C_{60} толщиной (0,2 - 0,5) мкм. На поверхность фуллерита C_{60} напыляли полупрозрачные слои алюминия в форме дисков площадью $1,77 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2$.

В работе [80] авторы экспериментально обнаружили значительное усиление в спектре комбинационного рассеяния (КР) фуллерита C_{60} полосы $Ag(2)$ и ее низкочастотное смещение ($1469 - 1461$) см^{-1} при взаимодействии фуллерита C_{60} с тонкой пленкой Sn [81]. В конечном итоге коллективные свойства (КС) в макромолекулах и конденсированных средах связаны с кооперативными свойствами большинства элементарных возбуждений (колебательных, электронных) и сильным колебательно - электронным взаимодействием (нарушение адиабатического приближения). В этих условиях более полная характеристика коллективных свойств неразрывно связана с детальным анализом совокупности колебательных мод, включая расщепления их частот и изменение интенсивностей колебательных полос. Последние характеризуют изменения электронных поляризуемостей и распределения зарядов. В частности, очень сильно возрастают интенсивности полос неактивных в C_{60} мод. В связи с этим, комплексы металлов с фуллеритами проявляют каталитические свойства.

В работе [82] рассмотрен вопрос армирования фуллерита C_{60} полиэтиленоксидом и обработанным в кислоте МУНТ, за счет чего модуль упругости полученного композиционного материала повысился, не

оказав значительного влияния на кристаллизацию. Термоустойчивость его также увеличивается.

В работе авторов Пушкарчук А.Л. и др. [13] приводятся результаты компьютерного моделирования электронных и спиновых свойств комплекса $C_{60}(FeCr_2)_2$ и их обсуждение. В связи с этим в данной работе в рамках функционала электронной плотности (ФЭП) проводились сравнительные расчеты для $C_{60}(FeCr_2)_2$ в различных спиновых состояниях - синглетом, когда спиновой момент системы $S = 0$ и триплетном, когда $S = 1$. Для проведения таких расчетов с помощью программного пакета ArgusLab [13] проводилась генерация наборов стартовых структур, моделирующих атомарное строение комплексов фуллерена $FeCr_2 - C_{60}(FeCr_2)_2$.

Куш С.Д., Куюнко Н.С. в своей работе [83] рассмотрели результаты разложения фуллерена C_{60} . Разделение смеси фуллеренов на индивидуальные фуллерены по-прежнему представляется важной задачей в их производстве. Широко используемая для этого в лабораторной практике жидкостная хроматография требует большого количества неподвижной и подвижной фаз - плохо масштабируется. Обычно применяемые неподвижные фазы адсорбируют фуллерен C_{60} , и высшие фуллерены прочнее, чем C_{60} , что снижает их выход [84, 85].

Из литературного обзора стало ясно, что влияние диоксида титана на изменение плотности и вязкости воды не изучено.

Выводы по первой главе

1. Приведен обзор и анализ литературных данных по свойствам, структуре, получению, применению фуллеренов (C_{60}, C_{70}, C_{84}), металлических оксидов и углеродных нанотрубок. Также были приведены и проанализированы методы получения наночастиц. Представлены структуры, размеры углеродных одностенных нанотрубок и их параметры, характеризующие теплофизические и физико-химические свойства.

2. Рассмотрен процесс детонации наноалмазов, их структуры и применение. Показано, что введение наноалмаза в композиционные материалы меняет структурообразование материалов. Также показаны причины изменения плотности и вязкости растворителей. Представлены результаты экспериментального исследования плотности и динамической вязкости наножидкостей системы вода и диоксид титан с массовой концентрацией до 3%.

3. Показано, что полученные экспериментально-теоретические данные по плотности, теплоемкости и коэффициенту теплопроводности наножидкостей используются проектировщиками и инженерами в ходе разработки и конструировании новых механизмов, устройств и машин, там, где требуются качественные и максимально точные расчеты составных параметров, таких как коэффициент полезного действия, процессы тепло- и массопереноса и т.д.

4. На основе обзора и анализа научно - технической и патенто – лицензионной литературы была поставлена цель и сформулированы задачи исследования.

Глава 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЯ ПЛОТНОСТИ И ВЯЗКОСТИ НАНОЖИДКОСТЕЙ

2.1. Экспериментальная установка для определения плотности жидкостей и растворов при атмосферном давлении. Методика измерения плотности жидкостей, растворов (наножидкостей) при атмосферном давлении

Большая численность уравнений состояния, позволяют определять взаимосвязь плотности от температуры лишь для конкретной категории жидкостей. Достигнутые на сегодня результаты в составлении уравнений состояния, полученные теоретические аспекты не могут удовлетворить сопоставляемые требования. В связи с этим эксперимент является единственным способом для получения достоверной информации и ответом на соответствующие вопросы. Такой вывод напрашивается исходя из того, что практически все предлагаемые уравнения состояния обычно охватывают конкретную узкую область состояния жидкостей и растворов. На деле применение подобных уравнений требует определения большого количества коэффициентов, входящих в состав подобных уравнений.

Точность исследования p - ρ - T -зависимостей также является важным и для теоретических исследований калорических свойств жидких веществ [1-3,75,86,88,89,90-93]. Существуют три основные группы методов, применяемых для экспериментального исследования p - ρ - T -зависимостей жидкостей и паров:

- метод, который предусматривает исследование с изменяющимся объемом жидкости при постоянстве ее весового количества;

- методы, которые включают гидростатическое взвешивание и др.

Подробное описание методов, их преимущества и недостатки приведены в работах [1-3,21, 86-89, 120].

Для достижения поставленной цели исследования мы не руководствовались созданием какого-либо нового метода, мы воспользовались

хорошо отработанными и известными методиками. Путем модернизирования и введения необходимых конструктивных изменений в соответствующие установки, позволяющих учитывать специфические качества исследуемых нами образцов, мы провели соответственные эксперименты.

В связи с поставленной целью, было необходимо обеспечить значительное изменение температуры и давления опыта, включая жидкое и двухфазное состояние, а также с охватом области вблизи нижней пограничной. Учитывая сказанное, для исследования плотности образцов, мы остановили свой выбор на методе гидростатического взвешивания, который является совместной разработкой профессора Гусейнова К.Д. и профессора Голубева И. Ф. [1,86, 88, 89].

На рисунке 2.1.1 показана схема экспериментальной установки для измерения плотности жидких веществ при атмосферном давлении.

Опытное исследование образцов заключалось в применении поплавка на основе кварца (5) (см. рисунок 2.1.1), а также аналитических весов (6). Поплавковую камеру (4) наполняют изучаемым веществом, а сам поплавок подвешивают непосредственно над камерой, а сама камера устанавливается внутри термостата (1) с термостатирующей жидкостью. Поплавковая подвеска (7) изготовлена из манганиновой проволоки. Термостат оснащен мешалкой для равномерного распределения температуры во всем объеме термостатирующей жидкости и нагревателем в виде змеевика, по которому протекает греющая среда (в нашем случае вода) для нагрева жидкости. Температура во время эксперимента регулировалась при помощи ртутного термометра (9), цена деления которого составляла $0,1^{\circ}\text{C}$. Погрешность измерения оценивалась в $\pm 0,02^{\circ}\text{C}$. Тарировка опытного устройства была выполнена путем контрольных измерений воды и толуола, принятых за эталон.

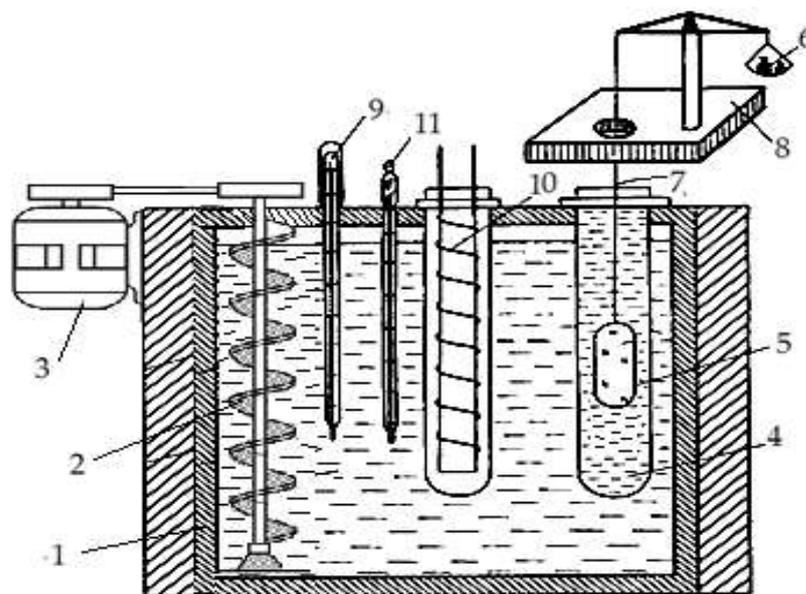


Рисунок 2.1.1 - Схема экспериментальной установки для измерения плотности жидких веществ при атмосферном давлении: 1 - термостат; 2 - мешалка; 3 - электродвигатель; 4 - камера с опытным веществом из химически нейтрального материала (НС - 2); 5 - поплавков из химически нейтрального материала (НС - 2); 6 – уравнивающие разновесы; 7 - манганиновая проволока; 8 - аналитические весы; 9 -ртутный термометр; 10 - нагреватель; 11 - контактный термометр.

Выражение:

$$\rho = \frac{G_1 - (G_1 - G_2)}{V_{II} - V_H}, \quad (2.1.1)$$

Используется для расчета плотности образцов, в котором ρ - плотность изучаемых веществ при заданной температуре, кг/м^3 ; G_1 , G_2 - вес поплавка в воздухе и в исследуемых образцах соответственно; V_{II} , V_H - соответственно объем кварцевого поплавка и манганиновой проволоки.

До проведения опытов предварительно определяется масса поплавка (5) и манганиновой проволоки (7) (рисунок 2.1.1), для чего применяют аналитические весы ВЛА-200 (8). Замеры сначала были выполнены на воздухе с поплавком внутри пробирки (4) G_2 . Затем взвешивание повторяется уже с заполненной системой водой дистиллированной. Процедуру взвешивания G_1 повторяем после заполнения пробирки

дистиллированной водой и ее плотность определяем по выражению (2.1). Затем, выполняется нагрев системы до 50°C с помощью термостата и уже после установившегося стационарного режима повторно определяется G_1 . После снятия показаний выполняется расчет плотности дистиллированной воды, принятой за эталон при заданной температуре опыта. В том же порядке эксперимент проводится до температуры кипения (~ 90°C) с интервалом в 5 градусов. При каждой заданной температуре взвешивание системы проводится не менее 3-х раз с дальнейшим определением среднего значения, по которому рассчитывается плотность воды при заданной температуре. После того как сравнение полученных результатов измерений с литературными данными дало удовлетворительный результат, мы начали выполнять свои исследования. Порядок проведения опыта соответствует тому, по которому выполнялись эксперименты с контрольными образцами. С помощью данного прибора можно изменять температуру. Кроме того, мы подробно вычислили и погрешность опытов в относительной форме. По результатам расчетов было установлено, что погрешность опытов при $\alpha=0,95$ составила 0,1%.

В таблица 2.1.1 приводятся результаты по плотности контрольного образца (вода).

Таблица 2.1.1. - Результаты сравнения контрольных измерений плотности воды при давлении атмосферного воздуха и изменении температуры опыта со справочными данными.

T, K	293	303	313	323	333	353
$\rho_{\text{лит.}}, \text{кг/м}^3$	998,2	995,7	992,2	988,1	991,4	971,8
$\rho_{\text{конт.}}, \text{кг/м}^3$	997,4	996,3	991,7	987,4	990,3	970,7
$\Delta, \%$	0,08	-0,06	0,05	0,07	0,11	0,12
$\Delta_{\text{ср}}, \%$	0,37					

Также, в качестве дополнительных контрольных измерений были проведены опыты на данной установке с н-гексаном. Сравнение результатов опытов с литературными данными [1,95-99,100,101] также показали удовлетворительный результат (в пределах $\pm 1,2\%$).

2.2. Экспериментальная установка для исследования динамической вязкости растворов

Для изучения в опытных условиях динамической вязкости водных растворов и наножидкостей (кислородосодержащие жидкости + углеродные нанотрубки), (азотосодержащие жидкости + наночастицы), электролитов с добавками, мы собрали экспериментальное устройство. Зона повышенной температуры снабжена капилляром, а низкотемпературная зона стеклянным ртутным вискозиметром. Опыты на этой установке можно выполнять с изменением температуры и при давлениях до 100 МПа.

В работах [97,98] профессор Голубев И.Ф. предложил установку для исследования вязкости жидких веществ. Предложенное им устройство содержало U-образный жидкостной манометр. Мы в своих исследованиях также воспользовались данной установкой, однако вместо предложенной ранней версии устройства системы измерения давления, мы применили пережимной сосуд высокого давления путем замены предыдущей системы. В версии, представленной Голубевым И.Ф. вискозиметр капиллярного типа был установлен внутри автоклава, а в нашей вариации мы предложили вынос этого капилляра наружу, что обеспечило проведение опытов при более высоких температурах. Во избежание коррозии внутренняя поверхность полости автоклава была хромирована. Как известно, коррозионная стойкость материала способствует обеспечению чистоты материала. К тому же вынос капилляра наружу способствует упрощению измерения времени, за которое жидкость протекает через капилляр.

Экспериментальная установка (рисунок 2.3.1) включает прибор вискозиметра, систему создания и измерения температуры опыта, термостатирующую систему, систему создания давления его поддержания и соответственно измерения, систему измерения времени в автоматическом режиме, а также пережимной сосуд.

2.3. Вискозиметр высокого давления с выносным капилляром

Вискозиметрический прибор представляет собой вискозиметр стеклянный (13), который установлен в сосуде высокого давления (нержавеющая сталь марки 10X18H10T) для вискозиметра (рисунок 2.3.1), рабочее давление которого составляет до 100 МПа.

Схематическое изображение указанного сосуда (автоклав) высокого давления приведено на рисунке 2.3.2. Для того, чтобы добиться равномерности температуры опыта и ее постоянства, на этот сосуд устанавливается медный цилиндрический блок путем горячей посадки. Диаметр блока составляет 90мм, длина 260 мм (1), по которой высверлены два отверстия, служащие для установления термометра (2) и термопары (3). Верхняя часть вискозиметрического сосуда снабжена конусным уплотнением (4), нижняя снабжена штуцером (5), необходимого для обеспечения соединения к нему пережимного сосуда (16) для создания необходимого давления опыта в приборе, которым была оснащена установка вместо U-образного манометра, используемого в предшествующей установке для создания, изменения и измерения давления опыта. В представленном устройстве вместо ртути нами был использован глицерин.

Чтобы в процессе опыта исключить контакт (смешения) опытного вещества с глицерином, нами был в систему дополнительно включен полиэтиленовый мешочек (17), служащий в качестве разделителя. Такое конструктивное решение позволило обеспечить чистоту опытных веществ в ходе эксперимента. Применение нажимной гайки (12) позволило надежно уплотнить крестовину (11) с сосудом высокого давления. Крестовина размещена на стойке (14), имеющей полюса, которая также имеет стопорное устройство для того, чтобы можно было обеспечить строго вертикальное положение сосуда. Крестовина сверху снабжено электровводом высокого давления (10), выводящий три

проводника из нихромовой проволоки, которые в свою очередь изолированы с помощью кварцевой нити. Эти проводники необходимы для создания вискозиметру соответствующих контактов с электронносчетным частотомером Ф 5041.

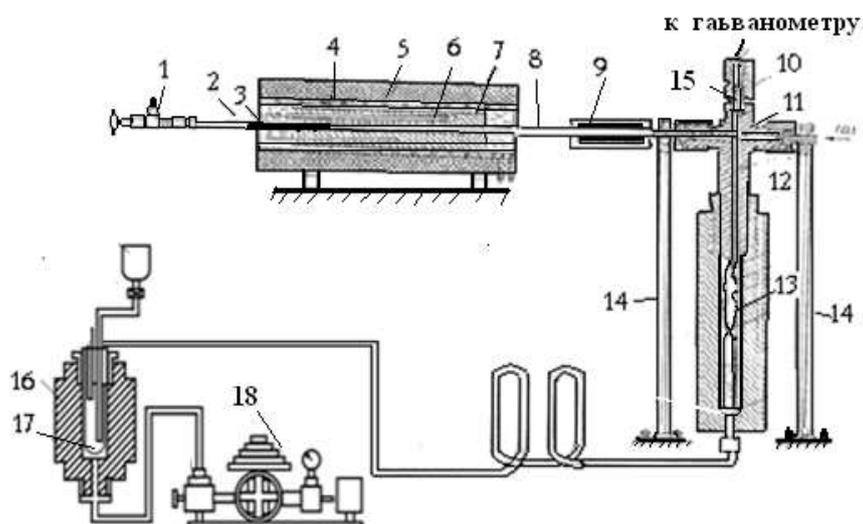


Рисунок 2.3.1. Схема вискозиметрической части установки для определения вязкости жидкостей и растворов при высоких давлениях и температурах: 1 - медный цилиндрический блок; 2 - термометр; 3 - термопары; 4 - конусное уплотнение; 5 - нижний штуцер; 6 - уплотнительный патрон; 7 – соединительные трубки; 8,12 - нажимная гайка; 9 - уплотняющий конус; 10 -электроввод высокого давления; 11 - крестовина; 13 - стеклянный вискозиметр; 14 – стой-ка; 15 - крючок; 16 - пережимной сосуд; 17 - полиэтиленовый мешочек; 18 – грузопоршневый манометр типа МП - 2500.

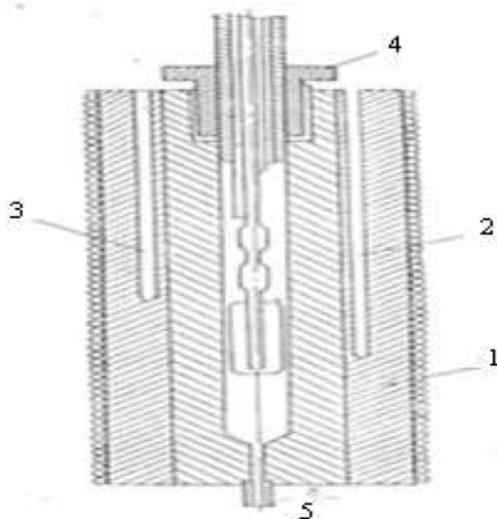


Рисунок 2.3.2. Вискозиметрический сосуд высокого давления: 1 - цилиндрический блок; 2 - отверстия для термометра; 3 - отверстия для термопары; 4 - конусное уплотнение; 5 – штуцер.

Схематически электроввод представлен на рисунке 2.3.3. Согласно схеме, в его комплектацию входят конус уплотняющий (9) вместе с гайкой нажимной (8), патрон (6), служащий для уплотнения и трубка (7), выполняющая соединительную функцию. По отверстию, высверленному насквозь, которое составляет 6 мм в диаметре, проводят 3 предварительно изолированных проводника из нихрома. С помощью тefлоновой шайбы (5) и нажимного кольца (4) производится уплотнение проводников в патроне. В данном процессе также участвуют букса (3) и гайка нажимная (2). Затем крючок (10) вставляется в торец конуса уплотнительного (9) и ввинчивается. Этот крючок служит для подвешивания на нем вискозиметра. По левой стороне крестовины выполняется соединение трубки высокого давления размером 18мм×6мм×105мм. На шайбу (8), которая находится в горячей зоне размещения капилляра также надевается блок (7) из меди. Диаметр блока составляет 50мм, а длина 500мм. Вдоль блока сделано специальное отверстие, которое необходимо для размещения в нем платинового термометра сопротивления (2). Глубина отверстия высверливается до уровня капилляра вискозиметра, чтобы обеспечить размещение чувствительного элемента термометра сопротивления на одном уровне с ним. Трубка (8) вместе с медным блоком (7) устанавливается внутри электрической печи (5), которая снаружи и с торцов изолирована. Печь установлена на металлической подложке. Чтобы исключить нагрев опытных жидкостей и соответственно уплотнений, на выходе из блока (7) на трубке (8) устанавливается охлаждающее устройство (9) с проточной водой.

Стекланный вискозиметр, который подвешивается на крючке электро-ввода, сделан из тугоплавкого вида стекла, под торговым названием «супромакс».

Динамическая вязкость исследуемых веществ, рассчитывается исходя из геометрических размеров вискозиметра. К таковым относятся полный объем баллончика измерительного изменения положения ртути (по высоте), радиус и соответственно длина капилляра.

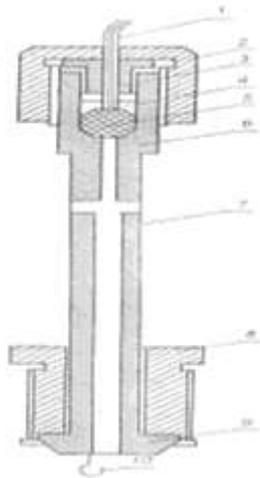


Рисунок 2.3.3. Электроввод высокого давления

Схема, по которой работает вискозиметр приведена на рисунке 2.3.4. Положение I вискозиметра предусматривает нахождение всей ртути в нижнем баллончике. При повороте положение вискозиметра переводится в положение II, в результате чего ртуть распределяется по его длине. При быстром его переводе в положение III (вертикальное) появляется разность между уровнями ртути, что способствует течению изучаемой жидкости (раствора) по капилляру, а ртуть под воздействием силы тяжести возвращается в исходное положение, т.е. из объема измерительного возвращается в исходное место, где находилась раньше. При опускании ртуть поочередно отмыкается с контактами и фиксируется время протекания ртути (того же объема изучаемой жидкости или раствора) из измерительного баллончика.

При помощи катетометра КМ-8 погрешностью ± 2 мкм, а также микроскопа МИР-12, выполнены замеры действительных размеров вискозиметра. Сперва вымытый и тщательно просушенный вискозиметр устанавливается на штативе в вертикальном положении. Затем с помощью воронки нижний его баллончик заполняется чистой ртутью

взвешенного количества. Ртуть предварительно с помощью аналитических весов (ВЛА – 200 – М с точностью в 0,0001г) в специальной боксе из стекла взвешивается.



Рисунок 2.3.4. Схема принципа работы вискозиметра: I - исходное положение; II - вспомогательное положение; III - рабочее положение.

После заполнения баллончика ртутью катетометром КМ – 8 снимаются значения h_0 $h_{1н}$. После трехкратного измерения принимается среднее по результатам этих замеров значение. Затем к воронке нижнего баллончика присоединяется хлорвиниловый ниппель, на втором конце которого присоединена резиновая груша. Присоединение ниппеля с грушей позволяет добиться перемещение ртути на верхние и средние контакты, чтобы обеспечить разность уровней ртути, которые в свою очередь соответствуют началу и концу ее истечения. Постоянство в поддержании разности уровня ртути обеспечивается с помощью показаний стрелки милливольтметра, позволяющий отслеживать необходимую точность. Милливольтметр подключается посредством сопротивления к батарее.

Для определения полного объема баллончика к воронке нижнего баллончика присоединяется ниппель с наконечником, выполненным в виде капилляра, посредством которого, используя воронку и переходник из резины, вискозиметр заполняется ртутью. После того как измерительный объем заполняется ртутью, посредством капиллярного

наконечника она сливается в бюксу, которая затем взвешивается на аналитических весах.

Подставляя чистую массу ртути в приведенную ниже формулу, определяют объем измерительного баллончика:

$$V_H = \frac{m}{\rho_T}, \quad (2.3.1)$$

где m - масса ртути, ρ_T - плотность ртути при температуре калибровки.

Средние значения результатов опытов показаны в таблице 2.3.1.

Таблица 2.3.1. - Геометрические размеры вискозиметра

h_H , см	h_{IH} , см	h_{2H} , см	L_{IH} , см	L_{2H} , см	V_o , см
4,5833	6,8643	3,3817	9,9207	7,5496	1,538

Масса ртути, которой заполнен вискозиметр - 93,5889 г, измерительном баллончике - 20,8055 г. Плотность ртути при 300,15 К - 13,529 г/см³. Объем баллончика измерительного при той же температуре - 1,538 см³.

Для определения динамической вязкости с помощью опытных данных требуется определение радиуса капилляра. Радиус капилляра следует определять точно, поскольку его значение в формуле записывается в четвертой степени. В опытах мы воспользовались стеклянными вдоль откалиброванными капиллярами, предназначенных для ртутных термометров. На концах изготавливались расширительные воронки. Радиус капилляра устанавливался с помощью относительного и абсолютного метода. Абсолютный метод подразумевает трехкратное измерение заполненного капилляра ртутью. Относительный метод включает проведения опыта с жидкостью с известной вязкостью. Абсолютный метод заключается в трехкратном заполнении отведенного участка капилляра ртутью с ежекратным измерением длины ртутного столбика, для чего использовался микроскоп. После завершения опытов ртуть собирается и взвешивается на аналитических весах ВЛА - 200 - М.

Определение радиуса осуществляется с помощью формулы:

$$r = \sqrt{M_{\text{общ.}} / \pi \rho_T l_{\text{общ.}}} , \quad (2.3.2)$$

где $M_{\text{общ.}}$ – масса ртути по результатам трехкратного заполнения капилляра, $l_{\text{общ.}}$ – суммарная длина столбика ртути, ρ_T – плотность ртути при температуре калибровки. Радиус применяемого капилляра соответствовал 0,1645 мм.

При относительном методе в опытах использовался н-бутиловый спирт, поскольку его вязкость хорошо известна в условиях комнатной температуры. Подставляя в формулу данные по вязкости и данные по времени истечения с помощью нижеследующей формулы можно уточнить радиус капилляра [147]:

$$\eta_0^4 = \frac{(\eta + \rho m V_0 / 8 L_0 V_0) \cdot 8 L_0 V_0}{981 \rho_{\text{ор.т}} \cdot H_0 \pi \cdot \tau (1 - \rho / \rho_{\text{р.т}})} , \quad (2.3.3)$$

где η – вязкость н-бутанола при комнатной температуре; m – численная величина, равная 1,12; V_0 – объем измерительного баллончика; L_0 – длина капилляра; τ – время истечения ртути между контактами измерительного баллончика; H_0 – средний интегральный перепад уровней ртути; $\pi=3,14$; ρ – плотность исследуемого вещества при комнатной температуре; $\rho_{\text{ор.т}}$ – плотность ртути при давлении атмосферного воздуха и комнатной температуре, $\rho_{\text{р.т}}$ – плотность ртути при давлении опыта и комнатной температуре. Радиус капилляра r_0 – равен 0,1651 мм. Значения плотности по ртути приняты из [96,99,101]. Длина капилляра также измерялась при помощи микроскопа МИР - 12 и катетометра КМ - 8 с точностью до 0,001 см.

2.4. Методика проведения эксперимента по измерению вязкости при высоких параметрах состояния

Перед проведением опытов, сперва капилляр промывается и просушивается, после чего вставляется во внутрь трубки. Затем с использованием кембрика соединяется с капиллярной трубкой (8), изготовленной из нержавеющей стали. Конец этой трубки, в области уплотнительного конуса, выходит из крестовины для присоединения вискозиметра (рисунок 2.3.2). Также как и капилляр вискозиметр тщательно вымывается и проходит процедуру просушивания. После этого вискозиметр подвешивается на крючке уплотнительного конуса, чтобы было возможно соединить проводники электропровода к его платиновым контактам. С помощью кварцевой нити проводники электропровода от корпуса вискозиметра были изолированы. После этого предварительно взвешенное количество ртути вливается в нижний баллончик. Незаполненный объем баллончика заливается образцом исследования (жидкость либо раствор), после чего вискозиметр вместе с электропроводом устанавливается внутри вискозиметрического сосуда и при помощи нажимной гайки уплотняется. Затем экспериментальная установка и правое колено пережимного сосуда наполняются опытной жидкостью. Собранный система до проведения эксперимента проверяется на герметичность. Герметичность устройства определяется по результатам создания максимально допустимого давления эксперимента. Система измерения температуры, работоспособность контактов вискозиметра и пережимного сосуда, строгая вертикальность сосуда высокого давления также проверяется соответственным образом. После проведения перечисленных мероприятий, возможно проведение эксперимента. Применение электропечи позволяет установить стационарный тепловой режим, который контролируется термометром сопротивление ПТС-10 платиновый и дифференциальными термопарами из хромель-алюмеля с потенциометром Р363-2, на что затрачивается в

среднем 3-4 часа. Затем манометром МП-600 грузопоршневым задается необходимое давление опыта с шагом в 5-10МПа. После достижения требуемого давления системы, вискозиметр переводится в горизонтальное и резко в вертикальное положение. При горизонтальном положении весь объем ртути распределяется по всей длине вискозиметра, при возвращении вискозиметра в исходное положение ртуть переливается в исходный и измерительный баллончики, что обеспечивает среди верхнего и нижнего баллончиков перепад уровней ртути. Под действием силы тяжести из измерительного баллончика ртуть стекая в нижний баллончик становится причиной протекания изучаемой жидкости (раствора) через капилляр. В момент отрыва ртути от верхнего контакта производится включение частотомера Ф5041 электронно-счетного и начинается фиксирование времени стекания жидкости до тех пор, пока ртуть оторвется от нижнего контакта баллончика измерительного. При отрыве ртути от контакта измерение времени прекращается. Наряду со временем снимаются и значения температуры и давления. Опыты производятся по изотермам, а выполнение перехода из одной точки опыта в другую выполняется за счет повышения давления. В некоторых случаях задается относительно давления опыта обратное действие ходу эксперимента, т.е. после того, как достигается максимальное давление опыта на изотермах, определяется воспроизводимость ранее полученных данных. Измерение времени относительно каждого значения давления осуществляется 2-3 раза. После завершения измерений на каждой из изотерм перевод устройства на следующий температурный режим выполняется после снижения давления в манометре до атмосферного. Поскольку повышение температуры может вызывать разложение растворов, поэтому по окончании опытов, т.е. после заключительной изотермы проводятся контрольные измерения при всех давлениях опыта в атмосфере комнатной температуры. По итогам сравнительного анализа было отмечено удовлетворительно согласие с

первоначально полученными, что является свидетельством отсутствия разложения растворов.

2.5. Расчетное уравнение вискозиметра с выносным капилляром

Формула для расчета вязкости по полученным данным на вискозиметре с выносным капилляром впервые было предложено Голубевым И.Ф. [97,98], в основе которой заложено уравнение Гагена-Пуазейля, предложенное для ламинарного течения жидкостей [92, 93, 115, 117, 147]:

$$\eta = \frac{\pi(P_1 - P_2) \cdot r^4}{8VL}, \quad (2.5.1)$$

где $(P_1 - P_2)$ - перепад давления на концах капилляра; r - радиус капилляра; L - длина капилляра; V - объем жидкости (раствора) или газа, которое за единицу времени пропускается через капилляр; $\pi = 3,14$ - число Рудольфа.

В выражении (2.5.1) для расчета коэффициента динамической вязкости наших образцов по результатам опытных данных, учитывая условия проведения опыта и особенности конструкции самого вискозиметра были введены соответствующие поправки. После доработки, т.е. введения поправок расчетной уравнение, учитывающее высокие температуры опыта (выше 293,15К) принимает следующий вид [92, 93, 115, 117, 147]:

$$\eta = A(1 + \alpha\Delta t) \cdot \frac{\rho t}{\rho} \tau \left\{ \left[\frac{\rho_{P,T}}{\rho_{0P,T}} (1 + \alpha) - \alpha \right] \cdot \left(1 - \frac{\rho}{\rho_{P,T}} \right) - \frac{B\rho_2^2}{(1+4\alpha\Delta t) \cdot \tau^2 \rho_t} \right\}, \quad (2.5.2)$$

где A и B – постоянные коэффициенты, равные:

$$A = \frac{981 \rho_{0P,T} \cdot H_0 \cdot \pi r_0^4}{8L_0 \cdot V_0}, \quad (2.5.3)$$

$$B = \frac{m \cdot V_0^2}{981 \rho_{0P,T} \cdot H_0 \cdot \pi^2 \tau_0^4}. \quad (2.5.4)$$

При одинаковых температурах капилляра и сосуда, но при разных давлениях, формула приобретает вид [92, 93, 115, 117, 118, 119, 147]:

$$\eta = A\tau \left(1 - \frac{\rho}{\rho_{p,T}} \right) - \frac{B\rho}{\tau^2}, \quad (2.5.5)$$

где η - динамическая вязкость изучаемого вещества, ρ - плотность опытной жидкости (раствора) при нормальных условиях параметров состояния, ρ_t - плотность опытной жидкости (раствора) при заданных во время опыта температуре и давления, $\rho_{p,T}$ - плотность ртути при нормальных условиях параметров состояния (комнатная температура, атмосферное давление), $\rho_{p,T}$ - плотность ртути при различных давлениях и температурах, Δt - разность температур (опыта и комнатная), τ - время, за которое истекает жидкость (раствор), H_0 - средний интегральный перепад уровней ртути, r_0 - радиус капилляра, L_0 - длина капилляра, V_0 - объем измерительного баллончика вискозиметра, $m = 1,12$; α - коэффициент термического расширения стекла, $\alpha = h_H/H_0 = 43,1 \cdot 10^{-7}$.

Формула (2.5.5) применяется для определения динамической вязкости по результатам опытов с погрешностью 1,5% при разных температурах и давлениях [37 вар.2].

2.5.1. Поправка к расчетному уравнению вискозиметра, присущая методу капилляра

С учетом внесенных поправок и кинетической энергии уравнение (2.3.3) примет вид [92, 93, 115, 117, 147]:

$$P_1 - P_2 = \frac{8\eta \cdot L_0 V_0}{\pi r^4 \cdot r} + m\rho_t W^2, \quad (2.5.6)$$

где ρ_t - плотность жидкости (раствора) при температуре и давлении опыта, W^2 - линейная скорость течения вещества в капилляре:

$$W = \frac{V_0}{\pi r^2 l}. \quad (2.5.7)$$

Разность давления на концах капилляра соответствует:

$$P_1 - P_2 = H_0(\gamma_{P,T} - \gamma), \quad (2.5.8)$$

где H_0 – высота столба ртути, исчисляемая как средняя разность уровней ртути в измерительном и нижнем баллончиках в начале и конце эксперимента; $\gamma_{P,T}$ – удельный вес ртути; γ – удельный вес опытного вещества; $(\gamma_{P,T} - \gamma)$ – эффективный удельный вес ртути в среде опытного вещества. Поскольку единица измерения в выражении (2.5.8) принята в единицах веса, а коэффициент вязкости и единица измерения кинетической энергии в единицах массы, необходимо все составляющие выражения (2.5.2) перевести в единую систему единиц [92, 93, 115, 117, 147]:

$$\eta = \frac{981 \pi^4 r}{8 L_0 V_0} \left[(\rho_{P,T} - \rho) - \frac{m \rho_l W^2}{981} \right], \quad (2.5.9)$$

где $\rho_{P,T}$ и ρ – плотность ртути и опытного вещества в условиях комнатной температуры и давления, задаваемого в опыте. Поскольку температура автоклава на протяжении всего эксперимента поддерживалась постоянной, соответствующую поправку на изменение объема, связанную с изменением температуры в уравнении не учитывалась, но добавили поправку на величину H , связанную с изменением давления [92, 93, 115, 117, 147]:

$$H = H_0 - h_H \left(\frac{\rho_{oP,T}}{\rho_{P,T}} - 1 \right), \quad (2.5.10)$$

где h_H – уровень ртути в нижнем баллончике вискозиметра; H_0 – уровень ртути в вискозиметре, который считается как среднеинтегральная разность уровней ртути в начале и конце опыта; $\rho_{oP,T}$ – плотность ртути

при нормальных условиях (комнатная температура, атмосферное давление).

$$H_o = \frac{H_{1H} - H_{2H}}{\ln \frac{H_{1H}}{H_{2H}}}, \quad (2.5.11)$$

где H_{1H} и H_{2H} - высота столбиков ртути в вискозиметре в начале и конце замера.

Поправки на изменение размерных показателей капилляра (геометрические характеристики) в результате перемены давления, не принимаем во внимание, в силу разгруженности вискозиметра, а поправка, учитывающая изменение радиуса капилляра в связи с изменением температуры, принимает следующий вид [92, 93, 99, 118, 147]:

$$r = r_o(1 + \alpha\Delta t). \quad (2.5.12)$$

Удлинение капилляра принимается поправкой [93, 99, 115, 117, 118, 147]:

$$L = L_o(1 + \alpha\Delta t), \quad (2.5.13)$$

где r и L - радиус и длина капилляра при опытных значениях температуры и давления; r_o и L_o - радиус и соответственно длина капилляра при нормальных условиях (атмосферное давление, комнатная температура); α - коэффициент линейного расширения стекла; Δt - разность температуры эксперимента от комнатной, при которых измерялся радиус капилляров.

Поскольку вещество подверженное исследованию в момент измерения объема находился в атмосфере комнатной температуры и давлении заданного опытом, следовательно, истинный объем вещества (жидкость, раствор) за время опыта соответствует [92, 93, 99, 117, 147]:

$$V = V_o \frac{\rho_t}{\rho}. \quad (2.5.14)$$

Затем, обозначив $\frac{h_H}{H_0} = \alpha$ получим:

$$\begin{aligned}(1 - \alpha\Delta t)^3 &= 1 - 3\alpha\Delta t \\ (1 - \alpha\Delta t)^4 &= 1 - 4\alpha\Delta t\end{aligned}$$

поскольку $(\alpha\Delta t)^n$ очень мала относительно единицы.

2.6. Поправки, обусловленные нестационарностью метода

Монотонное изменение разностей уровня ртути в опытах по измерению вязкости веществ с применением капиллярного метода является хорошо известным. В методе разность уровней ртути достигается за счет разности давлений на входе и выходе из капилляра от исходного своего значения до нуля. Напоминаем, что вязкость рассчитывается с применением формулы Гагена-Пуазейля (2.5.1), в котором вместо давления P используют среднелогарифмическое значение, что является правомерным в отношении более вязких жидкостей (растворов). Однако, практическое применение данного способа для определения вязкости жидкостей (растворов) в отношении высоких температур, может стать следствием превышения допустимой погрешности [88,89].

Я.М. Назыев и А.Н. Шахвердиев назвали причины расхождений как следствие пренебрежения поправками в уравнении капиллярного вискозиметра [115, 117]. К таковым относятся: поправка, учитывающая влияние инерционных сил, которые напрямую зависят от массы ртути и изучаемой жидкости (раствора); поправка на силы вязкостного трения ртути; поправка, учитывающая отклонения от цилиндрической формы измерительного баллончика капиллярного вискозиметра и поправка, учитывающая упругость вещества при неустановившемся гидродинамическом режиме. Учитывая сказанное, поочерёдно будем рассматривать поправки к основному уравнению. Сперва рассмотрим инерционные силы, для чего принимаем: жидкость (раствор) в

вискозиметре не подлежит расширению; отсутствуют концевые эффекты капилляра; сечение капилляра по всей длине трубки неизменно; периодичность замеров неизменна; сила, возникающие в результате трения ртути, отсутствуют.

В силу предложенных упрощений, уравнение для расчета вязкости предложенным методом можно получить следующим образом [92, 93, 99, 117, 147]:

1) ламинарное течение жидкости в капилляре:

$$\frac{\partial V}{\partial r} = V \left(\frac{\partial^2 V}{\partial r^2} \cdot \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial r} \right) - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial r} \quad (2.6.1)$$

2) движение ртути

$$-(M_p + M) \frac{dU}{d\tau} = (M'_p - M') \cdot g + \left(\frac{\partial P}{\partial Z} \right) \cdot S \cdot l \quad (2.6.2)$$

3) неразрывность движения ртутно-жидкостной системы

$$R_o^2 U = 2 \int_0^{r_o} V dr, \quad (2.6.3)$$

где $\frac{\partial P}{\partial z} = -\frac{\Delta \rho}{l}$; V, U - скорость течения жидкости (раствора) по капилляру и соответственно ртути в трубке; ν - кинематическая вязкость; r и R - радиусы капилляра и трубки; ρ - плотность жидкости; M_p и M - масса ртути жидкости в трубке; τ - время истечения; l - длина капилляра; S - площадь сечения трубки. Решение уравнений (2.5.4), (2.6.1) - (2.6.3) выполняется с учетом краевых условий:

$$V = V_o; \quad U = U_o \quad \text{при } \tau=0$$

$$V = 0; \quad U = 0 \quad \text{при } \tau = \infty$$

$$V = 0 \quad \text{при } r = r_o$$

$$\frac{V}{r} = 0 \quad \text{при } r = 0 \quad \text{и } (r, \tau) = U(\tau)$$

Путем математического преобразования можно получить [92, 93, 99, 117, 147]:

$$\eta = \frac{\tau_o^4 (\rho_P - \rho) \cdot g (H_1 - H_2)}{8V \cdot l \cdot m} + C_1 + C_2 + C_3 \quad (2.6.4)$$

где C_1 – поправка на нестационарность:

$$C_1 = \frac{\tau_o^2 m \rho}{8},$$

где m – темп перепада давления:

$$m = \frac{\ln(H_1 / H_2)}{\Delta t},$$

C_2 – поправка на энергозатраты, использованные на преодоление инерционной силы:

$$C_2 = \frac{\tau_o^8 (\rho_P L_P + \rho L) (\rho_P - \rho) \cdot g}{32 R_o^4 \cdot \eta l^2},$$

C_3 – поправка на трение ртути в трубке:

$$C_3 = \eta_P \left(\frac{r_o^4 L_P}{R_o^4 l} \right).$$

Поскольку отсутствует строго цилиндрическая форма баллончика, то перепад давления не подчиняется экспоненциальному закону и как следствие применение (2.6.4) представляется некорректным. Таким образом, учитывая падение уровня ртути в измерительном баллончике прибора на dH и изменение его объема, согласно [92, 93, 99, 117, 147]:

$$\eta = \frac{\pi r_o^4 \Delta P_{cp} \tau}{8VL} \quad (2.6.5)$$

можно получить:

$$dV = \pi r_o^4 \frac{4(\rho_P - \rho) \cdot g H}{8\eta l} d\tau, \quad (2.6.6)$$

или dV можно записать:

$$dV = -\pi(H_1 - H_2)(2R - H_1 + Y)dH. \quad (2.6.7)$$

Приравняв уравнения (2.6.4) и (2.6.7) получим [92, 93, 99, 115, 117, 147]:

$$\eta = \frac{\pi r_o^4 (\rho_p - \rho) \cdot g H_{cp}^U \tau}{8VL},$$

где
$$H_{cp}^U = \frac{(R')^3 4/3}{H_1(2R - H_1) \ln(H_1/H_2) - 2(R - H_1)(H_1 - H_2) - \frac{H_1^2 - H_2^2}{2}}. \quad (2.6.8)$$

Если измерительный баллончик имеет цилиндрическую форму

$$H_{cp} = \frac{H_1 - H_2}{\ln(H_1 / H_2)},$$

то выражение (2.6.8) в отношении вискозиметра, баллончик которого сферической формы будет равно [92, 93, 99, 147]:

$$\Phi = \frac{H_{cp}^U}{H_{cp}} = \frac{4/3(R)^3 \ln H_1 / R_2}{(H_1 - H_2) \left[H_1(2R - H_1) \ln \frac{H_1}{H_2} - 2(R - H_1)(H_1 - H_2) - \frac{H_1^2 - H_2^2}{2} \right]}.$$

Из уравнения (2.6.8) получим [115, 116, 117, 147]:

$$\eta = \frac{\pi \cdot r_o^4 (\rho_p - \rho) \cdot g \Phi H_{cp}^U \tau}{8VL}. \quad (2.6.9)$$

Авторы [105] отмечают, что, если не воспользоваться формулой (2.6.9), учитывающей форму измерительного баллончика в виде сферы, согласно действующей теории ошибок, это может стать следствием около 0,87% добавочной погрешности.

Также авторами [105] была проведена оценка поправки, учитывающей неустановившийся гидродинамический режим вискозиметра, который возникает за счет упругости изучаемого

вещества. Основополагающая расчетного уравнения без поправок выглядит [93, 115, 116, 117, 118, 147]:

$$\eta = \frac{r_o^2 \Delta P_{cp}^o}{8 \bar{V}_{cp} l}, \quad (2.6.10)$$

где r_o - радиус капилляра, \bar{V}_{cp} - средняя по сечению и по времени скорость течения жидкости в капилляре, ΔP_{cp}^o - средний по времени перепад давления на концах капилляра, l - длина капилляра.

Выражение (2.6.10) тогда справедливо, когда распределение давления в капилляре подчиняется закону прямой линии и выражению [99, 115 - 118, 147]:

$$\Delta P_{cp}^\chi = \Delta P_{cp}^o \left(1 - \frac{\chi}{l} \right). \quad (2.6.11)$$

Уравнение (2.6.10) также имеет более универсальный вид:

$$\eta = - \frac{r^2}{8 V_{cp}^o} \left(\frac{d \Delta P_{cp}^\chi}{d \chi} \right)_o, \quad (2.6.12)$$

где V_{cp}^o - значение \bar{V}_{cp} на нижнем конце капилляра, то есть при $\chi=0$.

В отношении к (2.36) имеем [115, 117, 120, 147]:

$$\left(\frac{d \Delta P_{cp}^\chi}{d \chi} \right) = - \frac{\Delta P_{cp}^o}{l}.$$

По результатам анализа было установлено, что левая часть представленного выше уравнения относительно стационарного режима будет на порядок меньше. Чтобы убедиться в достоверности сказанного требуется выполнить решение задачи, связанной с распределением в капилляре давления при стационарном режиме, для чего удобным является применение нелинейного дифференциального уравнения Лейбензона [115, 117, 120, 147]:

$$\frac{\partial P}{\partial \tau} = \chi \nabla^2 P, \quad (2.6.13)$$

где χ - коэффициент пьезопроводности.

Выражением (2.6.13) можно рассчитать поле давления $P(\chi, r)$ при изотермическом режиме течения, решение которого сводится к решению одно-мерного уравнения теплопроводности [115, 120]:

$$\frac{\partial^2 \Theta}{\partial \chi^2} = \frac{1}{\chi} \frac{\partial \Theta}{\partial r}, \quad (2.6.14)$$

где $\Theta = -(P - P_o) = \Delta P_{cp}$ - разность давлений.

Путем математического преобразования, приняв во внимание возникающую разность давления на конце капилляра вискозиметра, подчиняющейся экспоненциальному закону, получим [115, 117, 120, 147]:

$$\eta = \frac{r^2 \Delta P_{cp}^o}{8V_{cp}^o \cdot l} \cdot l^{-\frac{1}{4} V^2 l^2}.$$

Авторы [105] пришли к выводам, что если в случаях с жидкостями в формуле можно не учитывать поправку на ее упругость, то при их изучении вблизи критической точки либо газов эта поправка вносит большой вклад в погрешность и ее пренебрегать нельзя.

Для убеждения в достоверности получаемых на данной установке (рисунок 2.3.1) результатов, нами в качестве контрольных измерений были проведены эксперименты с водой, принятой в данном случае в качестве эталона, поскольку данные о свойствах воды имеются во многих источниках литературы. Результаты проведенных нами контрольных измерений с данные авторов [105] нами были сопоставлены представлены в таблице 2.6.1.

Таблица 2.6.1. - Результаты контрольных измерений (воды) динамической вязкости на экспериментальной установке (рисунок 2.3.1)

при различных температурах и при давлении атмосферного воздуха [91, 93, 95, 98, 99, 101, 114 - 119, 121].

Т,К	293	303	313	323	333	343	353
$\eta_{\text{лит.}} \cdot 10^8, \text{Па с}$	1004	801,5	653,3	549,4	469,9	406,1	355,1
$\eta_{\text{конт.}} \cdot 10^8, \text{Па с}$	1008	805,4	659,4	556,2	475,4	411,2	360,7
$\sigma, \%$	0,39	0,49	0,93	1,24	1,17	1,26	1,58

Сравнительными расчетами установлена погрешность данных опыта при $\alpha = 0,95$, которое соответствует, в среднем, не более 1,01%.

Исходя из удовлетворительного согласия результатов контрольных измерений вязкости воды с литературными данными, нами было выполнено исследование вязкости ряда образцов в зависимости от изменения температуры (293–353)К и давления опыта (0,101-49,01)МПа (диоксид титан (от 0,1 до 3,0%) и воды).

2.7. Оценка погрешности измерения теплофизических свойств исследуемых веществ

Погрешность опытных данных ТФС нами была оценена по методу, представленном в [1-3, 14, 20, 86, 115, 117, 118, 120, 121-128, 147].

Среднее арифметическое значение (выборочное среднее) \bar{y} результатов нескольких измерений вычисляем по формуле:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i, \quad (2.7.1)$$

где n - число измерений; y_i - результат i - го измерения.

Затем рассчитывают абсолютное S и относительное $S_{\text{отн}}$ значение выборочного среднеквадратичного отклонения по итогам одного эксперимента:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}, \quad (2.7.2)$$

$$S_{\text{отн}} = \frac{S}{\bar{y}} \cdot 100\%, \quad (2.7.3)$$

Следует рассчитать абсолютное $S_{\bar{y}}$ и относительное $S_{\text{отн}}$ значения, чтобы вычислить величину среднеквадратичного отклонения результатов нескольких экспериментов:

$$S_{\bar{y}} = \frac{S}{\sqrt{n}}, \quad (2.7.4)$$

$$S_{\text{отн}} = \frac{y}{\bar{y}} \cdot 100\%. \quad (2.7.5)$$

Доверительная граница случайной погрешности результатов измерений $\Delta_{\text{сл}}$ рассчитывается как:

$$\Delta_{\text{сл}} = S_{\bar{y}} \cdot t_{n-1, 1-\varepsilon/\alpha}, \quad (2.7.6)$$

где $\varepsilon = 1 - \alpha$; α - доверительная вероятность, принимается $\alpha = 0,95$.

Доверительная граница неисключенной систематической погрешности определяется:

$$\theta = K \sqrt{\sum_{j=1}^m \theta_j^2}, \quad (2.7.7)$$

где K - коэффициент, определяемый принятой доверительной вероятностью $\alpha = 0,95$, равный 1,1; θ_j - граница j -й соответствующей неисключенной систематической погрешности.

Доверительная граница погрешности проведенных экспериментов определяется:

$$\Delta = t_{\Sigma} \cdot S_{\Sigma} \quad (2.7.8)$$

Среднеквадратичное отклонение суммы неисключенных систематических и случайных погрешностей S_{Σ} рассчитывается:

$$S_{\Sigma} = \sqrt{S_y^2 + S_v^2}, \quad (2.7.9)$$

где $S_v^2 = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^m \theta_j^2$ - среднее квадратичное отклонение суммы неисключенных систематических погрешностей.

Коэффициент, зависящий от соотношения случайной и неисключенной погрешностей t_{Σ} , определяемый:

$$t_{\Sigma} = \frac{\theta + S_y \cdot t_x}{S_v + S_y}, \quad (2.7.10)$$

где, t_x - коэффициент Стьюдента, зависящий от предварительно принятой величины α и числа измерений.

Погрешность косвенных измерений $y = F(y_1, y_2, \dots, y_n)$ при $\alpha = 0,95$ вычисляется как:

$$\Delta y = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial y_1}\right)^2 (\Delta y_1)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial y_2}\right)^2 (\Delta y_2)^2 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial y_n}\right)^2 (\Delta y_n)^2}, \quad (2.7.11)$$

где $\Delta y_1, \Delta y_2, \dots, \Delta y_n$ - доверительные границы погрешности результатов измерений величин y_1, y_2, \dots, y_n .

Общая относительная погрешность результатов экспериментов определяется по следующему выражению:

$$\sigma = \frac{\Delta y}{y} \cdot 100\% \quad (2.7.12)$$

2.7.1. Определение погрешности измерения плотности наножидкостей

Используя (2.1.1) с применением (2.6.14 - 2.7.11), погрешность исследований по плотности (метод гидростатического взвешивания) в относительной форме при $\alpha = 0,95$ оценивалась в соответствии с методикой, представленной в [2, 3, 14, 86, 115, 118, 119, 120, 122, 124, 128, 129, 147].

Согласно оценочным расчетам, было установлено, что доверительная граница погрешности измерений плотности при $\alpha = 0,95$ составляет 0,03%, методическая погрешность - 0,02%, инструментальная погрешность - 0,07%, общая относительная погрешность измерений составляет 0,12%.

2.7.2. Расчет погрешности динамической вязкости исследуемых веществ

С помощью (2.6.10) доверительная граница погрешности опытного исследования динамической вязкости, определяется согласно:

$$\Delta\eta = \sqrt{\left(\frac{\partial\eta}{\partial P_1}\right)^2 (\Delta P_1)^2 + \left(\frac{\partial\eta}{\partial P_2}\right)^2 (\Delta P_2)^2 + \left(\frac{\partial\eta}{\partial \tau}\right)^2 (\Delta\tau)^2 + \left(\frac{\partial\eta}{\partial V}\right)^2 (\Delta V)^2 + \left(\frac{\partial\eta}{\partial L}\right)^2 (\Delta L)^2} \quad (2.7.13)$$

где

$$\frac{\partial\eta}{\partial P_1} = \frac{\pi r^4}{8VL}$$

$$\frac{\partial\eta}{\partial P_2} = -\frac{\pi r^4}{8VL}$$

$$\frac{\partial\eta}{\partial \tau} = \frac{\tau^3 \pi (P_1 - P_2)}{2VL}$$

$$\frac{\partial\eta}{\partial V} = -\frac{\pi (P_1 - P_2) \cdot r^4}{8LV^2}$$

$$\frac{\partial\eta}{\partial L} = -\frac{\pi (P_1 - P_2) \cdot r^4}{8VL^2}$$

С помощью уравнений (2.7.13) и (2.6.14) - (2.7.11) нами расчетным определена погрешность измерений динамической вязкости при условии $\alpha=0,95$.

По результатам оценочных расчетов было установлено, что доверительная граница относительной погрешности результатов опытов с учетом $\alpha = 0,95$ доходит до 1,8%, методическая погрешность - 0,45%, инструментальная - 0,35%, а общая относительная погрешность составляет не более 2,6%.

Выводы по второй главе

1. По результатам оценки методов измерения ТФС жидкостей для исследования плотности (установка профессора Гусейнова Камала Дадашогли) и динамической вязкости жидкостей и растворов в условиях повышенных параметрах состояния выбор был остановлен на методе гидростатического взвешивания и капиллярного вискозиметра с выносным капилляром разработанным профессором Назыевым Я.М. и его учениками.

2. Выполнена полная оценка погрешностей измеренных величин.

3. Подробно изучив существующие установки и оценив их недостатки и преимущества, нами были представлены более усовершенствованные варианты установок, предназначенных для экспериментального изучения плотности и вязкости жидкостей (растворов) и при атмосферном давлении, и при высоких параметрах состояния.

4. представлена численная методика определения погрешности при измерении динамической вязкости и плотности исследуемых веществ.

5. Приведены результаты тестирования экспериментальной аппаратуры по измерению плотности и динамической вязкости воды, толуола, бензола в зависимости от температуры и давления.

Глава 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ЗНАЧЕНИЕ ПЛОТНОСТИ И ВЯЗКОСТИ ИССЛЕДУЕМЫХ РАСТВОРОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ И ДАВЛЕНИЯХ

3.1. Экспериментальное значение плотности наножидкостей при различных температурах и давлениях

Эксперименты по измерению плотности растворов системы воды и наночастиц TiO_2 проводились при помощи метода гидростатического взвешивания [86, 88, 89], [167-А, 170-А, 174-А, 175-А], общей относительной погрешностью при $\alpha=0,95\%$ соответственно 0,1%. Результаты опытов представлены в таблицах 3.1-3.7 и на рисунках 3.1-3.6 [167-А, 170-А, 174-А, 175-А, 176-А, 182-А, 183-А, 185-А, 186-А, 190-А].

Таблица 3.1.- Плотность (ρ , кг/м³) водных растворов диоксида титана ($H_2O + 0,5\%TiO_2$) при высоких параметрах состояния.

Р, МПа	0,101	0,101	9,81	19,61	29,43	39,24	49,01
Т,К	H_2O	раствор	раствор	раствор	Раствор	раствор	раствор
273	999,9	—	—	—	—	—	—
283	999,3	1024	1031	1038	1044	1051	1057
293	997,2	1020	1028	1034	1040	1047	1054
303	994,4	1017	1024	1030	1036	1044	1049
313	992,0	1011	1018	1026	1031	1039	1045
323	987,2	1006	1015	1021	1027	1034	1041
333	985,0	1000	1009	1017	1023	1029	1038
343	—	—	1004	1011	1018	1024	1031
353	—	—	997	1005	1012	1018	1025
363	—	—	991	998	1004	1012	1019
373	—	—	984	992	999	1006	1013
383	—	—	978	985	993	1000	1008
393	—	—	971	979	986	994	1001
403	—	—	965	972	980	987	995
413	—	—	958	966	973	981	990
423	—	—	952	959	966	975	984
433	—	—	945	953	960	969	977

Таблица 3.2.- Плотность (ρ , кг/м³) водных растворов диоксида титана ($H_2O + 1,0\%TiO_2$) при высоких параметрах состояния.

Р, МПа	0,101	0,101	9,81	19,61	29,43	39,24	49,01
Т,К	H_2O	раствор	раствор	раствор	Раствор	раствор	раствор
273	999,9	—	—	—	—	—	—
283	999,3	1039	1046	1051	1056	1061	1066
293	997,2	1033	1040	1046	1050	1055	1061
303	994,4	1027	1035	1041	1046	1051	1056
313	992,0	1022	1029	1035	1040	1045	1052
323	987,2	1016	1024	1030	1036	1041	1046
333	985,0	1010	1018	1025	1030	1035	1040
343	—	—	1013	1019	1025	1030	1036
353	—	—	1007	1014	1020	1025	1030
363	—	—	1002	1008	1015	1020	1026
373	—	—	997	1003	1009	1015	1021
383	—	—	991	998	1004	1010	1016
393	—	—	986	993	999	1005	1011
403	—	—	981	987	994	1000	1006
413	—	—	975	982	988	995	1001
423	—	—	970	977	983	990	996
433	—	—	964	971	978	985	991

Таблица 3.3.- Плотность (ρ , кг/м³) водных растворов диоксида титана ($H_2O + 1,5\%TiO_2$) при высоких параметрах состояния .

Р, МПа	0,101	0,101	9,81	19,61	29,43	39,24	49,01
Т,К	H_2O	раствор	раствор	раствор	Раствор	раствор	раствор
273	999,9	—	—	—	—	—	—
283	999,3	1060	1065	1072	1078	1085	1093
293	997,2	1056	1061	1067	1073	1081	1088
303	994,4	1049	1055	1063	1069	1076	1082
313	992,0	1040	1049	1056	1064	1072	1076
323	987,2	1032	1041	1048	1056	1065	1069
333	985,0	1023	1032	1040	1049	1058	1063

343	—	—	1025	1033	1042	1053	1057
353	—	—	1017	1026	1035	1045	1051
363	—	—	1010	1019	1027	1038	1045
373	—	—	1003	1010	1020	1031	1037
383	—	—	995	1004	1014	1025	1033
393	—	—	987	996	1006	1018	1027
403	—	—	980	988	999	1012	1020
413	—	—	973	981	992	1005	1014
423	—	—	965	974	985	998	1008
433	—	—	958	966	978	992	1001

Таблица 3.4.- Плотность (ρ , кг/м³) водных растворов диоксида титана ($H_2O + 2,0\%TiO_2$) при высоких параметрах состояния.

Р, МПа	0,101	0,101	9,81	19,61	29,43	39,24	49,01
Т,К	H_2O	раствор	раствор	раствор	Раствор	раствор	раствор
273	999,9	—	—	—	—	—	—
283	999,3	1072	1077	1083	1091	1091	1105
293	997,2	1064	1070	1078	1082	1090	1097
303	994,4	1056	1062	1069	1075	1082	1090
313	992,0	1048	1055	1061	1068	1075	1083
323	987,2	1040	1045	1054	1060	1067	1075
333	985,0	1033	1040	1046	1054	1061	1068
343	—	—	1032	1039	1045	1053	1060
353	—	—	1025	1031	1038	1044	1054
363	—	—	1017	1024	1030	1037	1048
373	—	—	1010	1017	1023	1030	1039
383	—	—	1003	1010	1015	1022	1035
393	—	—	995	1002	1008	1015	1030
403	—	—	988	995	1000	1007	1025
413	—	—	980	987	995	1000	1018
423	—	—	973	980	987	1002	1012
433	—	—	965	972	980	1000	1006

Таблица 3.5.- Плотность (ρ , кг/м³) водных растворов диоксида титана ($H_2O + 2,5\%TiO_2$) при высоких параметрах состояния.

Р, МПа	0,101	0,101	9,81	19,61	29,43	39,24	49,01
Т,К	H_2O	раствор	раствор	раствор	Раствор	раствор	раствор
273	999,9	—	—	—	—	—	—
283	999,3	1080	1085	1093	1098	1103	1109
293	997,2	1072	1078	1085	1091	1096	1102
303	994,4	1065	1071	1077	1083	1089	1096
313	992,0	1058	1064	1070	1077	1082	1089
323	987,2	1050	1057	1064	1070	1076	1083
333	985,0	1044	1050	1057	1063	1069	1075
343	—	—	1043	1050	1056	1064	1069
353	—	—	1036	1043	1049	1057	1063
363	—	—	1029	1035	1042	1050	1056
373	—	—	1023	1028	1036	1043	1048
383	—	—	1015	1022	1029	1036	1043
393	—	—	1008	1014	1023	1030	1035
403	—	—	1000	1007	1015	1024	1029
413	—	—	993	1000	1008	1016	1023
423	—	—	986	994	1002	1010	1016
433	—	—	979	986	995	1003	1009

Таблица 3.6.-Плотность (ρ , кг/м³) водных растворов диоксида титана ($H_2O + 3,0\%TiO_2$) при высоких параметрах состояния.

Р, МПа	0,101	0,101	9,81	19,61	29,43	39,24	49,01
Т,К	H_2O	раствор	раствор	раствор	Раствор	раствор	раствор
273	999,9	—	—	—	—	—	—
283	999,3	1088	1094	1103	1108	1114	1119
293	997,2	1082	1087	1095	1101	1107	1115
303	994,4	1075	1081	1088	1094	1101	1108
313	992,0	1068	1075	1082	1089	1095	1100
323	987,2	1061	1068	1075	1083	1088	1095
333	985,0	1054	1062	1069	1076	1082	1089
343	—	—	1055	1061	1068	1075	1083

353	—	—	1049	1056	1062	1069	1077
363	—	—	1043	1048	1057	1063	1070
373	—	—	1036	1042	1050	1057	1065
383	—	—	1029	1036	1044	1050	1059
393	—	—	1023	1029	1038	1044	1052
403	—	—	1016	1023	1031	1039	1046
413	—	—	1010	1016	1025	1032	1040
423	—	—	1003	1010	1017	1025	1034
433	—	—	996	1003	1011	1019	1028

Таблица 3.7.- Плотность (ρ , кг/м³) водных растворов диоксида титана ($H_2O + TiO_2$) при различных температурах (283-333) К и концентрациях TiO_2 (0-3,0 %).

Т,К Растворы	283	293	303	313	323	333
Обр № 1	1005,1	999,8	994,6	989,3	983,7	984,0
Обр № 2	1006,0	100,5	995,5	990,5	984,5	979,6
Обр № 3	1042,2	1036,3	1031,2	1026,0	1019,8	1014,7
Обр № 4	1056,9	1051,1	1045,9	1040,7	1034,3	1029,1
Обр № 5	1059,2	1053,4	1048,2	1042,9	1036,7	1031,4
Обр № 6	1079,3	1073,3	1068,0	1062,7	1056,2	1050,9
Обр № 7	1086,8	1080,8	1075,4	1070,0	1063,6	1058,8

Образец № 1 (H_2O); Образец № 2 ($H_2O + 0,5\%TiO_2$); Образец № 3 ($H_2O + 1,0\%TiO_2$); Образец № 4 ($H_2O + 1,5\%TiO_2$); Образец № 5 ($H_2O + 2,0\%TiO_2$); Образец № 6 ($H_2O + 2,5\%TiO_2$); Образец № 7 ($H_2O + 3,0\%TiO_2$).

На рисунке 3.1 и в таблице 3.1 отражены экспериментально полученные данные по плотности чистой воды и с добавкой 0,5 % TiO_2 при высоких значениях температуры и давления. Установлено уменьшение их плотности при повышении температуры, и наоборот ее рост с повышением давления.

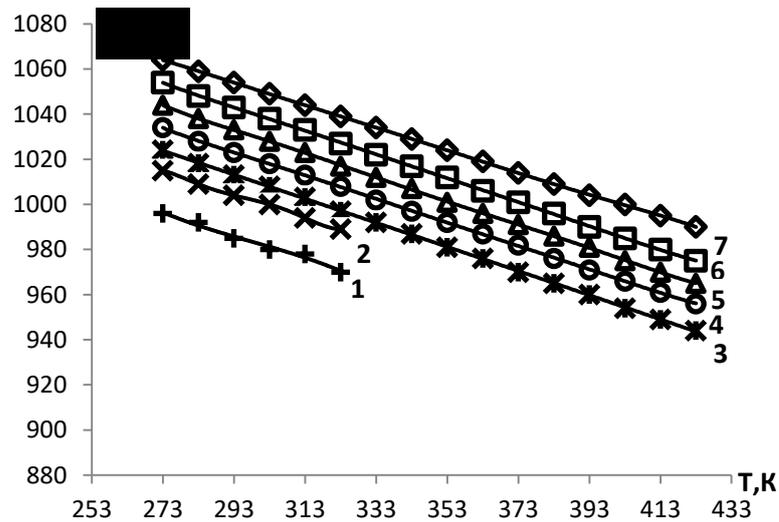


Рисунок 3.1- Плотность водных растворов диоксида титана ($\text{H}_2\text{O} + 0,5\% \text{TiO}_2$) при высоких параметрах состояния: 1- H_2O (0,101 МПа), 2-0,101МПа, 3-9,81МПа, 4-19,61МПа, 5-29,42МПа, 6-39,24МПа, 7-49,01МПа.

Например, при температуре 283 К и давлении $p=0,101\text{МПа}$ для перечисленных раствор плотность растет на 2,47 %, при температуре 333К плотность растет на 1,52%. Изменение значения давления от 0,101МПа до 49,01МПа при 283 К способствует росту плотности на 3,22%, а при 333К на 3,8%. Повышение температуры приводит к уменьшению плотности коллоидных растворов [167-А, 170-А, 174-А, 175-А, 176-А, 182-А, 183-А, 185-А, 186-А, 190-А].

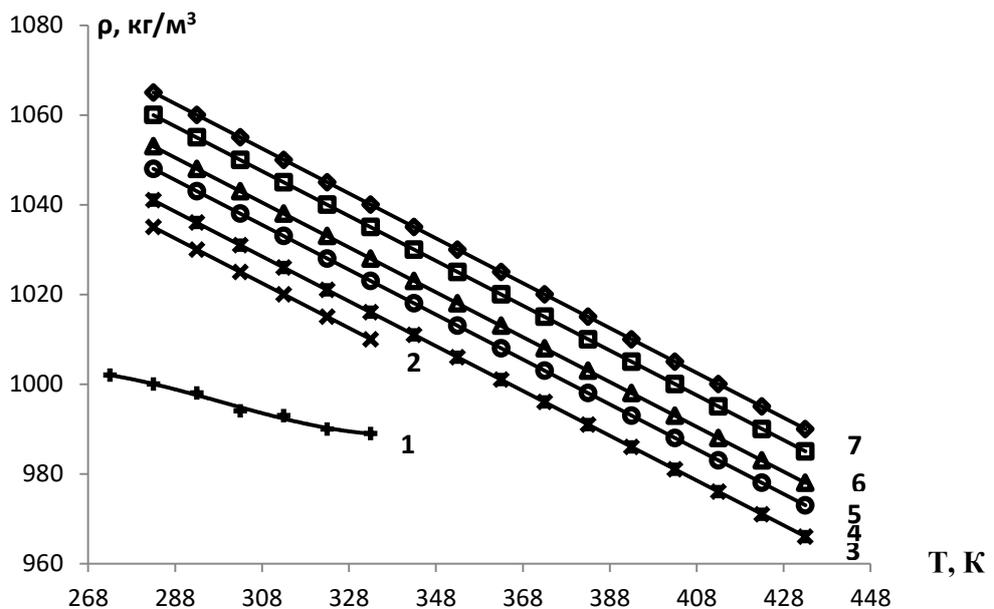


Рисунок 3.2- Плотность водных растворов диоксида титана ($\text{H}_2\text{O} + 1,0\% \text{TiO}_2$) при высоких параметрах состояния: 1- H_2O (0,101 МПа), 2-

0,101МПа, 3-9,81МПа, 4-19,61МПа, 5-29,42МПа, 6-39,24МПа,7-49,01МПа.

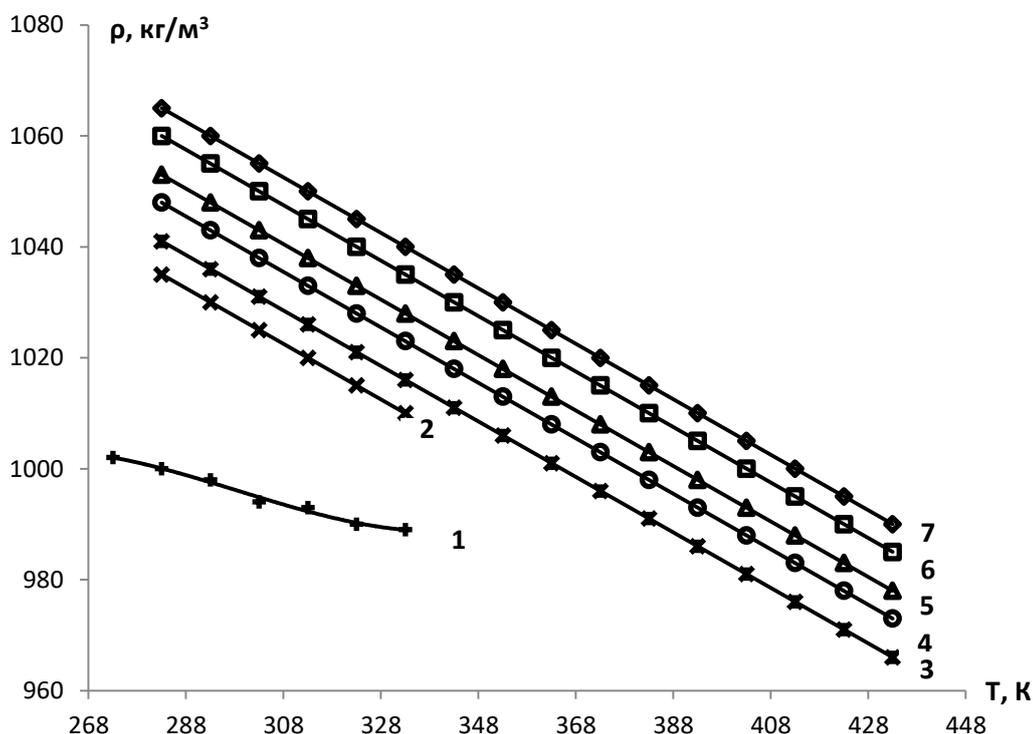


Рисунок 3.3- Плотность водных растворов диоксида титана ($\text{H}_2\text{O} + 1,5\% \text{TiO}_2$) при высоких параметрах состояния: 1- H_2O (0,101 МПа), 2-0,101МПа, 3-29,81 МПа, 4-19,61МПа, 5-29,42МПа, 6-39,24МПа, 7-49,01МПа.

На рисунке 3.3 и в таблице 3.3 приведены экспериментальные значение плотности коллоидного раствора системы ($\text{H}_2\text{O} + 1,5\% \text{TiO}_2$). Изменение давления составляет (0,101 – 49,01)Мпа, диапазон температуры опыта для данного образца составляет (273-433)К. Изменение плотности воды в сторону уменьшения при одновременном росте температуры соответствует линейному закону. С повышением температуры степень влияния давления на на плотность образцов, также повышается. При 293К и росте давления от 9,81МПа до 49,01МПа плотность образца ($\text{H}_2\text{O} + 1,5\% \text{TiO}_2$) повышается на 2,54%, при 353К на 3,34%, а при 433К до 4,49%. [167-А, 170-А, 174-А, 175-А, 176-А, 182-А, 183-А, 185-А, 186-А, 190-А].

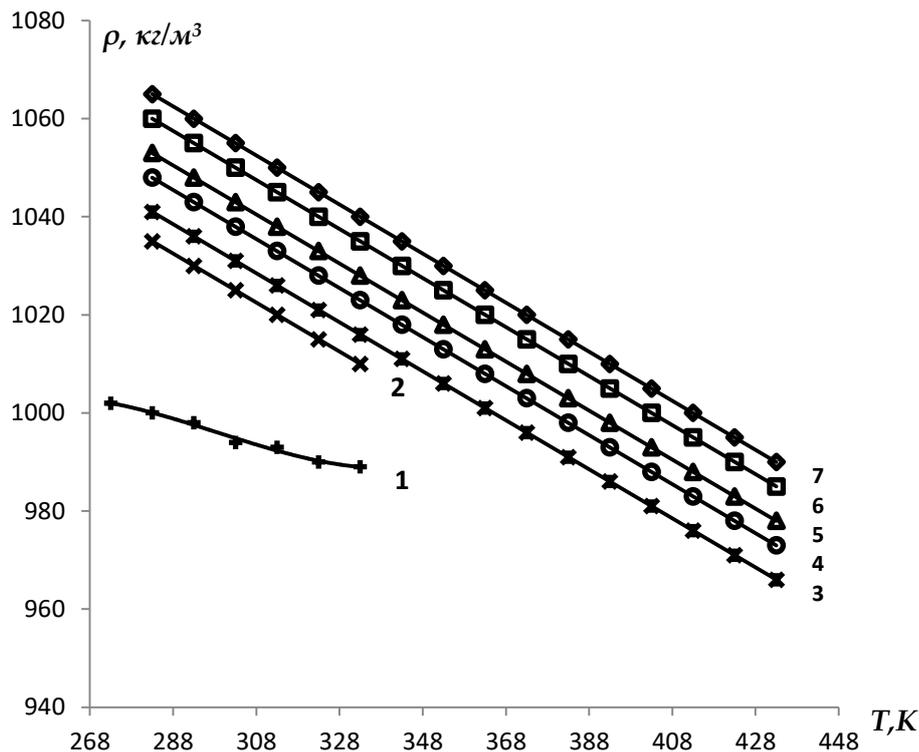


Рисунок 3.4- Плотность водных растворов диоксида титана ($\text{H}_2\text{O} + 2,0\% \text{TiO}_2$) при высоких параметрах состояния: 1- H_2O (0,101 МПа), 2-0,101МПа, 3-9,81МПа, 4-19,61МПа, 5-29,42МПа, 6-39,24МПа, 7-49,01МПа.

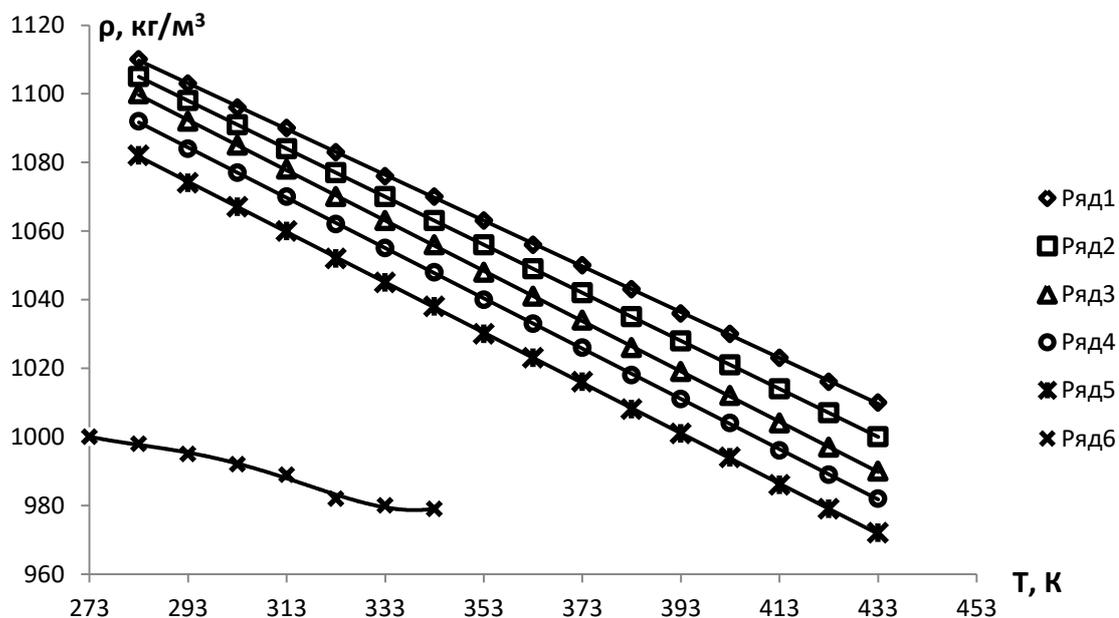


Рисунок 3.5- Плотность водных растворов оксида титана ($\text{H}_2\text{O} + 2,5\% \text{TiO}_2$) при высоких параметрах состояния: 1- H_2O (0,101 МПа), 2-

0,101МПа, 3-9,81МПа, 4-19,61МПа, 5-29,42МПа, 6-39,24МПа, 7-49,01МПа.

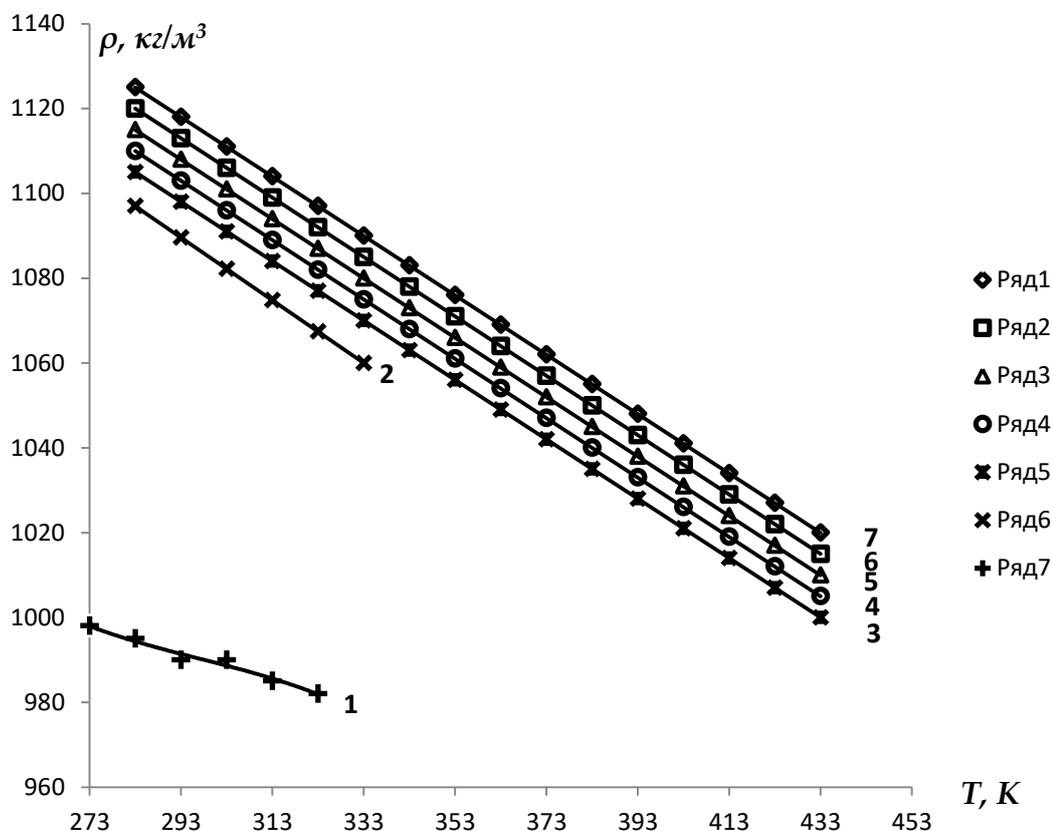


Рисунок 3.6- Плотность водных растворов оксида титана (вода+ 3,0% TiO_2) при высоких параметрах состояния: 1- H_2O (0,101 МПа), 2-0,101МПа, 3-9,81 МПа, 4-19,61 МПа, 5-29,42 МПа, 6-39,24 МПа, 7-49,01 МПа.

На рисунке 3.6 и в таблице 3.6 приведены экспериментально–расчетные данные по плотности коллоидного раствора системы (H_2O +3,0% TiO_2). Изменение давления составляет (0,101 – 49,01) Мпа, диапазон температуры опыта для данного образца составляет (273-433)К. Температурная зависимость уменьшения плотности чистой воды носит линейный характер. При температуре 283К и изменении давления от 9,81МПа до 49,01МПа плотность образца (H_2O +3,0% TiO_2) повышается на 2,28%, при 353К на 2,68%, а при 433К до 3,2%.

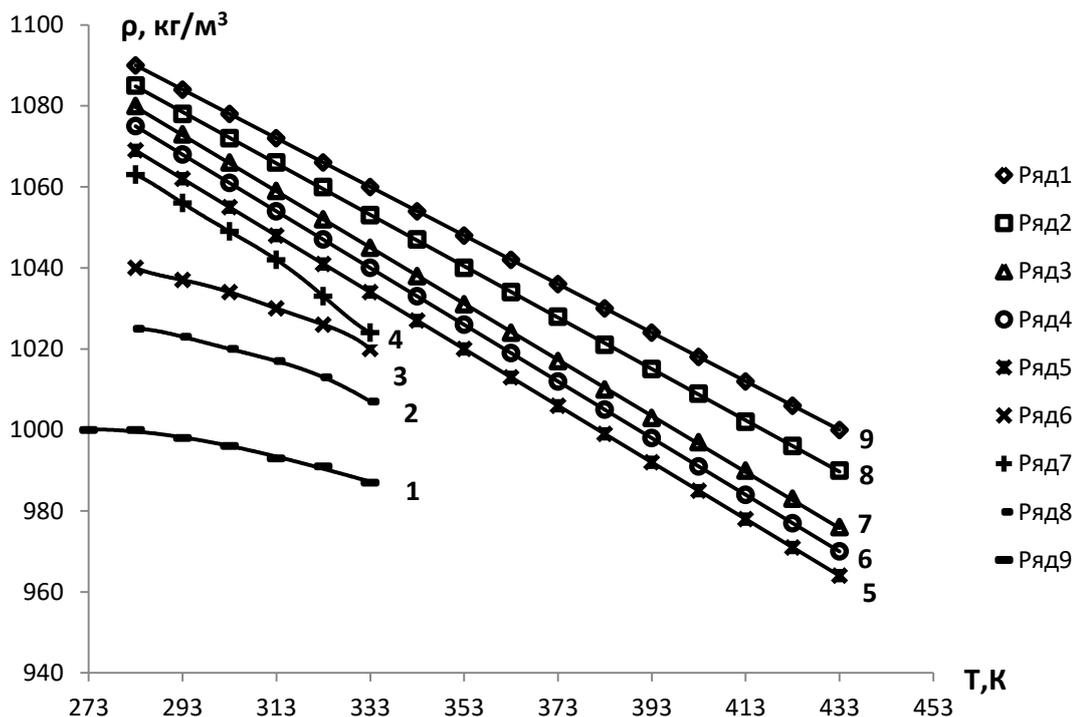


Рисунок 3.7- Плотность водных растворов диоксида титана и воды (H_2O) при высоких параметрах состояния: 1- H_2O без добавки наночастиц при атмосферном давлении (краткий справочник [173]); 2- ($H_2O + 0,5\%TiO_2$) при $P=0,101$ МПа; 3- ($H_2O + 1,0\%TiO_2$) при $P=0,101$ МПа; 4- ($H_2O + 1,5\% TiO_2$) при $P=0,101$ МПа; 5- ($H_2O + 1,5\% TiO_2$) при $P=19,61$ МПа; 6- ($H_2O + 1,5\% TiO_2$) при $P=23,32$ МПа; 7- ($H_2O + 1,5\% TiO_2$) при $P=29,42$ МПа; 8- ($H_2O + 1,5\% TiO_2$) 39,24МПа; 9- ($H_2O + 1,5\% TiO_2$) при $P= 49,01$ МПа.

На рисунке 3.7 и в таблице 3.7 приведены экспериментальные значения плотности коллоидного раствора системы ($H_2O + TiO_2$). Изменение давления составляет (0,101– 49,01)МПа диапазон температуры опыта в данном объекте составляет (273-433)К. Рост температуры опыта показывает уменьшение плотности воды в чистом виде согласно линейного закона.

Согласно, рисунку 3.3, можно заключить, что по мере добавки наночастиц TiO_2 , а также и увеличение давления, приводит к повышению плотности растворов. При атмосферном давлении добавка наночастиц

TiO₂ от 0 до 1,0% в раствор и температуре 283К плотность вещества повышается на 2,6%, а при T=333К на 2,97%. Плотность растворов при высоких давлениях (выше 29,43 МПа) и ростом температуры уменьшается согласно закону прямой линии [167-А, 170-А, 174-А, 175-А, 176-А, 182-А, 183-А, 185-А, 186-А, 190-А].

Как видно из рисунка 3.4 и таблицы 3.4 при давлении P=49,01МПа в интервале температуры (283-433)К плотность раствора (H₂O +2,0 % TiO₂) уменьшается прямолинейно, так как было отмечено выше. Рост температуры при приведенном интервале (283 - 423К) данного образца (H₂O +2,0%TiO₂) способствует уменьшению плотности при давлении 19,61 МПа на 10,40%, при давлении 49,01МПа это изменение составляет 10,21%.

Согласно таблицам 3.1 – 3.7 и рисункам 3.1–3.7 с повышением температуры плотность исследуемых объектов уменьшается по линейному закону, а с ростом давления растет. С увеличением массовой концентрации диоксида титана TiO₂ в составе раствора, их плотность увеличивается (рисунок 3.8). Температурная зависимость повышения плотности образцов при увеличении массовой концентрации наполнителя диоксида титана является линейной.

Например, при изменении температуры от 283К до 333К плотность образца изменяется на 1,43% в сторону уменьшения, а для образцов H₂O +0,5 % TiO₂ и H₂O +2,0 % TiO₂ изменения соответственно составляют 2,34% и 3,64%.

Как показали результаты измерений, рост плотности под влиянием температуры подавляется ростом давления опыта за счет уплотнения молекул. Например, в интервале от 283К до 333К при давлении 0,101МПа плотность раствора с 0,5%TiO₂ уменьшается на 2,34%, а при давлениях 19,61МПа и 49,01МПа соответственно составляет 2,02% и 1,8%.

Рост температуры во всем диапазоне изменения концентрации наполнителя и давления опыта приводит к уменьшению плотности изучаемых образцов. Например, при давлении 49,01 МПа изменение температуры от 283 К до 333 К становится следствием уменьшения плотности образца с 0,5% TiO₂ на 1,8%, а с 1,0% TiO и 2,0% TiO₂ уменьшение их плотности доходит до 2,44% и 3,35% соответственно.

Добавление TiO₂ в состав воды способствует ослаблению межмолекулярного взаимодействия и соответственно рост температуры становится причиной их отдаления на некое расстояние, и как следствие уменьшения плотности.

Следствием роста давления опыта и массовой концентрации наполнителя при заданных температурах становится увеличение плотности образцов. Так, при T=283 К, повышении давления от 0,101 МПа до 49,01 МПа плотность образца с 0,5% TiO₂ повышается на 3,22%, при T=333 К это на 3,8%. Для образца с 1,5% TiO₂ при T=283 К плотность повышается на 3,11%, а при T=333 К на 3,91% [167-А, 170-А, 174-А, 175-А, 176-А, 182-А, 183-А, 185-А, 186-А, 190-А].

Надо отметить, что при температуре T=433 К во всем диапазоне изменения давления от 9,81 МПа до 49,01 МПа и концентрации диоксида титана плотность растворов растет практически одинаково приблизительно до 3,0%. Это свидетельствует о том, что межмолекулярное взаимодействие молекул раствора с разной массовой концентрацией диоксида титана не имеют сильного расхождения.

3.2. Экспериментальное значение коэффициента динамической вязкости наножидкостей при различных температурах и давлениях

Вязкость системы (H₂O+TiO₂) с изменением давления и температуры опыта нами использована установка профессора Голубева И.Ф. в дальнейшем модернизированная профессором Назыевым Я.М. и его учениками [97,98], [168-А, 178-А, 179-А, 180-А, 181-А].

Результаты экспериментального исследования показаны ниже в таблицах 3.10-3.15 и на рисунке 3.8.

В таблице 3.8 приведены экспериментальные данные для численного определения динамической вязкости растворов системы воды и наночастиц TiO₂. В таблице 3.9 приведены данные опытов по динамической вязкости воды, полученных при нормальных условиях (комнатная температура и атмосферное давление) и различной массовой концентрации наночастиц TiO₂. [168-А, 178-А, 179-А, 180-А, 181-А, 184-А, 187-А, 189-А, 190-А].

Таблица 3.8.- Экспериментальные данные для расчета коэффициента динамической вязкости ($\eta_0, 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$) растворов системы воды и наночастиц TiO₂.

T, K	293	303	313	323	333
$\rho_0, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ (H ₂ O)	998,23	995,68	992,25	988,1	985,16
$\eta_0, 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$ (H ₂ O)	1,005	0,801	0,656	0,549	0,469
$t_0, \text{с}$	3,52	3,35	3,02	2,63	2,54
$t, \text{с}$ (0,5% TiO ₂)	3,68	3,55	3,30	3,00	2,77
$t, \text{с}$ (1,0% TiO ₂)	3,90	3,71	3,51	3,18	2,90
$t, \text{с}$ (1,5% TiO ₂)	4,08	3,85	3,69	3,33	3,05
$t, \text{с}$ (2,0% TiO ₂)	4,22	4,08	3,86	3,49	3,18
$t, \text{с}$ (2,5% TiO ₂)	4,50	4,33	4,18	3,78	3,30
$t, \text{с}$ (3,0% TiO ₂)	4,66	4,45	4,26	3,84	3,47

На основе расчетного уравнения (2.5.5) и значений таблицы 3.8 выполнен расчет динамической вязкости образцов с изменением давления и температуры (таблица 3.9 и рисунок 3.8).

Таблица 3.9.- Влияние концентрации (n) наночастиц TiO₂ на изменение коэффициента динамической вязкости воды при комнатной температуре и атмосферном давлении.

$n, \%$	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
$\eta, 10^{-3} \text{Па} \cdot \text{с}$	1,005	1,111	1,241	1,301	1,348	1,439	1,492

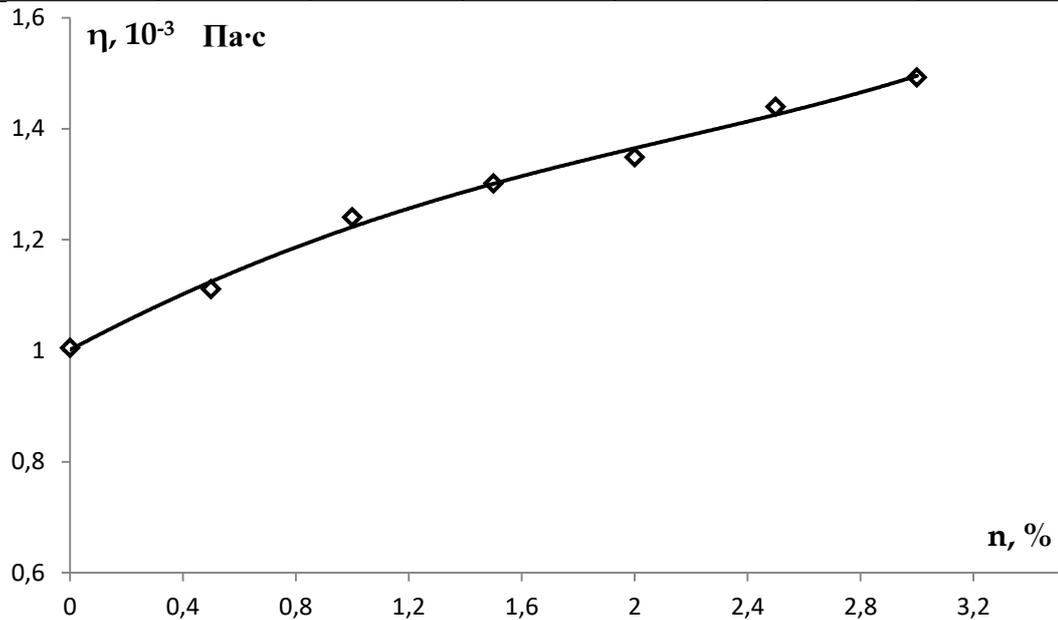


Рисунок 3.8- Коэффициент динамической вязкости ($\eta, 10^{-3} \text{Па} \cdot \text{с}$) системы воды и наночастиц (TiO_2) при комнатной температуре (293К) и атмосферном давлении (0.101МПа).

Для расчета коэффициента динамической вязкости водных растворов диоксида титана при различных температурах и давлениях нами использовано уравнение состояния предложенное Тейтом, которые названы в его честь (модифицированное уравнение типа Тейта), в следующем виде [114, 125, 128, 130-142, 148-150]: [168-А, 178-А, 179-А, 180-А, 181-А, 184-А, 187-А, 189-А, 190-А].

$$\eta = \eta_0 \left(1 - A \ln \left| \frac{B+P}{B_0+P_0} \right| \right), \quad (3.1)$$

где η – коэффициент динамической вязкости при различных температурах и давлениях (Па·с), η_0 – температурная зависимость коэффициента динамической вязкости при атмосферном давлении (Па·с), $A = -0,042$; $B_0 = 2,3 \text{МПа}$; $B = 3,5 \text{МПа}$; $P_0 = 4,9 \text{МПа}$.

Надо отметить, что уравнение (3.1) успешно применяют в своих работах многие исследователи. Для этого необходимо иметь значение коэффициента динамической вязкости исследуемых жидкостей или растворов при одной изотерме или температурную зависимость η_0 (Па·с) в условиях атмосферного воздуха (0,101 МПа). Результаты расчета коэффициента динамической вязкости (Па·с) исследуемых растворов системы воды и диоксида титана при различных температурах (273-443)К, давлениях (0,101- 49,01)МПа и концентрациях (0-3,0)% масс. приведены в виде таблиц ниже (таблица 3.10-3.15). [168-А, 178-А, 179-А, 180-А, 181-А].

Таблица 3.10.- Влияние концентрации наночастиц (TiO_2) на изменение коэф-фициента динамической вязкости ($\eta, 10^{-3} \text{Па} \cdot \text{с}$) воды при различных температурах и атмосферном давлении

Т,К	H ₂ O	Обр.№2	Обр.№3	Обр.№4	Обр.№5	Обр.№6	Обр.№7
273	1.792	1.807	1.832	1.844	1.862	1.877	1.892
283	1.308	1.376	1.485	1.512	1.580	1.648	1.716
293	1.005	1.111	1.241	1.301	1.348	1.439	1.492
303	0.801	0.892	0.964	1.038	1.136	1.205	1.288
313	0.656	0.724	0.772	0.842	0.918	0.978	1.053
323	0.549	0.587	0.646	0.702	0.765	0.822	0.865
333	0.469	0.504	0.552	0.594	0.658	0.717	0.764
343	-	0.447	0.486	0.526	0.568	0.620	0.668
353	-	0.415	0.453	0.478	0.552	0.578	0.609
363	-	0.396	0.432	0.467	0.519	0.540	0.576
373	-	0.384	0.431	0.458	0.503	0.528	0.544
383	-	0.375	0.430	0.455	0.483	0.526	0.543
393	-	0.369	0.422	0.452	0.477	0.520	0.542

Обр.№1- H₂O; Обр.№2- (H₂O+0,5% TiO₂); Обр.№3- (H₂O+1,0% TiO₂); Обр. №4- (H₂O +1,5 % TiO₂); Обр.№5- (H₂O+2,0% TiO₂); Обр.№6- (H₂O+2,5% TiO₂); Обр.№7- (H₂O+3,0% TiO₂).

Таблица 3.11.- Влияние концентрации наночастиц (TiO_2) на изменение коэффициента динамической вязкости ($\eta, 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$) воды при различных температурах и давлении $p=9,81 \text{ МПа}$

Т,К	H ₂ O	Обр.№2	Обр.№3	Обр.№4	Обр.№5	Обр.№6	Обр.№7
273	1.906	1.931	1.944	1.968	1.986	2.001	2.016
283	1.142	1.500	1.609	1.636	1.704	1.772	1.804
293	1.119	1.235	1.365	1.134	1.464	1.563	1.616
303	0.915	1.016	1.088	1.162	1.260	1.329	1.412
313	0.770	0.848	0.896	0.966	1.042	1.102	1.117
323	0.654	0.711	0.770	0.826	0.889	0.946	0.989
333	0.583	0.628	0.676	0.718	0.782	0.841	0.888
343	-	0.571	0.630	0.650	0.692	0.744	0.792
353	-	0.539	0.577	0.602	0.676	0.702	0.773
363	-	0.520	0.556	0.591	0.643	0.664	0.703
373	-	0.508	0.555	0.582	0.627	0.652	0.668
383	-	0.499	0.554	0.579	0.607	0.650	0.667
393	-	0.493	0.546	0.576	0.601	0.644	0.665
403	-	0.487	0.540	0.570	0.601	0.638	0.660
413	-	0.478	0.534	0.564	0.589	0.632	0.554
423	-	0.470	0.528	0.558	0.574	0.626	0.648
433	-	0.466	0.520	0.550	0.577	0.620	0.642
443	-	0.461	0.513	0.544	0.570	0.613	0.637

Обр.№1- H₂O; Обр.№2- (H₂O+0,5%TiO₂); Обр.№3- (H₂O+1,0% TiO₂); Обр. №4- (H₂O +1,5 % TiO₂); Обр.№5- (H₂O+2,0% TiO₂); Обр.№6- (H₂O+2,5% TiO₂); Обр.№7- (H₂O+3,0% TiO₂).

Таблица 3.12.- Влияние концентрации наночастиц (TiO_2) на изменение коэффициента динамической вязкости ($\eta, 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$) воды при различных температурах и давлении $p=19.61 \text{ МПа}$

Т,К	H ₂ O	Обр.№2	Обр.№3	Обр.№4	Обр.№5	Обр.№6	Обр.№7
273	2.016	2.053	2.066	2.091	2.108	2.123	2.138
283	1.234	1.622	1.731	1.758	1.826	1.842	1.926
293	1.229	1.357	1.486	1.256	1.586	1.685	1.738
303	1.025	1.138	1.210	1.284	1.382	1.451	1.534
313	0.881	0.970	1.012	1.088	1.164	1.224	1.239
323	0.764	0.833	0.879	0.948	1.011	1.068	1.111
333	0.693	0.750	0.798	0.840	0.904	0.963	1.089
343	-	0.693	0.732	0.772	0.814	0.866	0.914
353	-	0.661	0.699	0.724	0.796	0.824	0.895
363	-	0.642	0.688	0.713	0.765	0.786	0.825

373	-	0.630	0.677	0.704	0.749	0.774	0.790
383	-	0.621	0.676	0.701	0.729	0.772	0.789
393	-	0.615	0.668	0.698	0.725	0.766	0.787
403	-	0.609	0.662	0.692	0.723	0.760	0.782
413	-	0.600	0.656	0.686	0.711	0.754	0.676
423	-	0.592	0.650	0.680	0.696	0.748	0.674
433	-	0.588	0.642	0.672	0.699	0.742	0.662
443	-	0.583	0.635	0.666	0.692	0.735	0.659

Обр.№1- H₂O; Обр.№2- (H₂O+0,5%TiO₂); Обр.№3- (H₂O+1,0% TiO₂); Обр. №4- (H₂O +1,5 % TiO₂); Обр.№5- (H₂O+2,0% TiO₂); Обр.№6- (H₂O+2,5% TiO₂); Обр.№7- (H₂O+3,0% TiO₂).

Таблица 3.13.- Влияние концентрации наночастиц (TiO₂) на изменение коэффициента динамической вязкости ($\eta, 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$) воды при различных температурах и давлении p=29.34МПа

Т,К	H ₂ O	Обр.№2	Обр.№3	Обр.№4	Обр.№5	Обр.№6	Обр.№7
273	2.126	2.173	2.186	2.211	2.228	2.243	2.258
283	1.344	1.742	1.851	1.878	1.946	1.962	2.046
293	1.339	1.477	1.606	1.676	1.706	1.805	1.858
303	1.135	1.258	1.330	1.404	1.502	1.571	1.654
313	0.991	1.090	1.132	1.228	1.284	1.344	1.359
323	0.874	0.953	0.879	1.066	1.131	1.188	1.231
333	0.803	0.870	0.918	0.960	1.024	1.083	1.200
343	-	0.813	0.852	0.892	0.934	0.986	1.034
353	-	0.781	0.819	0.844	0.916	0.944	1.015
363	-	0.762	0.808	0.833	0.885	0.906	0.945
373	-	0.750	0.797	0.824	0.869	0.894	0.910
383	-	0.741	0.796	0.821	0.849	0.892	0.909
393	-	0.735	0.788	0.800	0.845	0.886	0.907
403	-	0.729	0.782	0.692	0.812	0.880	0.902
413	-	0.720	0.776	0.806	0.831	0.874	0.796
423	-	0.712	0.770	0.800	0.816	0.868	0.794
433	-	0.708	0.762	0.792	0.819	0.862	0.782
443	-	0.703	0.755	0.786	0.812	0.855	0.779

Обр.№1- H₂O; Обр.№2- (H₂O+0,5% TiO₂); Обр.№3- (H₂O+1,0% TiO₂); Обр. №4- (H₂O +1,5 % TiO₂); Обр.№5- (H₂O+2,0% TiO₂); Обр.№6- (H₂O+2,5% TiO₂); Обр.№7- (H₂O+3,0% TiO₂).

Таблица 3.14.- Влияние концентрации наночастиц (TiO₂) на изменение коэффициента динамической вязкости ($\eta, 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$) воды при различных температурах и давлении p=39.42МПа

Т,К	H ₂ O	Обр.№2	Обр.№3	Обр.№4	Обр.№5	Обр.№6	Обр.№7
273	2.236	2.293	2.306	2.331	2.348	2.363	2.378
283	1.454	1.862	1.935	1.998	2.006	2.082	2.166

293	1.449	1.597	1.726	1.496	1.826	1.925	1.978
303	1.245	1.378	1.450	1.524	1.622	1.691	1.774
313	1.101	1.210	1.452	1.348	1.404	1.464	1.479
323	0.984	1.073	0.999	1.186	1.251	1.308	1.351
333	0.913	0.990	1.038	1.080	1.344	1.283	1.320
343	-	0.933	0.972	1.012	1.054	1.106	1.154
353	-	0.901	0.939	0.964	1.036	1.064	1.135
363	-	0.882	0.928	0.953	1.005	1.026	1.065
373	-	0.870	0.917	0.944	0.989	1.014	1.030
383	-	0.861	0.916	0.941	0.969	1.012	1.029
393	-	0.855	0.908	0.920	0.965	1.006	1.027
403	-	0.849	0.902	0.812	0.932	1.001	1.022
413	-	0.840	0.896	0.926	0.951	0.994	0.916
423	-	0.832	0.890	0.920	0.936	0.988	0.914
433	-	0.828	0.882	0.912	0.939	0.982	0.902
443	-	0.823	0.875	0.906	0.932	0.975	0.899

Обр.№1- H₂O; Обр.№2- (H₂O+0,5%TiO₂); Обр.№3- (H₂O+1,0% TiO₂); Обр. №4- (H₂O + 1,5 % TiO₂); Обр.№5- (H₂O+2,0% TiO₂); Обр.№6- (H₂O+2,5% TiO₂); Обр.№7- (H₂O+3,0% TiO₂).

Таблица 3.15.- Влияние концентрации наночастиц (TiO₂) на изменение коэффициента динамической вязкости ($\eta, 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$) воды при различных температурах и давлении $p=49.01 \text{ МПа}$

Т,К	H ₂ O	Обр.№2	Обр.№3	Обр.№4	Обр.№5	Обр.№6	Обр.№7
273	2.346	2.403	2.416	2.441	2.458	2.473	2.488
283	1.564	2.082	2.155	2.218	2.226	2.302	2.386
293	1.559	1.707	1.836	1.960	1.936	2.035	2.088
303	1.355	1.488	1.560	1.634	1.732	1.801	1.884
313	1.211	1.320	1.562	1.468	1.514	1.574	1.589
323	1.094	1.183	1.109	1.996	1.361	1.418	1.461
333	1.023	1.102	1.148	1.190	1.454	1.393	1.430
343	-	1.043	1.082	1.122	1.164	1.216	1.264
353	-	1.011	1.049	1.074	1.146	1.174	1.245
363	-	0.992	1.038	1.063	1.115	1.136	1.175
373	-	0.980	1.029	1.054	1.099	1.124	1.140
383	-	0.971	1.026	1.051	1.079	1.122	1.139
393	-	0.965	1.018	1.030	1.075	1.116	1.137
403	-	0.959	1.012	0.922	1.042	1.111	1.132
413	-	0.950	1.006	1.036	1.061	1.050	1.026
423	-	0.942	1.001	1.030	1.046	1.098	1.024
433	-	0.938	0.992	1.022	1.049	1.092	1.012
443	-	0.933	0.985	1.016	1.042	1.085	1.009

Обр.№1- H₂O; Обр.№2- (H₂O+0,5% TiO₂); Обр.№3- (H₂O+1,0% TiO₂); Обр. №4- (H₂O + 1,5% TiO₂); Обр.№5- (H₂O+2,0% TiO₂); Обр.№6- (H₂O+2,5% TiO₂); Обр.№7- (H₂O+3,0% TiO₂).

Согласно таблицам 3.10-3.15 и рисунку 3.9 коэффициент динамической вязкости ($\eta, 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$) растворов, содержащих различную массовую концентрацию TiO₂ с ростом температуры уменьшается по закону гиперболы. Увеличение концентрации наночастиц диоксида титана также приводит к увеличению коэффициента динамической вязкости водных растворов диоксида титана, а также чистой воды [168-А, 178-А, 179-А, 180-А, 181-А, 184-А, 187-А, 189-А, 190-А].

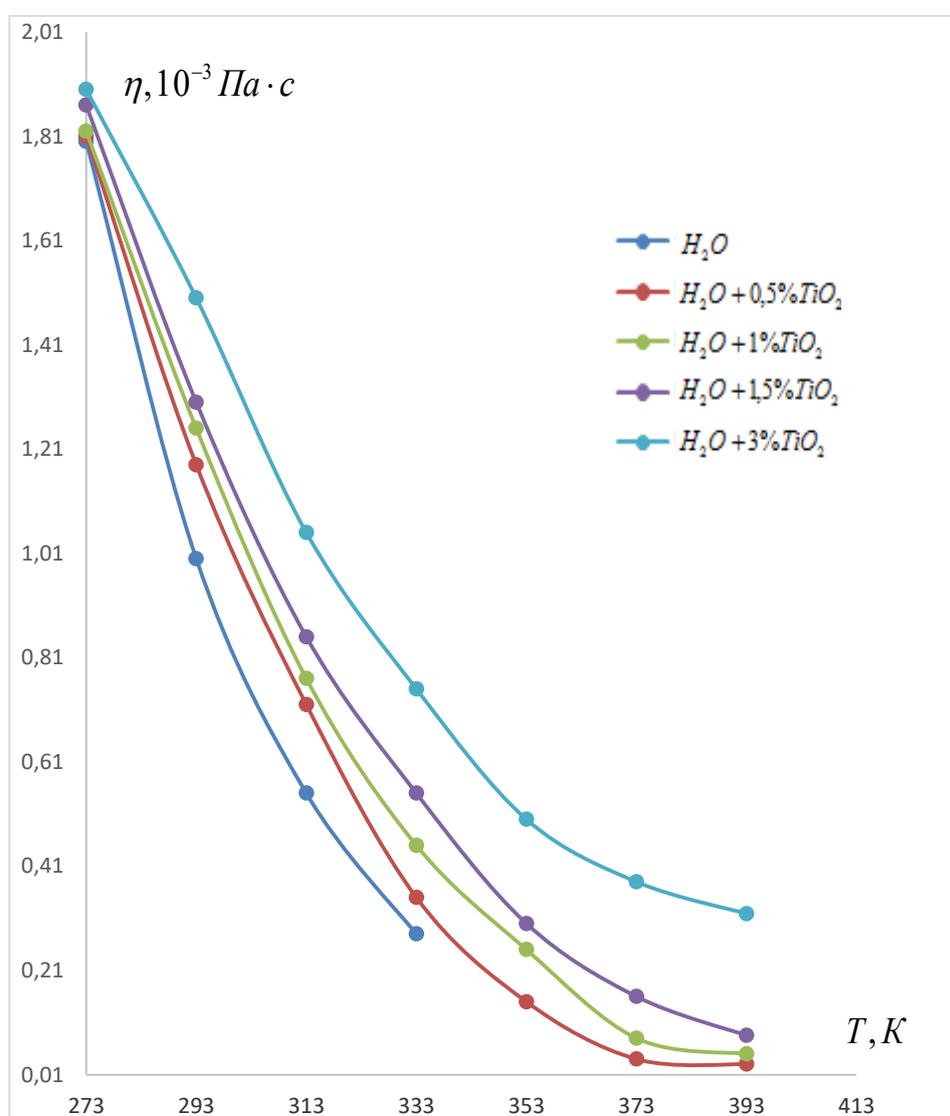


Рисунок 3.9. Влияние температуры и массовой концентрации наночастиц (TiO₂) на изменение коэффициента динамической вязкости воды.

На рисунках 3.10 и 3.11 представлена графическая зависимость изменения динамической вязкости от массовой концентрации наночастиц диоксида титана с изменением температуры при давлениях 29,34МПа и 49,01МПа.

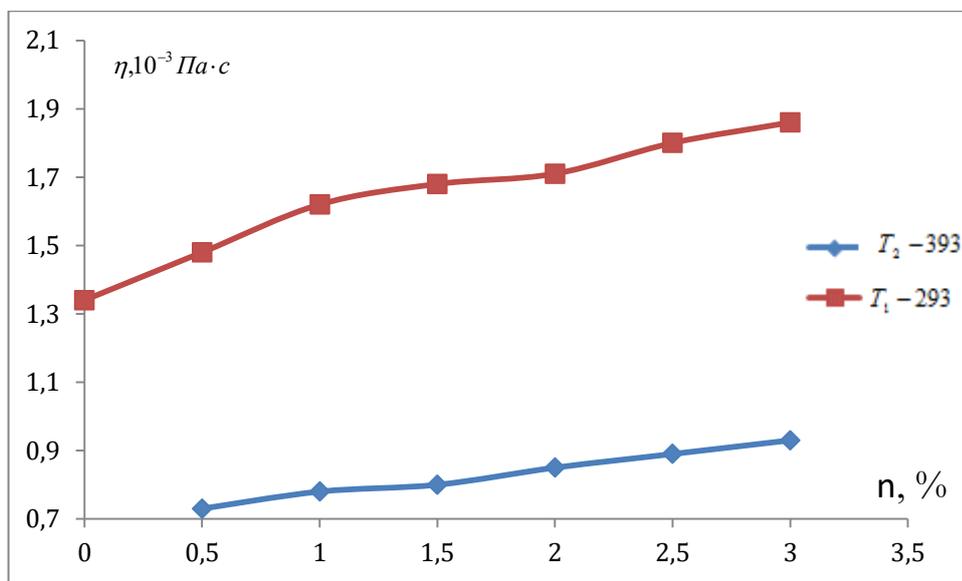


Рисунок 3.10. Зависимость коэффициента динамической вязкости водных растворов в зависимости от массовой концентрации наночастицы TiO_2 при давлении $P=29,34$ МПа и температурах $T_1=293$ К и $T_2=393$ К.

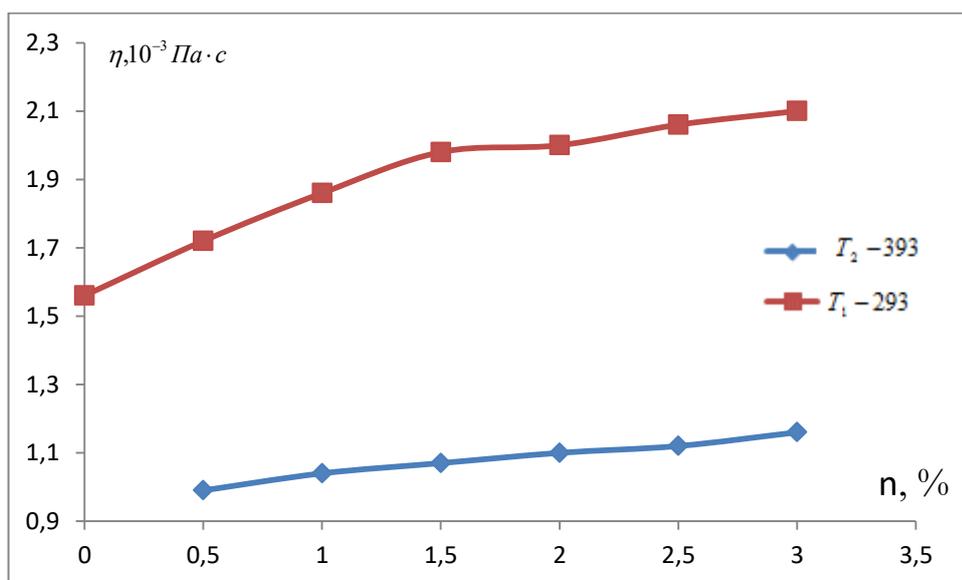


Рисунок 3.11. Зависимость коэффициента динамической вязкости водных растворов в зависимости от массовой концентрации наночастиц TiO_2 при давлении $P=49,01\text{МПа}$ и температуре $T_1=293\text{К}$ и $T_2=393\text{К}$.

Согласно 3.10 и 3.11 увеличение концентрации наночастиц диоксида титана повышает динамическую вязкость изучаемых растворов. Во время опытов с низкими температурами ($T_1=293\text{К}$) рост концентрации нанонаполнителя способствует росту динамической вязкости образцов, который изменяется нелинейно, а при более повышенных температурах ($T_2=393\text{К}$) это изменение происходит линейно [168-А, 178-А, 179-А, 180-А, 181-А, 184-А, 187-А, 189-А, 190-А].

Надо отметить, что в различных изобарах разность коэффициента динамической вязкости между водными растворами, содержащими различную массовую концентрацию TiO_2 почти одинаковое. На рисунках 3.10 и 3.11 на изобарах $29,34\text{МПа}$ и $49,01\text{МПа}$ разность коэффициента динамической вязкости, между изотермами $T_1=293\text{К}$ и $T_2=393\text{К}$, при массовой концентрации $0,5\%\text{TiO}_2$ и $3,0\%\text{TiO}_2$ соответственно составляет $\Delta\eta = \eta_{293} - \eta_{393} = 0,742 \cdot 10^{-3}\text{Па} \cdot \text{с}$ и $\Delta\eta = 0,951 \cdot 10^{-3}\text{Па} \cdot \text{с}$.

Таким образом, по мере роста концентрации наночастиц диоксида титана в образцах на соответствующих изобарах наблюдается рост разности их динамической вязкости.

Увеличение коэффициента динамической вязкости водных растворов с ростом массовой концентрации наночастиц диоксида титана связано с большим вкладом наночастиц в передачи импульса из одного изотермического слоя к другому в водных растворах содержащих различное количество TiO_2 [168-А, 178-А, 179-А, 180-А, 181-А, 184-А, 187-А, 189-А, 190-А].

Поэтому, чем больше будет массовая концентрация наночастиц диоксида титана в составе водных растворов, тем больше становится их коэффициент динамической вязкости.

Установили, что повышение давления способствует уменьшению степени влияния температуры на динамическую вязкость изучаемых растворов с различной массовой концентрацией нанонаполнителя.

Например, при изменении температуры от 273К до 333К коэффициент динамической вязкости воды при давлении $P=0,101\text{МПа}$ уменьшается на 73,83%, а для водных растворов содержащих 0,5% TiO_2 при давлении $P=0,101\text{МПа}$ уменьшается на 72,11%, при давлении $P=19,61\text{МПа}$ на 63,47%, при давлении $P=49,01\text{МПа}$ на 54,1%, а такое уменьшение в растворе содержащего 1,0% TiO_2 составляет при давлении $P=0,101\text{МПа}$ – 69,87%, при $P=19,61\text{МПа}$ – 61,37%, при $P=49,01\text{МПа}$ – 52,48% и для раствора содержащий 3,0% TiO_2 это изменение составляет при давлении $P=0,101\text{МПа}$ – 55,48%, при $P=9,81\text{МПа}$ – 50,78%, при $P=19,61\text{МПа}$ – 43,46%, при $P=49,01\text{МПа}$ – 40,07% [168-А, 178-А, 179-А, 180-А, 181-А, 184-А, 187-А, 189-А, 190-А].

Рост давления приводит к хорошему уплотнению молекул, что улучшает передачу импульса молекулой от одного изотермического слоя к другому, тем самым способствует снижению степени влияния температуры на изменение динамической вязкости опытных образцов [168-А, 178-А, 179-А, 180-А, 181-А, 184-А, 187-А, 189-А, 190-А].

Исследование показало, что чем больше будет диапазон изменения температуры, тем больше будет влияние давления на изменение коэффициента динамической вязкости водных растворов, содержащих различные массовые концентрации наночастиц диоксида титана. Например, в диапазоне изменения температуры (273 - 333)К при давлении $P=0,101\text{МПа}$ коэффициент динамической вязкости водных раствор содержащих 1,0% TiO_2 уменьшается на 69,78%, при давлении $P=19,61\text{МПа}$ – 61,37%, при давлении $P=49,01\text{МПа}$ – 52,48%, а в диапазон

температур $T=(273 - 443)K$ это уменьшение соответственно составляет при $P=9,81MPa - 73,61\%$, при $P=29,34MPa - 65,46\%$, при $P=49,01MPa - 59,23\%$ [168-А, 178-А, 179-А, 180-А, 181-А, 184-А, 187-А, 189-А, 190-А].

Чем больше будет диапазон изменения температуры, тем больше становится расстояние между молекулами водных растворов, содержащих различные массовые концентрации наночастиц диоксида титана и это является причиной большого уменьшения коэффициента динамической вязкости водных растворов, содержащих различные массовые концентрации наночастиц TiO_2 в большом диапазоне температур.

Установлено, что с ростом массовой концентрации наночастиц диоксида титана снижается степень влияния давления при изменении температуры на динамическую вязкость образцов исследования. Например, при изменении давления от $0,101MPa$ до $49,01MPa$, коэффициент динамической вязкости водных растворов содержащих $0,5\% TiO_2$ при температуре $T=333K$ увеличивается на $118,65\%$, при температуре $T=393K$ на $161,52\%$, а для водных растворов содержащих $1,5\% TiO_2$ увеличение коэффициента динамической вязкости при изменении давления от $0,101MPa$ до $49,01MPa$ при температурах $333K$ и $393K$ соответственно составляет $100,3\%$ и $127,88\%$, а такие изменения для водных растворов содержащих $3,0\% TiO_2$ соответственно составляет $87,17\%$ и $109,78\%$ [168-А, 178-А, 179-А, 180-А, 181-А, 184-А, 187-А, 189-А, 190-А].

С ростом массовой концентрации наночастиц диоксида титана в составе водных растворов взаимодействие между их молекулами увеличивается, что начинает препятствовать приближению молекул друг к другу под влиянием внешнего давления и переноса импульса с помощью молекулы от одного изотермического слоя к другому уменьшается, что соответственно приводит к снижению влияния внешнего давления на динамическую вязкость образцов в целом, не взирая на изменения температуры.

3.3. Аппроксимационные зависимости для расчета плотности и вязкости исследуемых растворов при атмосферном давлении и температуры

Аппроксимация и получение соответствующего уравнения для расчета плотности образцов при атмосферном давлении с учетом изменения температуры нами была выполнена следующим образом (рисунок 3.12.) [1-3,14,86,103,106,126,130,160-162,165], [167-А, 174-А, 176-А, 183-А, 185-А, 186-А, 190-А].

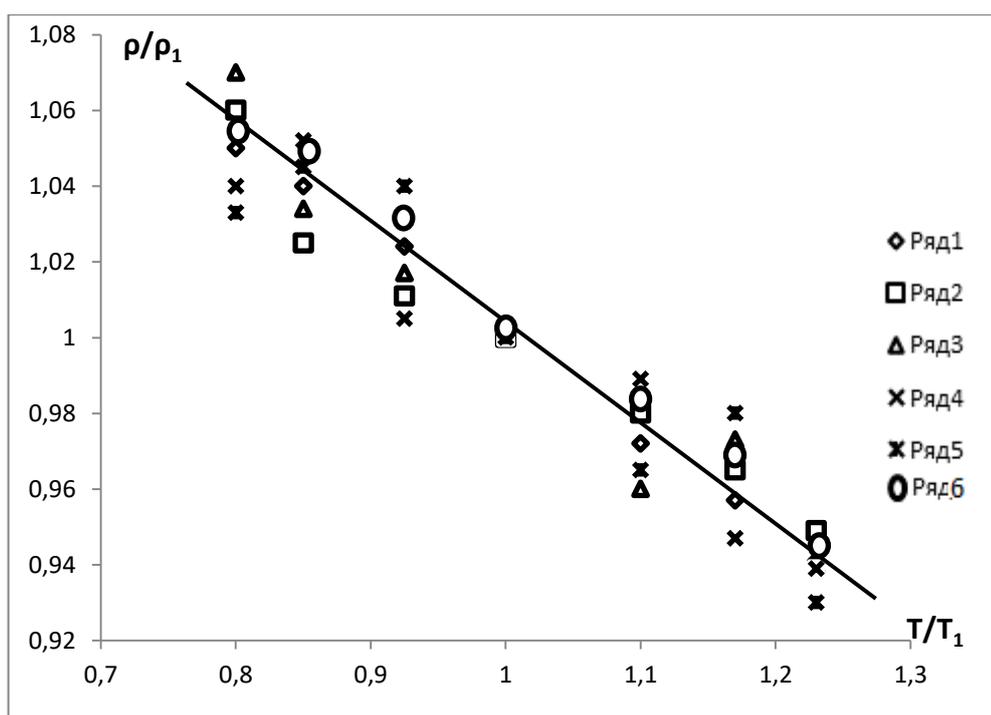


Рисунок 3.12. Зависимость относительной плотности от относительной температуры: *обр.№1* – ($H_2O + 0,5\%TiO_2$), *обр.№2* – ($H_2O + 1,0\%TiO_2$), *обр.№3* – ($H_2O + 1,5\%TiO_2$), *обр.№4* – ($H_2O + 2,0\%TiO_2$), *обр.№5* – ($H_2O + 2,5\% TiO_2$), *обр.№6* – ($H_2O + 3,0\%TiO_2$)

Прямая рисунка 3.12 описывается выражением [167-А, 170-А, 174-А, 175-А, 176-А, 182-А, 183-А, 185-А, 186-А]:

$$\frac{\rho}{\rho_1} = 1,45 - 0,245 \frac{T}{T_1}, \quad (3.2)$$

где $T_1=353K$.

С помощью выражения (3.2) можно рассчитать зависимость относительной плотности от относительной температуры в пределах погрешности опыта. Для расчета относительной плотности необходимо

иметь эмпирические данные плотности изучаемых жидких веществ (всех наножидкостей при температуре $T_1=353\text{K}$). Значение ρ_1 можно подбирать по таблицам 3.1 - 3.7 [167-А, 170-А, 174-А, 175-А, 176-А, 182-А, 183-А, 185-А, 186-А].

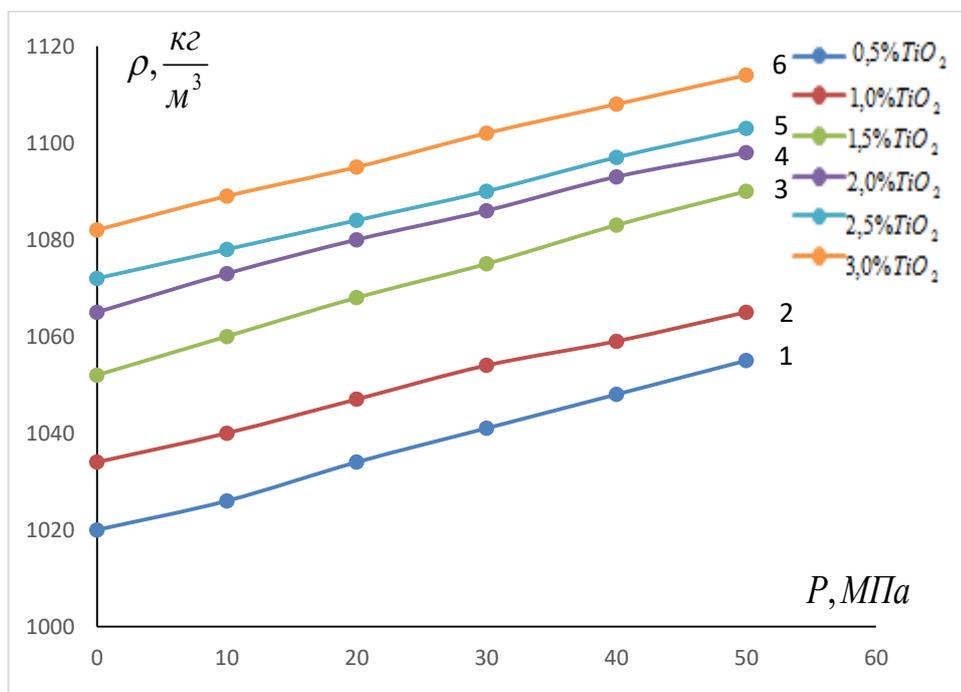


Рисунок 3.13. Зависимость плотности от давления и массовой концентрации TiO_2 при 293К: *обр.№1* – ($\text{H}_2\text{O} + 0,5\%\text{TiO}_2$), *обр.№2* – ($\text{H}_2\text{O} + 1,0\%\text{TiO}_2$), *обр.№3* – ($\text{H}_2\text{O} + 1,5\%\text{TiO}_2$), *обр.№4* – ($\text{H}_2\text{O} + 2,0\%\text{TiO}_2$), *обр.№5* ($\text{H}_2\text{O} + 2,5\%\text{TiO}_2$), *обр.№6* – ($\text{H}_2\text{O} + 3,0\%\text{TiO}_2$).

Эксперименты показали, что плотность зависит от внешне создаваемого давления (рисунок 3.13), с помощью грузопоршневого манометра МП-2500. Класс точности манометра соответствует 0,01%. Механизм изменения плотности растворов при изменении давления можно объяснить следующим образом [167-А, 170-А, 174-А, 175-А, 176-А, 182-А, 183-А, 185-А, 186-А]. В системе автоклава экспериментальной установки в начале, т.е. при атмосферном давлении $p=0,101$ МПа, объем воды и нанонаполнителя - диоксида титана остается постоянным, при изменении давления объем воды относительно ее объема при

атмосферном давлении уменьшается, который приводит к росту плотности растворов. Надо отметить, что объем нанонаполнителя при повышении давления остается постоянным. Этот механизм наблюдается также при другом изменении давления опыта. Влияние температуры на изменение плотности исследуемых наножидкостей можно объяснить следующим образом. При повышении температуры опыта увеличивается расстояние между молекулами воды также и расстояние между наночастицами, которые приводят к уменьшению плотности исследуемых водных растворов диоксида титана (элемент с эффектами памяти).

С целью получения аппроксимационных зависимостей по коэффициенту динамической вязкости исследуемых водных растворов диоксида титана, нами была использована следующая функциональная зависимость [160-162, 165], [179-А,180-А, 181-А, 184-А, 187-А, 189-А, 190-А]:

$$\frac{\eta}{\eta_1} = f\left(\frac{T}{T_1}\right) . \quad (3.3)$$

В выражении (3.3) значения принимаются из таблицы (3.10-3.15) и $T_1 = 333\text{K}$. Выполнимость функциональной зависимости (3.3) приведены в таблице 3.16 и описывается уравнением [168-А, 178-А, 179-А, 180-А, 181-А, 184-А, 187-А, 189-А, 190-А]:

$$\frac{\eta}{\eta_1} = a_i \left(\frac{T}{T_1}\right)^2 + b_i \left(\frac{T}{T_1}\right) + c_i. \quad (3.4)$$

Таблица 3.16.- Зависимость относительной динамической вязкости от относительной температуры для исследуемых водных растворов диоксида титана при различных температурах и давлении атмосферного воздуха

<i>Образец</i>	Н₂О в жидком фазе									
	0.82	0.85	0.88	0.90	0.92	0.95	0.97	1.00	-	-
<i>T/T₁</i>	0.82	0.85	0.88	0.90	0.92	0.95	0.97	1.00	-	-
<i>η/η₁</i>	3.69	2.88	2.13	1.79	1.53	1.27	1.12	1.0	-	-
<i>(η/η₁)</i>	3.76	2.89	2.19	1.81	1.52	1.21	1.09	1.04	-	-

<i>рас.</i>											
$\frac{\Delta\eta}{\eta_1} \cdot 100\%$	1.86	0.35	2.71	1.10	0.66	4.9	2.75	4.0	-	-	
	<i>Среднеквадратическая погрешность расчета по уравнению (3.4) равна 2.29%</i>										
Образец	H₂O+0,5% TiO₂										
T/T_1	0.82	0.85	0.90	0.95	1.00	1.05	1.10	1.15	1.20	-	
η/η_1	3.42	2.74	1.98	1.38	1.00	0.82	0.75	0.72	0.73	-	
(η/η_1)	3.31	2.79	2.04	1.43	1.00	0.78	0.72	0.71	0.74	-	
<i>рас.</i>											
$\frac{\Delta\eta}{\eta_1} \cdot 100\%$	3.2	1.82	3.03	3.62	0	4.87	4.0	1.39	1.37	-	
	<i>Среднеквадратическая погрешность расчета по уравнению (3.4) равна 2.59%</i>										
Образец	H₂O+1,0% TiO₂										
T/T_1	0.82	0.85	0.90	0.95	1.00	1.05	1.10	1.15	1.20		
η/η_1	3.28	2.80	1.96	1.35	0.99	0.82	0.70	0.68	0.82		
(η/η_1)	3.20	2.70	1.98	1.41	1.00	0.77	0.66	0.67	0.84		
<i>рас.</i>											
$\frac{\Delta\eta}{\eta_1} \cdot 100\%$	2.43	0.71	1.02	4.44	1.01	6.09	5.71	1.47	2.44		
	<i>Среднеквадратическая погрешность расчета по уравнению (3.4) равна 2.81%</i>										
Образец	H₂O+1,5% TiO₂										
T/T_1	0.82	0.85	0.90	0.95	0.97	1.00	1.05	1.10	1.15	1.20	
η/η_1	3.04	2.63	1.93	1.38	1.21	1.00	0.82	0.78	0.776	0.77	
(η/η_1)	2.99	2.54	1.89	1.38	1.21	1.00	0.79	0.74	0.73	0.80	
<i>рас.</i>											
$\frac{\Delta\eta}{\eta_1} \cdot 100\%$	1.67	3.50	1.80	0	0	0	3.66	5.13	5.91	3.89	
	<i>Среднеквадратическая погрешность расчета по уравнению (3.4) равна 2.56%</i>										
Образец	H₂O+2,0% TiO₂										
T/T_1	0.82	0.85	0.90	0.95	0.98	1.00	1.05	1.10	1.15	1.18	
η/η_1	2.78	2.44	1.92	1.40	1.16	0.98	0.81	0.77	0.73	0.71	
(η/η_1)	2.77	2.42	1.86	1.39	1.17	0.99	0.79	0.76	0.74	0.69	
<i>рас.</i>											
$\frac{\Delta\eta}{\eta_1} \cdot 100\%$	0.18	0.82	3.12	0.71	1.02	1.01	2.47	1.29	1.37	2.82	
	<i>Среднеквадратическая погрешность расчета по уравнению (3.4) равна 1.48%</i>										
Образец	H₂O+2,5% TiO₂										

T/T_1	0.82	0.85	0.90	0.95	0.97	1.00	1.05	1.10	1.15	1.18
η/η_1	2.59	2.28	1.77	1.29	1.14	0.99	0.82	0.75	0.73	0.72
$(\eta/\eta_1)_{рас}$	2.61	2.25	1.73	1.31	1.18	1.01	0.79	0.71	0.71	0.76
$\frac{\Delta\eta}{\eta_1} \cdot 100\%$	0.77	0.13	0.23	0.16	3.51	2.02	3.66	5.33	2.74	5.56
	<i>Среднеквадратическая погрешность расчета по уравнению (3.4) равна 2.41%</i>									
Образец	H₂O+3,0% TiO₂									
T/T_1	0.82	0.85	0.90	0.95	0.97	1.00	1.05	1.08	1.10	1.20
η/η_1	2.45	2.20	1.76	1.31	1.12	1.01	0.80	0.75	0.72	0.78
$(\eta/\eta_1)_{рас.}$	2.49	2.16	1.69	1.30	1.16	1.01	0.81	0.74	0.71	0.79
$\frac{\Delta\eta}{\eta_1} \cdot 100\%$	1.6	1.85	4.14	0.77	3.45	3.00	0.12	1.35	1.41	1.26
	<i>Среднеквадратическая погрешность расчета по уравнению (3.4) равна 1.89%</i>									

Используя вычисленные значения таблицы 3.16, метод наименьших квадратов и программу Excel, рассчитали коэффициенты уравнения в виде параболы, которые для всех исследуемых растворов системы (H₂O+TiO₂) как в чистом виде, так и с добавлением до 3,0% диоксида титана при различных температурах и атмосферном давлении. Значение коэффициентов a_i, b_i, c_i представлены в виде таблицы ниже (таблица 3.17).

Таблица 3.17. Значения коэффициентов аппроксимационной зависимости (3.5) для исследуемых водных растворов диоксида титана

Образец	H₂O в жидкой фазе		
Коэффициенты	a_i	b_i	c_i
	92.017	-182.525	91.558
Образец	H₂O+0,5% TiO₂		
Коэффициенты	31.043	-69.24	39.215
Образец	H₂O+1,0% TiO₂		
Коэффициенты	30.031	-66.885	37.854
Образец	H₂O+1,5% TiO₂		
Коэффициенты	26.541	-59.384	33.843

Образец	H₂O+2,0% TiO₂		
Коэффициенты	22.899	-51.526	29.669
Образец	H₂O+2,5% TiO₂		
Коэффициенты	20.851	-46.845	72.003
Образец	H₂O+3,0% TiO₂		
Коэффициенты	18.853	-42.566	24.723

Анализ значений коэффициента динамической вязкости (η_1) исследуемых водных растворов диоксида титана показал, что они являются функциями концентрации нанонаполнителя (таблица 3.18) [179-А, 181-А, 184-А, 189-А, 190-А]:

$$\eta_1 = A \cdot (n_{TiO_2})^2 + B \cdot n_{TiO_2} + C. \quad (3.5)$$

Значение коэффициентов А, В, С приведены ниже в таблице 3.18.

Таблица 3.18.- Зависимость коэффициента динамической вязкости (η_1) исследуемых водных растворов от концентрации диоксида титана и вычисленных значений по аппроксимационной зависимости (3.5)

Концентрации TiO₂, %	0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
$\eta_1, 10^{-3}$ Па·с (экс.)	0.469	0.505	0.545	0.594	0.628	0.715	0.779
$\eta_1, 10^{-3}$ Па·с (рас.)	0.482	0.507	0.542	0.574	0.642	0.706	0.780
$\delta_\eta, \%$	2.69	0.38	0.55	2.73	1.40	1.27	1.28
	<i>Среднеквадратическая погрешность расчета по уравнению (3.5) равна 1.39%</i>						
Коэффициенты	<i>A</i>		<i>B</i>		<i>C</i>		
	1,942 · 10 ⁻⁵ Па·с		4,137 · 10 ⁻⁵ Па·с		4,815 · 10 ⁻⁴ Па·с		

Выводы по третьей главе

1. В данной главе приводятся результаты опытно-теоретических исследований таких важных параметров как плотность, коэффициент динамической вязкости растворов не только при давлении атмосферного воздуха, но и при высоких параметрах состояния.

2. **Впервые** на основе экспериментальных данных и теории подобия на программе Matlab и Excele получены аппроксимационные выражения, используемые для численного определения плотности и динамической вязкости перечисленных образцов при атмосферном давлении с учетом изменения температуры.

3. **Установлено**, что с повышением температуры плотность исследуемых растворов, содержащих разные массовые концентрации наночастиц диоксида титана, уменьшается по линейному закону, а с ростом давления растет.

4. **Показано**, что с ростом массовой концентрации наночастиц диоксида титана в составе исследуемых растворов их плотность увеличивается и влияние температуры на изменение их плотности растет, что связано ростом массы исследуемых растворов в единицу их объема и ростом межмолекулярного расстояния.

5. **Установлено**, что с ростом давления влияние температуры на изменение плотности исследуемых водных растворов, содержащих различные массовые концентрации диоксида титана, уменьшается, что связано с хорошим уплотнением молекул исследуемых растворов с ростом давления.

6. **Установлено**, что с ростом температуры влияние давления на изменение плотности растворов, содержащих различные массовые концентрации TiO_2 увеличивается, что связано увеличением расстояния между молекулами, с повышением температуры и, наоборот, приближением молекул друг к другу под действием внешнего давления в водных растворах.

7. **Показано**, что плотность образцов с различным содержанием диоксида титана при температуре $T=433\text{K}$ и изменении давления от 9,81МПа до 49,01МПа увеличивается почти одинаково (приблизительно на 3,0%), что свидетельствует о том, что не взирая на концентрацию диоксида титана в составе изучаемых образцов, взаимодействие молекул в них при высоких температурах отличается не значительно.

8. *Установлено*, что коэффициент динамической вязкости водных растворов, содержащих различные массовые концентрации TiO_2 с ростом температуры уменьшается по параболическому закону.

9. *Установлено*, что с ростом массовой концентрации наночастиц диоксида титана коэффициент динамической вязкости водных растворов увеличивается.

10. *Показано*, что в различных изобарах разность коэффициента динамической вязкости между водными растворами, содержащими различные массовые концентрации TiO_2 почти одинаковое.

11. *Установлено*, что увеличением динамической вязкости водных растворов с ростом массовой концентрации наночастиц диоксида титана связано с большим вкладом наночастиц в передаче импульса от одного изотермического слоя к другому.

12. *Показано*, что с ростом давления влияние температуры на изменение коэффициента динамической вязкости водных растворов, содержащих различные массовые концентрации наночастиц диоксида титана, уменьшается, что связана с хорошим уплотнением молекул исследуемых объектов с ростом давления.

13. *Установлено*, что чем больше будет диапазон изменения температуры, тем больше будет влияние давления на изменение коэффициента динамической вязкости водных растворов, содержащих различные массовые концентрации наночастиц диоксида титана, что связано с увеличением расстояния между молекулами водных растворов.

14. Показано, что с ростом массовой концентрации диоксида титана в образцах влияние давления на их коэффициент динамической вязкости при различных температурах уменьшается.

Глава 4. ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПО ПЛОТНОСТИ ИССЛЕДУЕМЫХ РАСТВОРОВ СИСТЕМЫ (H₂O+TiO₂) И УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ. РАСЧЕТ КАЛОРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РАСТВОРОВ

4.1. Расчет разности теплоемкостей системы (H₂O + TiO₂) при различных температурах и атмосферном давлении

Для расчёта разности теплоемкостей газов, жидкостей и растворов при различных температурах, давлениях использована следующее выражение [1, 20, 21, 86, 88-90, 127, 128], [170-А, 176-А, 183-А, 185-А].

$$C_P - C_V = \frac{\alpha_P^2 T}{\beta_T \rho}, \left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}} \right) \quad (4.1)$$

где α_P – коэффициент изобарического расширения, (1/К); β_T – изотермический коэффициент сжимаемости (1/Па); ρ – плотность (кг/м³) при различных температурах (293-353) К и давлениях (9,81-49,01) МПа.

Для расчета разности теплоемкостей ($C_P - C_V$) исследуемых водных растворов (H₂O + TiO₂) нами были использованы экспериментальные данные по плотности и расчетные данные по α_P , β_T , (табл.3.1-3.7 и рисунки 3.1-3.7).

4.2. Расчет разности теплоемкостей исследуемых растворов при различных температурах и давлениях

Впервые нами была определена разность теплоемкостей растворов системы (H₂O+TiO₂) в зависимости от температуры и давления согласно формулы [1, 20, 21, 86, 88-90, 99, 100, 127, 128], [167-А, 170-А, 174-А, 176-А, 183-А, 185-А]:

$$C_P - C_V = \frac{\alpha_P^2 T}{\beta_T \rho}, \left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}} \right). \quad (4.2)$$

где ($C_P - C_V$) – разность теплоемкостей (Дж/кг.К); α_P – коэффициент изобарического расширения (1/К); β_T – изотермический коэффициент сжимаемости (1/Па); Т- температура К; ρ – плотность (кг/м³).

Результата расчета $C_p - C_V$ приведено в таблица 4.1 – 4.9 и характер их изменения в зависимости от давления и температуры показана на рис. 4.1 – 4.8 [174-А, 175-А, 183-А, 186-А, 190-А].

Таблица 4.1.- Разности теплоемкостей ($C_p - C_V$), $\frac{\text{Дж}}{(\text{кг}\cdot\text{К})}$ водных растворов диоксида титана при различных его концентрациях, давлениях (9,81-32,24) МПа и температуре 293 К

Растворы	Р, МПа			
	9,81	19,62	29,43	39,24
Обр. № 1	51	49	37	27
Обр. № 2	58	52	50	48
Обр. № 3	95	83	73	66
Обр. № 4	138	125	110	90
Обр. № 5	170	162	150	142
Обр. № 6	195	183	175	163
Обр. № 7	220	206	200	190

Образец № 1 – (H_2O); Образец № 2 – ($H_2O + 0,5\% TiO_2$); Образец № 3 – ($H_2O + 1,0\% TiO_2$); Образец № 4 – ($H_2O + 1,5\% TiO_2$); Образец № 5 – ($H_2O + 2,0\% TiO_2$); Образец № 6 – ($H_2O + 2,5\% TiO_2$); Образец № 7 – ($H_2O + 3,0\% TiO_2$);

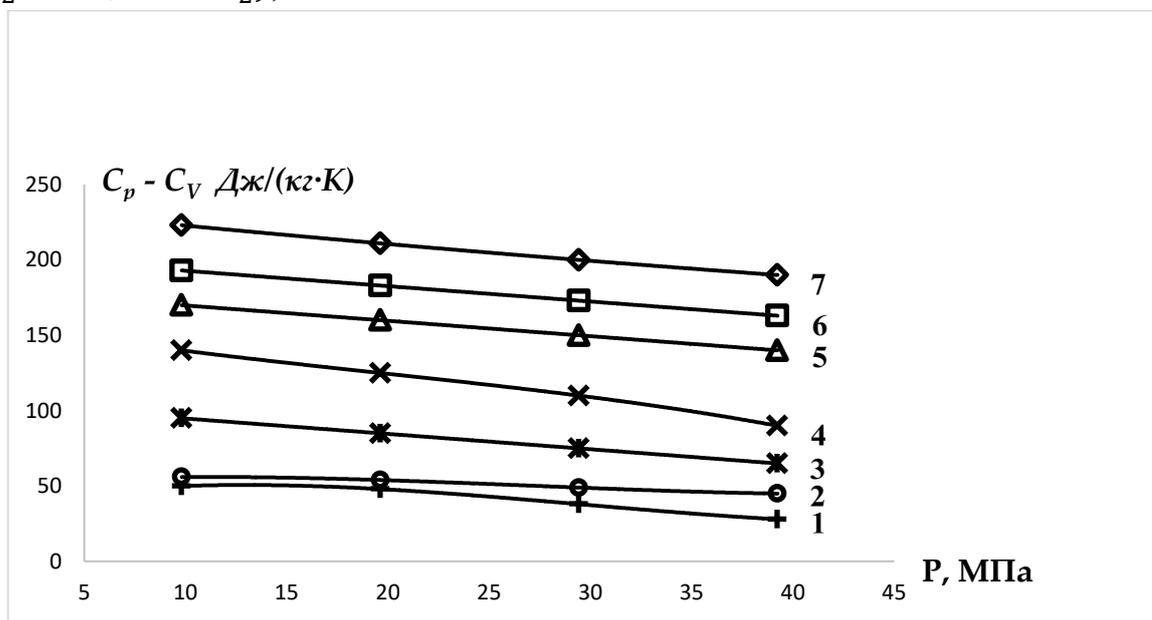


Рисунок 4.1- Разность теплоемкостей ($C_p - C_V$) исследуемых растворов в зависимости от давления при температуре 293К:1-Обр.№1, 2-Обр.№2, 3-Обр.№3, 4-Обр.№4, 5-Обр.№5, 6-Обр.№6, 7-Обр.№7

Таблица 4.2.- Разность теплоемкостей $(C_p - C_v), \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$ (H_2O) при различных температурах (293-443) К и давлениях (9,81-39,24) МПа

Р, МПа \ Т, К	9,81	19,62	29,43	39,24
293	50	45	35	26
303	51	46	37	28
313	52	47	39	29
333	55	50	42	32
353	57	52	44	34
373	60	58	47	37
393	63	56	50	39
413	66	60	52	42
433	69	62	55	44
453	70	63	58	45

Таблица 4.3. - Разность теплоемкостей $(C_p - C_v), \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$ растворов системы ($H_2O + 0,5\%TiO_2$) при различных температурах и давлениях

Р, МПа \ Т, К	9,81	19,62	29,43	39,24
293	58	53	49	46
313	60	57	51	49
333	63	61	54	52
353	68	64	57	55
373	70	65	60	58
393	73	66	64	61
413	77	72	67	64
433	80	74	70	67
453	83	78	73	70

Таблица 4.4.- Зависимость разностей теплоемкостей $(C_p - C_v), \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$ ($H_2O + 1,0\%TiO_2$) при различных температурах (293-453) К и давлениях (9,81-39,24) МПа

$P, \text{МПа}$ $T, \text{К}$	9,81	19,62	29,43	39,24
293	94	82	73	67
313	98	84	76	69
333	100	87	78	72
353	103	90	80	74
373	106	93	83	77
393	109	98	88	79
413	112	101	89	82
433	115	104	90	84
453	117	106	94	88

Таблица 4.5.-Разность теплоемкостей $(C_p - C_v), \frac{\text{Дж}}{\text{кг.К}}$, образца ($\text{H}_2\text{O} + 1,5\%\text{TiO}_2$) при различных температурах и давлениях

$P, \text{МПа}$ $T, \text{К}$	9,81	19,62	29,43	39,2
293	138	123	110	90
313	139	126	112	92
333	140	127	113	93
353	142	129	114	95
373	144	130	115	97
393	145	132	117	99
413	147	134	119	101
433	148	137	120	103
453	150	138	122	104

Таблица 4.6.- Разность теплоемкостей $(C_p - C_v), \frac{\text{Дж}}{\text{кг.К}}$, образца 5 ($\text{H}_2\text{O} + 2,0\% \text{TiO}_2$) при различных температурах и давлениях

$P, \text{МПа}$ $T, \text{К}$	9,81	19,62	29,43	39,2
293	170	162	151	142
313	172	163	152	144
333	173	164	153	145
353	175	165	154	146
373	176	166	156	147
393	177	167	157	148
413	179	169	158	150
433	180	170	159	151
453	183	171	160	152

Таблица 4.7.- Разность теплоемкостей $(C_p - C_v), \frac{\text{Дж}}{\text{кг.К}}$, образца 6 ($H_2O + 2,5 \%TiO_2$) при различных температурах и давлениях

Р,МПа Т, К	9,81	19,62	29,43	39,2
293	195	183	175	163
313	196	185	176	166
333	198	186	177	167
353	199	187	180	169
373	201	189	181	170
393	203	191	183	172
413	204	192	184	173
433	205	194	186	175
453	206	196	187	177

Таблица 4.8.- Разность теплоемкостей $(C_p - C_v), \frac{\text{Дж}}{\text{кг.К}}$, образца 7 ($H_2O + 3,0 \%TiO_2$) при различных температурах и давлениях

Р,МПа Т, К	9,81	19,62	29,43	39,2
293	220	206	200	190
313	221	207	201	191
333	223	209	203	193
353	224	210	204	194
373	227	211	205	195
393	228	213	206	197
413	230	214	207	198
433	231	216	208	199
453	233	218	209	201

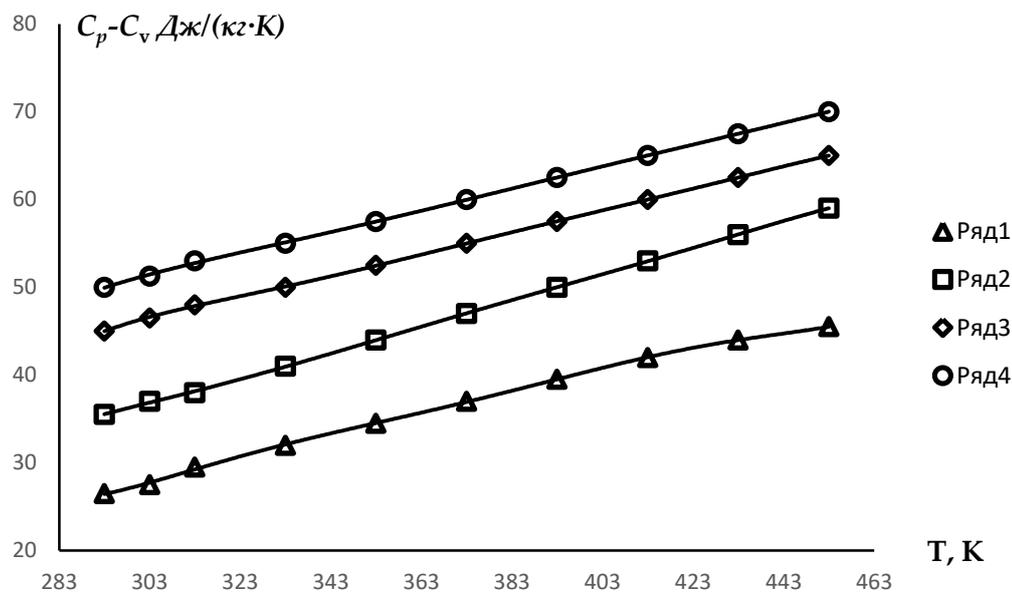


Рисунок 4.2- Зависимость разности теплоёмкостей ($C_p - C_v$) воды (H_2O) от температуры и давления: 1-9,81МПа; 2-19,62МПа; 3-29,43МПа; 4-39,24МПа.

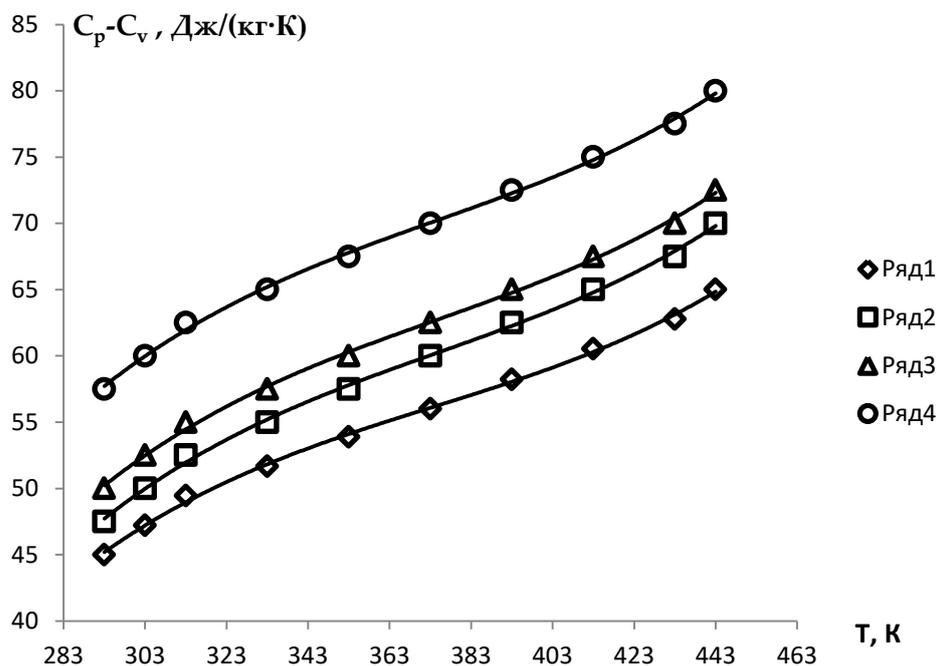


Рисунок 4.3- Зависимость разности теплоёмкостей ($C_p - C_v$), обр. №2 ($H_2O + 0,5\%TiO_2$) при различных температурах (293–453) К и давлениях (9,81–39,24) МПа: 1-9,81МПа; 2-19,62МПа; 3-29,43МПа; 4-39,24МПа.

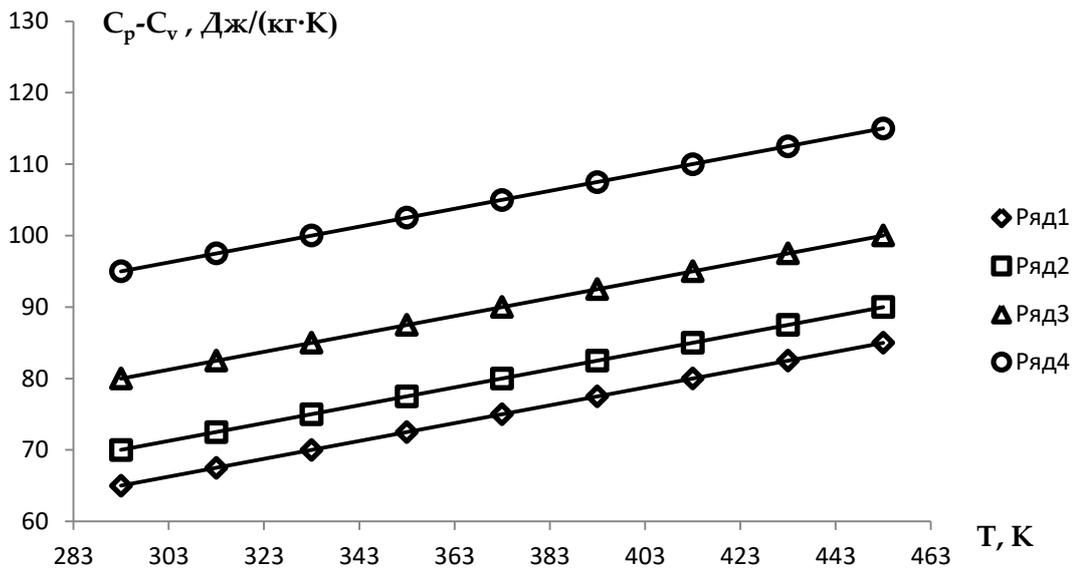


Рисунок 4.4- Разность теплоёмкостей ($C_p - C_v$), *обр.№3*($H_2O + 1,0\%TiO_2$) при различных температурах (293– 453) К и давлениях (9,81–39,24) МПа: 1- 9,81МПа; 2-19,62МПа; 3-29,43МПа; 4-39,24МПа.

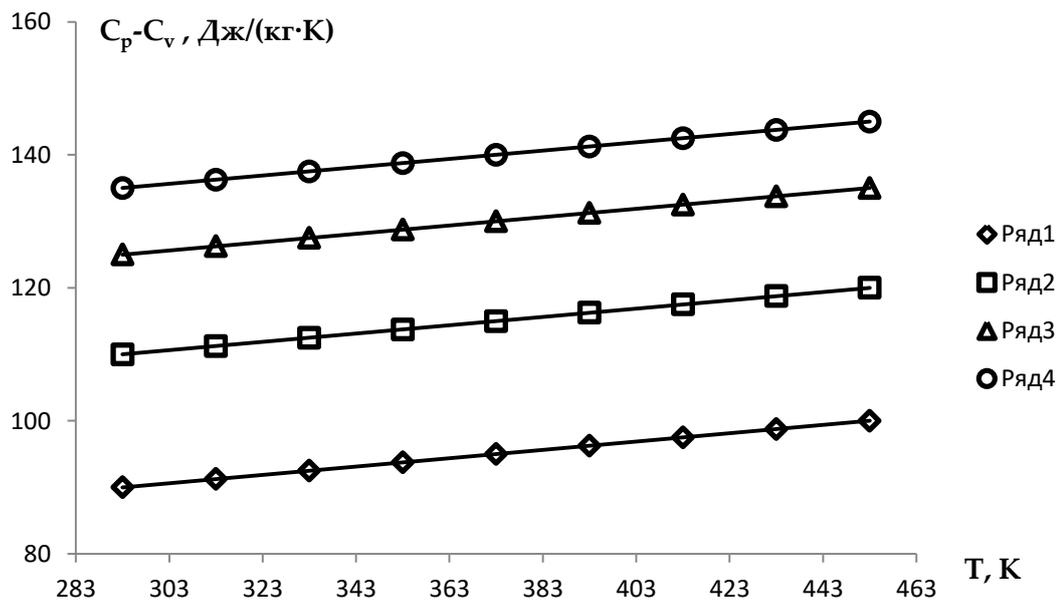


Рисунок 4.5- Разность теплоёмкостей ($C_p - C_v$), *обр.№4*($H_2O + 1,5\%TiO_2$) при различных температурах (293– 453) К и давлениях (9,81–39,24) МПа: 1- 9,81МПа; 2-19,62МПа; 3-29,43МПа; 4-39,24МПа.

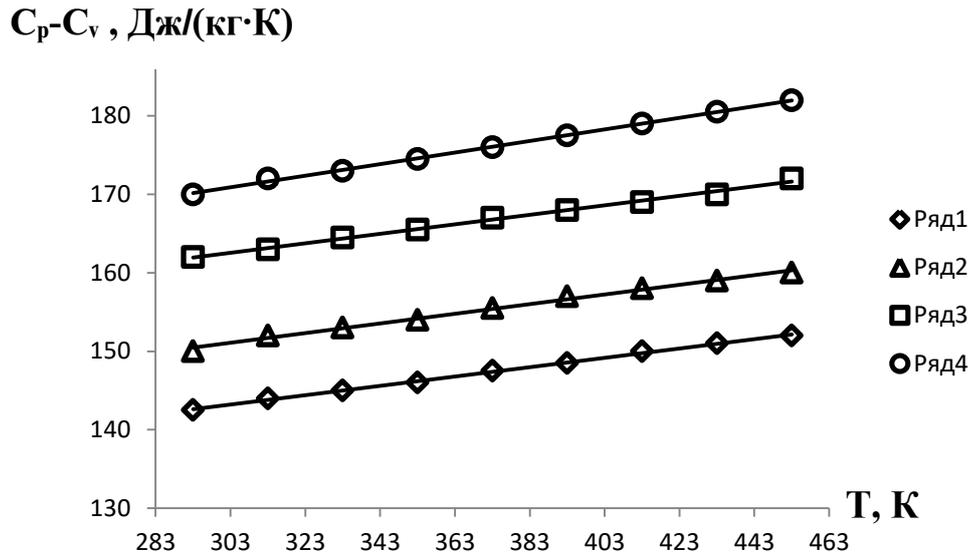


Рисунок 4.6- Разность теплоёмкостей ($C_p - C_v$),, *обр.№5*($H_2O + 2,0\%TiO_2$) при различных температурах (293 – 453) К и давлениях (9,81 – 39,24) МПа: 1-9,81МПа; 2-19,62МПа; 3-29,43МПа; 4-39,24МПа.

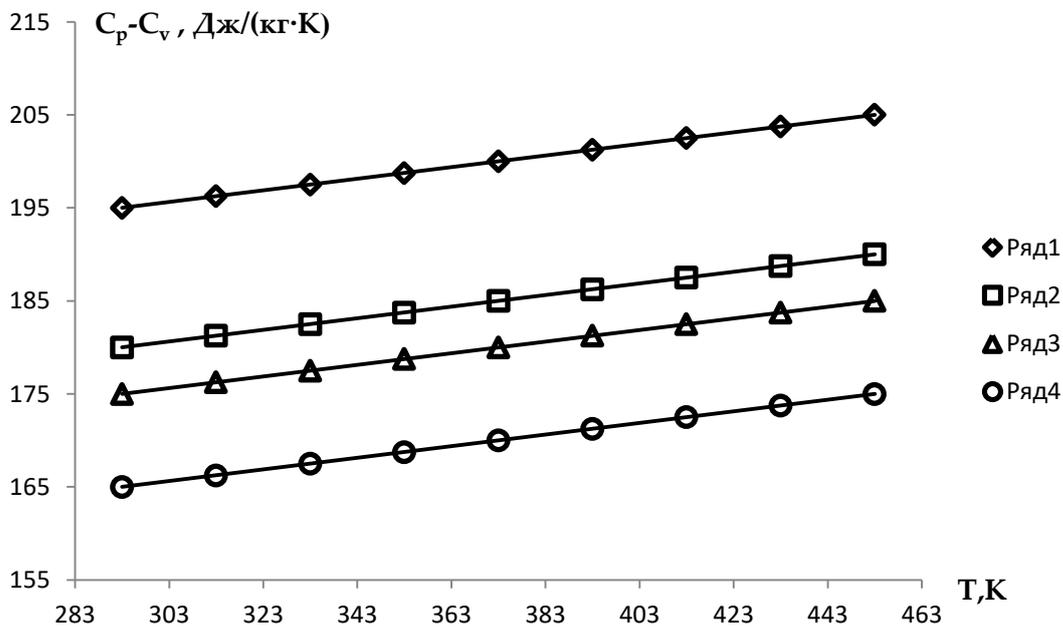


Рисунок 4.7- Разность теплоёмкостей ($C_p - C_v$),, *обр.№6*($H_2O + 2,5\%TiO_2$) при различных температурах (293 – 453) К и давлениях (9,81 – 39,24) МПа: 1-9,81МПа; 2-19,62МПа; 3-29,43МПа; 4-39,24МПа.

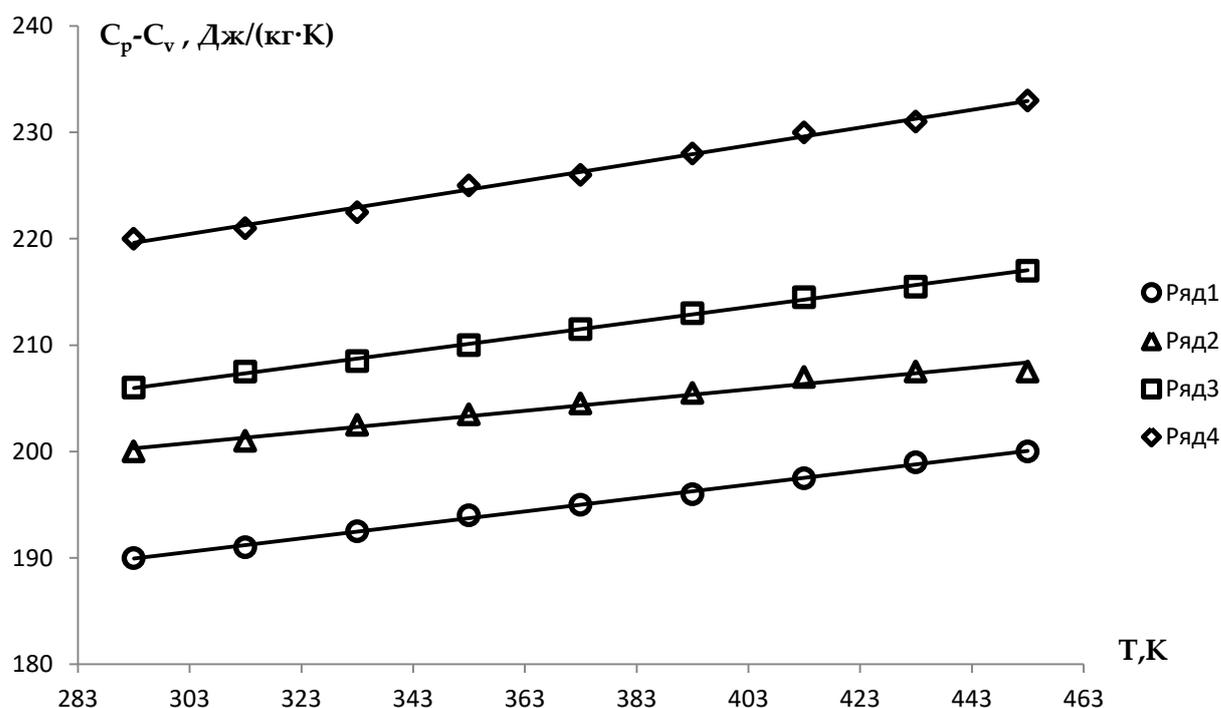


Рисунок 4.8- Разность теплоёмкостей ($C_p - C_v$),, *обр.№7*($H_2O + 3,0\%TiO_2$) при различных температурах (293–453) К и давлениях (9,81–39,24) МПа: 1-9,81МПа; 2-19,62МПа; 3-29,43МПа; 4-39,24МПа.

Ниже приводятся результаты численных расчетов разности теплоёмкостей ($C_p - C_v$), $\frac{Дж}{кг \cdot К}$, растворов при различных температурах (293 – 453) К и давлениях (9,81–39,24) МПа.

Образец № 1 ($H_2O + 0,5\%TiO_2$), $P = 9,81$ МПа; $T = 293$ К;

$$C_p - C_v = \frac{\alpha_p^2 T}{\beta_T \rho} = \frac{(0,39)^2 \cdot 293}{0,71 \cdot 10^{-9} \cdot 1028} = \frac{44,57 \cdot 10^{-6}}{729,9 \cdot 10^{-9}} = 0,061 \cdot 10^3, \frac{Дж \cdot м}{кг} = 61 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К});$$

$P = 19,61$ МПа; Образец № 2 ($H_2O + 1,0\%TiO_2$)

$$C_p - C_v = \frac{\alpha_p^2 T}{\beta_T \rho} = \frac{(0,39 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 293}{0,17 \cdot 10^{-9} \cdot 1046} = \frac{44,57 \cdot 10^{-6}}{502,1 \cdot 10^{-9}} = 0,0888 \cdot 10^3 = 88,8 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К});$$

$P = 29,43$ МПа; Образец № 3 ($H_2O + 1,5\%TiO_2$)

$$C_p - C_v = \frac{\alpha_p^2 T}{\beta_T \rho} = \frac{(0,66 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 293}{0,57 \cdot 10^{-9} \cdot 1073} = \frac{127,6 \cdot 10^{-6}}{611,6 \cdot 10^{-9}} = 0,2086 \cdot 10^3 = 208,6 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К});$$

$P = 39,24$ МПа; Образец № 4 ($H_2O + 2,0\%TiO_2$)

$$C_P - C_V = \frac{\alpha_P^2 T}{\beta_T \rho} = \frac{(0,68 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 293}{0,57 \cdot 10^{-9} \cdot 1082} = \frac{135,5 \cdot 10^{-6}}{616,7 \cdot 10^{-9}} = 219,7 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К});$$

$P = 49,01$ МПа; Образец № 5 ($H_2O + 2,5\%TiO_2$)

$$C_P - C_V = \frac{\alpha_P^2 T}{\beta_T \rho} = \frac{(0,65 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 293}{0,47 \cdot 10^{-9} \cdot 1096} = \frac{123,8 \cdot 10^{-6}}{515,1 \cdot 10^{-9}} = 240,3 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К});$$

Образец №1 $T = 313$ К;

$$C_P - C_V = \frac{\alpha_P^2 T}{\beta_T \rho} = \frac{(0,23 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 313}{0,72 \cdot 10^{-9} \cdot 990} = \frac{0,0529 \cdot 10^{-6} \cdot 313}{729,9 \cdot 10^{-9}} = 22,9 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

Образец №1 $P = 19,62$ МПа

$$C_P - C_V = \frac{\alpha_P^2 T}{\beta_T \rho} = \frac{(0,50 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 313}{0,69 \cdot 10^{-9} \cdot 1016} = \frac{78,25 \cdot 10^{-6}}{701,04 \cdot 10^{-9}} = 111,6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

Образец №1 $P = 29,43$ МПа

$$C_P - C_V = \frac{\alpha_P^2 T}{\beta_T \rho} = \frac{(0,58 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 313}{0,69 \cdot 10^{-9} \cdot 1112} = \frac{105,3 \cdot 10^{-6}}{667,2 \cdot 10^{-9}} = 157,8 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

Образец №1 $P = 39,24$ МПа

$$C_P - C_V = \frac{\alpha_P^2 T}{\beta_T \rho} = \frac{(0,48 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 313}{0,55 \cdot 10^{-9} \cdot 1117} = \frac{72,11 \cdot 10^{-6}}{614,35 \cdot 10^{-9}} = 117,4 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

Образец №1 $P = 49,01$ МПа

$$C_P - C_V = \frac{\alpha_P^2 T}{\beta_T \rho} = \frac{(0,4 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 313}{0,5 \cdot 10^{-9} \cdot 1124} = \frac{50,08 \cdot 10^{-6}}{562 \cdot 10^{-9}} = 89,11 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

Таблица 4.9. - Разность теплоемкостей $(C_p - C_v) \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$ исследуемых растворов системы $(\text{H}_2\text{O} + \text{TiO}_2)$ при давлении 19,62 МПа и различных массовой концентрации TiO_2 при $T = 293\text{К}$

Образец № 1 (H_2O)		
	$(C_p - C_v) \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$	
	50	
Образец № 2 ($\text{H}_2\text{O} + 0,5\%\text{TiO}_2$)		
$P = 19,62 \text{ МПа}$	$(C_p - C_v) \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$	
	45	
Образец № 3 ($\text{H}_2\text{O} + 1,0\%\text{TiO}_2$)		
$P = 19,62 \text{ МПа}$	$(C_p - C_v) \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$	
	82	
Образец № 4 ($\text{H}_2\text{O} + 1,5\%\text{TiO}_2$)		
$P = 19,62 \text{ МПа}$	$(C_p - C_v) \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$	
	123	
Образец № 5 ($\text{H}_2\text{O} + 2,0\%\text{TiO}_2$)		
$P = 19,62 \text{ МПа}$	$(C_p - C_v) \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$	
	162	

Как показано в таблицах 4.1-4.9 и на соответствующих рисунках 4.1-4.8, разность теплоемкостей образцов $(C_p - C_v)$ с повышением давления уменьшается, а с повышением концентрации наночастиц TiO_2 , наоборот, увеличивается. С повышением давления для всех исследуемых образцов разность теплоемкостей падает почти по линейному закону. Для образца № 3 – ($\text{H}_2\text{O} + 1,0\% \text{TiO}_2$) повышение давления от 9,81 до 39,24 МПа, $(C_p - C_v), \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$ уменьшается на 22,8 %; для образца № 5 – ($\text{H}_2\text{O} + 2,0\% \text{TiO}_2$) – 17,1 %; для образца № 7 – ($\text{H}_2\text{O} + 3,0\% \text{TiO}_2$) – 14,4 %. Такое изменение разности теплоемкостей растворов с повышением давления связано, по нашему предположению, с увеличением плотности. Согласно, таблицам 4.1-4.9 и рисункам 4.1-4.8 добавки наночастиц TiO_2 приводят к росту разности теплоемкостей растворов. Например, при давлении $P = 9,81 \text{ МПа}$, увеличение количество наночастиц (0 до 3 %) (TiO_2) в чистой воде

(H_2O), ($C_p - C_v$) растет в 4,31 раза, при $P = 19.62$ МПа – 4,20 раза, при $P = 39,24$ МПа – 7,04 раза [174-А, 176-А, 183-А, 185-А, 190-А].

На рисунках 4.9 и 4.10 показан характер изменения $C_p - C_v$ в зависимости от массовой концентрации наночастиц диоксида титана (TiO_2) при давлении $P=9,81$ МПа и $P=39,24$ МПа и различных температурах. Согласно рисунков 4.9 и 4.10 с ростом массовой концентрации TiO_2 при различных температурах в отдельных изобарах ($C_p - C_v$) увеличивается нелинейно.

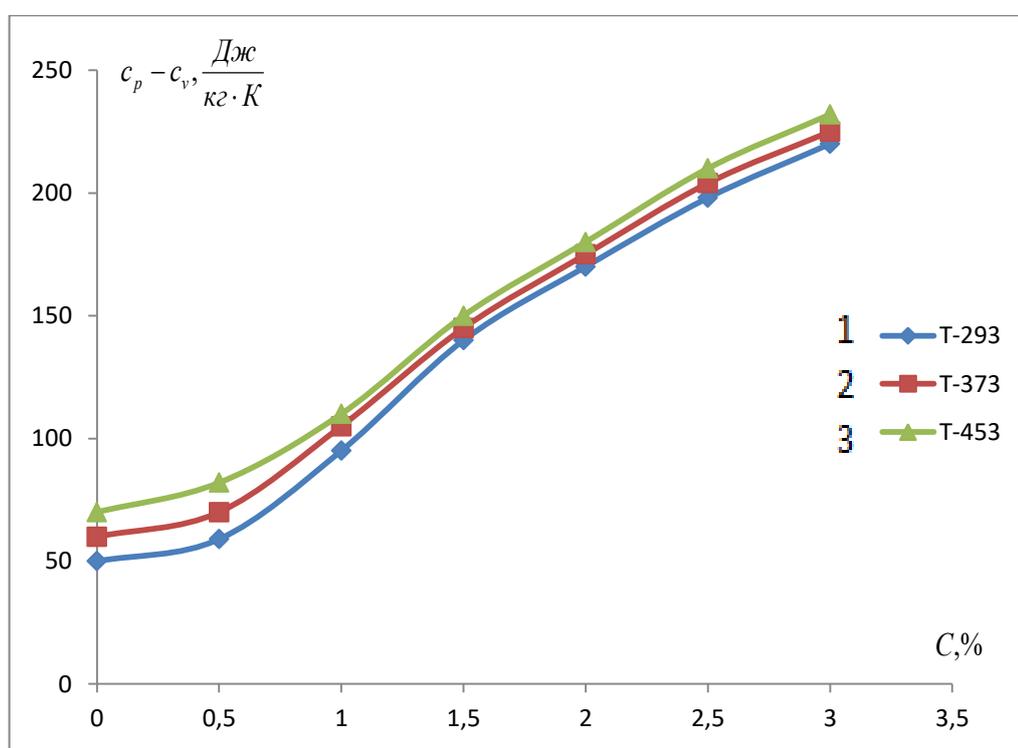


Рисунок 4.9. Зависимость ($C_p - C_v$) водных растворов от массовой концентрации наночастиц диоксида титана TiO_2 при давлении $P=9,81$ МПа и различных температурах: 1-293К, 2-373К, 3-453К

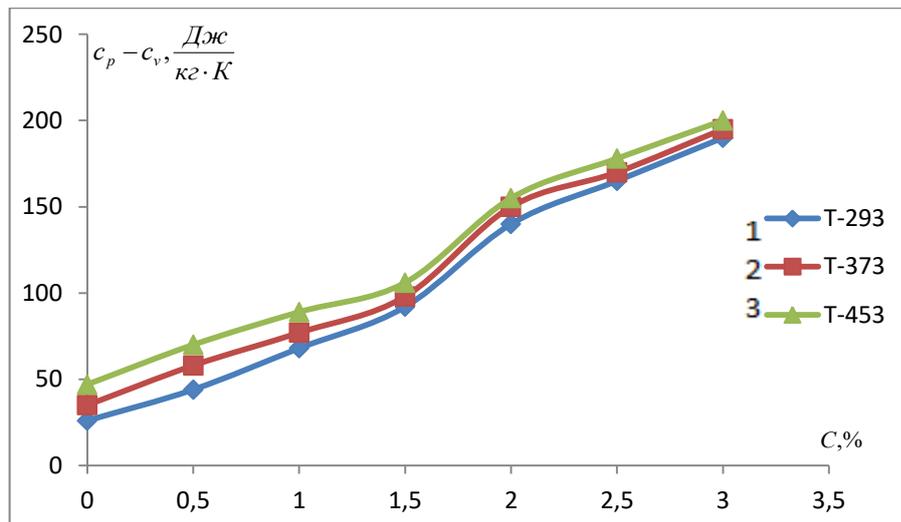


Рисунок 4.10. Зависимость $(C_p - C_v)$ водных растворов от массовой концентрации наночастиц диоксида титана TiO_2 при давлении $P=39,24$ МПа и различных температурах: 1-293К, 2-373К, 3-453К

Увеличение разности теплоемкости исследуемых растворов с увеличением массовой концентрации наночастиц диоксида титана, видимо связано с большим значением его теплоемкости по сравнению теплоемкостью чистой воды. Поэтому увеличение массовой концентрации наночастиц диоксида титана в составе водных растворов приводит к увеличению их разности теплоемкости во всем интервале температур.

С ростом давления плотность водных растворов, содержащих различные массовые концентрации наночастиц диоксида титана увеличивается и согласно расчетной формуле (4.2) приводит к уменьшению разности теплоемкостей исследуемых растворов [167-А, 170-А, 174-А, 175-А, 176-А, 182-А, 183-А, 185-А, 186-А, 190-А].

4.3. Расчет внутреннего давления исследуемых растворов системы $(H_2O + TiO_2)$ при различных параметрах состояния и концентрации наночастиц

На основе теории жидкостей и растворов ученые, занимающиеся молекулярным состоянием, предположили, что внутреннее давление жидкостей, которые взаимосвязаны с коэффициентом объемного

расширения (α_p); изотермическим коэффициентом сжимаемости (β_T); температурой (T) и внешним давлением, выдавливает раствор или жидкость. Таким образом, внутреннее давление исследуемых жидкостей, других жидкостей и растворов определяется следующим выражением [1, 2, 3, 20, 21, 86, 88-90, 93, 99, 100, 111, 128], [167-А, 175-А, 183-А, 190-А]:

$$P_i = \frac{\alpha_p}{\beta_T} T - P_0, \text{ Па.} \quad (4.3.1)$$

При расчетах внутреннего давления наножидкостей, растворов или ньютоновских жидкостей обычно принимают $P_0 = 0.101$ МПа или 10^6 Па.

Результаты расчета внутреннего давления графически показаны на рисунке 4.3.1 - 4.3.2 и в таблице 4.3.1

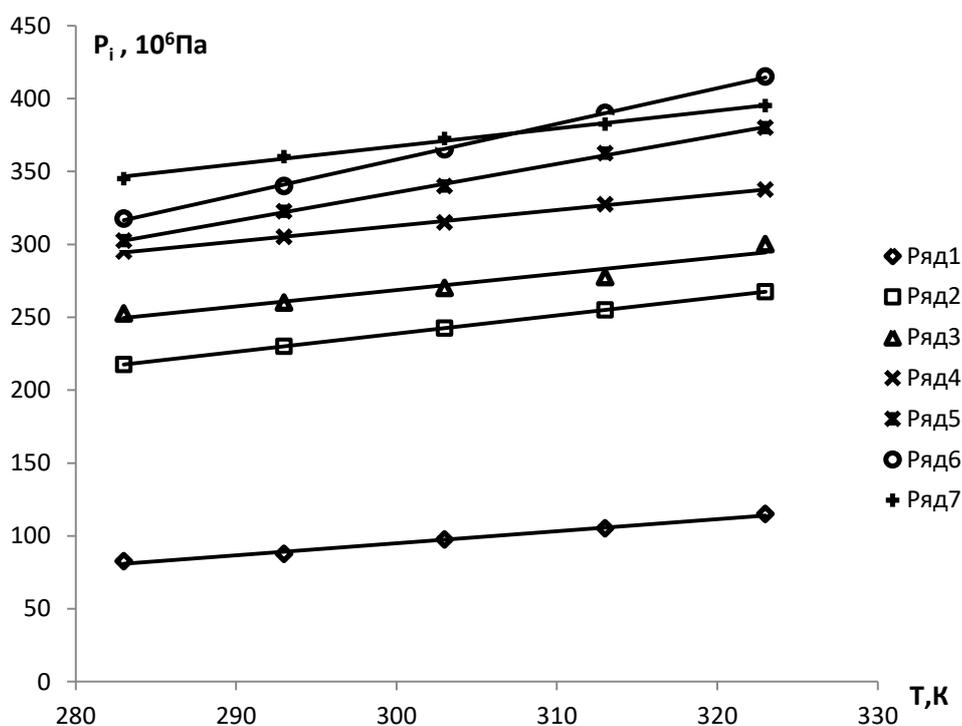


Рисунок 4.3.1-

Зависимость внутреннего давления растворов системы ($H_2O + TiO_2$) при различных температурах и концентрации наночастиц TiO_2 при $P = \text{const}$:
 1- H_2O ; 2- $H_2O + 0,5\%TiO_2$; 3- $H_2O + 1,0\%TiO_2$; 4- $H_2O + 1,5\%TiO_2$; 5- $H_2O + 2,0\%TiO_2$; 6- $H_2O + 2,5\%TiO_2$; 7- $H_2O + 3,0\%TiO_2$

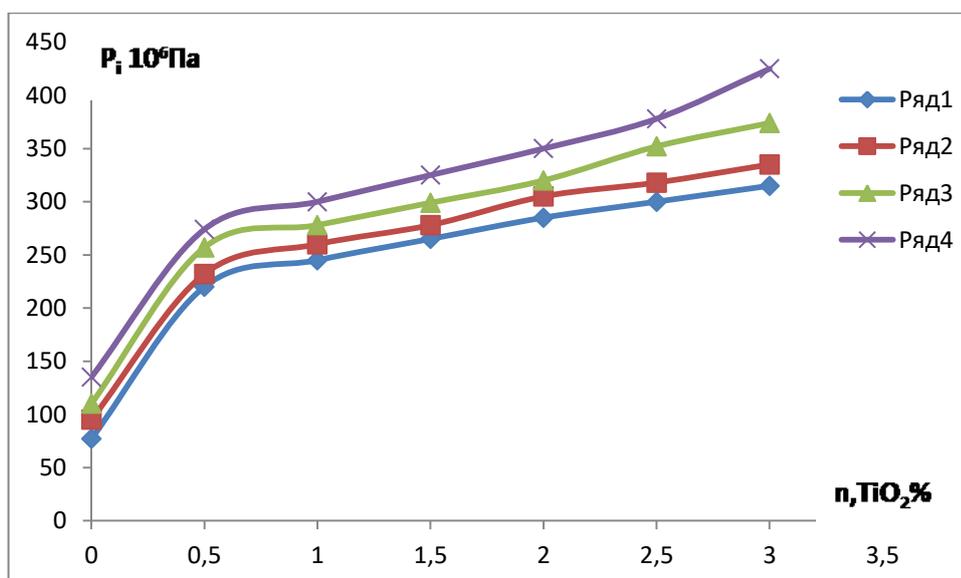


Рисунок 4.3.2-Зависимость внутреннего давления растворов системы ($H_2O + TiO_2$) от концентрации наночастиц TiO_2 при атмосферном давлении и температуры: 1-283К; 2-293К; 3-313К; 4-323К.

Таблица 4.3.1.- Внутреннее давление $P_i, 10^6$ Па, исследуемых растворов системы ($H_2O + TiO_2$) при различных температурах

Образец	Т, К				
	283	293	303	313	323
Обр. № 1 (H_2O)	82,7	85,4	91,92	112,8	118,95
Обр. № 2 ($H_2O + 0,5\%TiO_2$)	223,3	232	240	260,6	270,5
Обр. № 3 ($H_2O + 1,0\%TiO_2$)	250,2	256,5	266,3	274,6	296,8
Обр. № 4 ($H_2O + 1,5\%TiO_2$)	282,6	288,5	292,0	293,7	314,8
Обр. № 5 ($H_2O + 2,0\%TiO_2$)	290,9	301,1	311,3	321,5	331,6
Обр. № 6 ($H_2O + 2,5\%TiO_2$)	298,3	320,1	343,5	368,5	384,5
Обр. № 7 ($H_2O + 3,0\%TiO_2$)	314,9	337,7	362,6	388,7	416,2

Как видно из таблицы 4.3.1 внутреннее давление растворов системы ($H_2O + TiO_2$) с ростом температуры и концентрации наночастиц повышается.

Как показано на рисунках 4.3.1 и 4.3.2 и в таблице 4.3.1 внутренне давление растворов системы ($H_2O + TiO_2$) зависит от температуры и концентрации наночастиц. С повышением температуры в интервале (283-323)К (P_i , Па) внутреннее давление растёт по линейному закону. Надо отметить, что внутреннее давление для образца № 7 т.е. ($H_2O + 3,0 \% TiO_2$) пересекается с образцом №6 ($H_2O + 2,5 \% TiO_2$). Самое низкое значение внутреннего давления имеет образец № 1 (H_2O). Как видно из таблицы 4.3.1 и графика, приведенного на рисунке 4.3.1, добавка диоксида титана (TiO_2) в чистую воду повышает внутреннее давление и соответственно повышает плотность исследуемых растворов во всем диапазоне температур и давления. Как видно из рисунка 4.3.2 внутренняя давления растворов системы ($H_2O + TiO_2$) с ростом концентрации TiO_2 с начала резко повышается, а затем начиная от концентрации $n_{TiO_2} = 1,0 \%$ растёт до концентрации $n_{TiO_2} = 3,0 \%$.

Прежде такая закономерность в зависимости от температуры, при которой проводится эксперимент, наблюдалась и для структуры наножидкостей [167-А, 174-А, 176-А, 182-А, 183-А, 185-А, 186-А, 190-А].

Внутреннее давление жидкости образуется в результате взаимодействия их молекул. С ростом температуры скорость теплового движения молекул увеличивается и это приводит к росту взаимодействия молекул исследуемых растворов, поэтому с ростом температуры внутреннее давление водных растворов, содержащих различные массовые концентрации наночастиц диоксида титана (TiO_2) увеличивается, что подтверждается результатами нашего исследования.

Согласно расчетной формуле (4.3.1), внутреннее давление прямо пропорционально коэффициенту объемного расширения и температуре и обратно пропорционально изотермическим коэффициентом сжимаемости.

Рост внутреннего давления исследуемых водных растворов, с различной концентрацией диоксида титана в составе с ростом

температуры показывает, что увеличение коэффициента объемного расширения образцов с повышением температуры больше, относительно увеличения их изотермического коэффициента сжимаемости.

Увеличение внутреннего давления исследуемых водных растворов с ростом массовой концентрации наночастиц диоксида титана связано с ростом взаимодействия молекул воды с молекулами диоксида титана.

4.4. Расчет изотермического коэффициента сжимаемости водных растворов диоксида титана

Для расчета изотермического коэффициента сжимаемости исследуемых водных растворов диоксида титана при комнатной температуре ($T=293\text{K}$) и давлении (0,101-49,01) МПа, нами использовано следующее выражение [1, 20, 21, 86, 88-90, 128]; [174-А, 176-А, 183-А, 186-А]:

$$\beta_T = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial P} \right)_T, \quad \left(\frac{1}{\text{Па}} \right) \quad (4.4.1)$$

где ρ , $\partial \rho$ – плотность, кг/м^3 и разность плотности, кг/м^3 ; ∂P - разность давления, Па.

Надо отметить, что β_T , которое рассчитывается формулой (4.4.1), можно использовать как при комнатной температуре, так и при различных температурах и давлениях.

Расчёт изотермического коэффициента сжимаемости растворов системы ($\text{H}_2\text{O}+\text{TiO}_2$) при различной концентрации диоксида титана (0-3,0 %) приведено по формуле 4.4.1 и использованием данных таблицы 4.4.1. Погрешность расчёта изотермического коэффициента сжимаемости зависит от погрешности исходных данных, входящих в уравнение (4.4.1).

Таблица 4.4.1.- Плотность ($\rho, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$) водных растворов диоксида титана ($\text{H}_2\text{O} + \text{TiO}_2$) в зависимости от температуры при атмосферном давлении

	283	293	303	313	323	333
Обр. № 1	999	997	994	992	987	985

Обр. № 2	1023	1020	1016	1013	1006	100
Обр. № 3	1038	1033	1027	1023	1017	1011
Обр. № 4	1060	1056	1049	1040	1032	1022
Обр. № 5	1071	1064	1057	1049	1041	1032
Обр. № 6	1079	1073	1066	1057	1050	1042
Обр. № 7	1087	1081	1075	1067	1060	1053

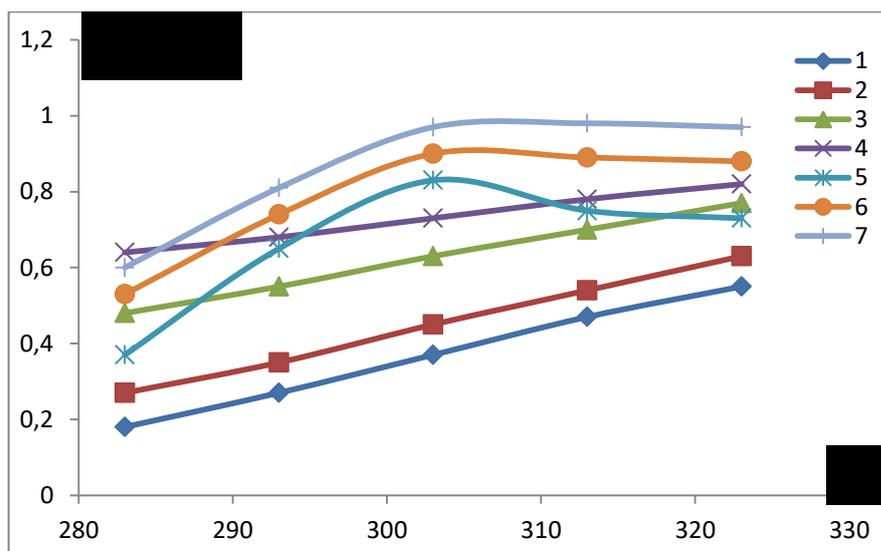


Рисунок 4.4.1- Вычисленные значения изотермического коэффициента сжимаемости исследуемых растворов в зависимости от температуры при различных концентрациях наноразмерного диоксида титана: образец №1-(H₂O), образец №2-(H₂O+ 0,5% TiO₂), образец №3-(H₂O+1.0%TiO₂), образец №4-(H₂O+ 1,5% TiO₂), образец №5-(H₂O+2.0%TiO₂), образец №6-(H₂O+2.5%TiO₂), образец №7-(H₂O+ 3.0 % TiO₂).

Как видно из рисунка 4.4.1 изотермический коэффициент сжимаемости исследуемых растворов системы (H₂O+TiO₂) с ростом температуры и концентрации TiO₂ увеличивается [170-А, 174-А, 175-А, 176-А, 182-А, 183-А, 185-А, 186-А, 190-А].

4.5. Расчет изотермического коэффициента сжимаемости водных растворов диоксида титана в зависимости от давления при комнатной температуре

Для расчёта изотермического коэффициента сжимаемости растворов в системе ($\text{H}_2\text{O}+\text{TiO}_2$) при давлении (9,81-49,01)Мпа и температуре $T=293$ К нами была использована следующая функциональная зависимость[1, 20, 21, 86, 88-90,128], [170-А,174-А,175-А,176-А, 182-А, 183-А, 185-А, 186-А,190-А]:

$$\beta_T = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial P} \right)_T = [2\rho^2 A(T) + 8\rho^8 B(T)], \quad (4.5.1)$$

где ρ –плотность растворов (кг/м^3), $A(T)$ и $B(T)$ – эмпирические коэффициенты уравнения, которые определяются при составлении расчётных уравнений. Результаты расчета значения изотермического коэффициента сжимаемости приведены в таблице 4.5.1 и на рисунке 4.5.1.

Таблица 4.5.1. Изотермический коэффициент сжимаемости ($\beta_T \cdot 10^{-9}, 1/\text{Па}$) водных растворов диоксида титана ($\text{H}_2\text{O}+\text{TiO}_2$) при различных концентрациях диоксида титана, температуре $T = 293$ К и давлении (9,81-49,01) МПа

T = 293 К					
P, МПа	9,81	19,62	29,43	39,24	49,01
$(\beta_T \cdot 10^{-9}, 1/\text{Па})$ (0,5% TiO_2)	0,7	0,69	0,59	0,57	0,58
$(\beta_T \cdot 10^{-9}, 1/\text{Па})$ (1,0% TiO_2)	0,56	0,49	0,48	0,44	0,48
$(\beta_T \cdot 10^{-9}, 1/\text{Па})$ (1,5% TiO_2)	0,49	0,44	0,57	0,66	0,75
$(\beta_T \cdot 10^{-9}, 1/\text{Па})$ (2,0% TiO_2)	0,43	0,57	0,75	0,83	0,88
$(\beta_T \cdot 10^{-9}, 1/\text{Па})$ (2,5% TiO_2)	0,51	0,66	0,85	0,92	0,97
$(\beta_T \cdot 10^{-9}, 1/\text{Па})$ (3,0% TiO_2)	0,64	0,84	0,92	1,02	1,05

Для их определения необходимо иметь данные о температурно-концентрационной зависимости плотности исследуемых растворов.

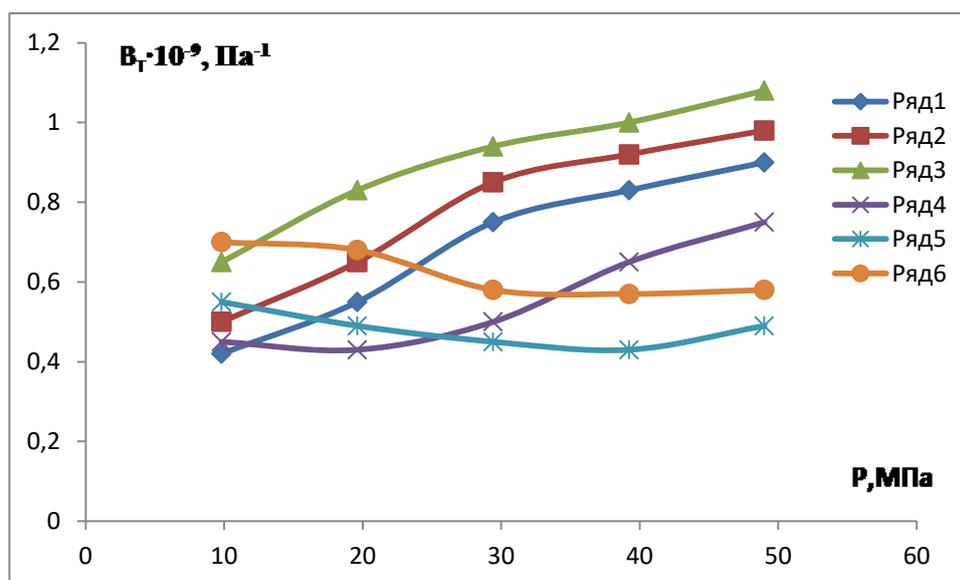


Рисунок 4.5.1. - Зависимость изотермического коэффициента сжимаемости ($\beta_T \cdot 10^{-9}$, 1/Па) исследуемых растворов системы (H₂O+TiO₂) при различных давлениях, комнатной температуре (293 К): 1- образец № 1; 2- образец № 2; 3- образец № 3; 4- образец № 4; 5- образец № 5; 6- образец № 6.

Как видно, из таблиц 4.5.1 и рисунка 4.5.1 изотермический коэффициент сжимаемости исследуемых образцов с ростом давления увеличивается.

Надо отметить, что с помощью уравнения (4.5.1) можно определить значение температурной и концентрационной зависимости изотермического коэффициента сжимаемости исследуемых растворов при различных давлениях.

Как видно из рисунка 4.5.1 изотермический коэффициент сжимаемости исследуемых образцов системы (H₂O+TiO₂) с повышением давления имеет сложный характер.

4.6. Обработка и обобщение плотности растворов системы (H₂O + TiO₂) при различных температурах и давлениях

Обработка экспериментальных данных по плотности образцов исследования при изменении температуры от 293К до 453К и давления от

0,101МПа до 49,01МПа нами была произведена в соответствии [1, 20, 21, 86-90, 93, 99, 100, 108, 109, 111, 121, 125, 127, 128, 130, 143, 145, 153, 165]; [167-А, 170-А, 174-А, 175-А, 176-А]:

$$\frac{\rho}{\rho_1} = f\left(\frac{T}{T_1}\right), \quad (4.6.1)$$

$$\frac{\rho_1}{\rho_{1*}} = f\left(\frac{P}{P_1}\right), \quad (4.6.2)$$

где ρ -плотность исследуемых растворов при различных температурах и давлениях и ρ_1 -плотность исследуемых растворов при $T_1 = 353$ К; $P_1 = 19,61$ МПа; [167-А, 170-А, 174-А, 175-А, 176-А, 182-А, 183-А, 185-А, 186-А, 190-А].

Для обобщения экспериментальных данных, по выражения (4.6.1) и (4.6.2) нами использованы данные приведенные в таблицы 3.1 – 3.7.

Выполнимость зависимости (4.6.1) и (4.6.2) показана на рисунках 4.6.1 и 4.6.3 и в табл. 4.6.1 – 4.6.2 [167-А, 170-А, 174-А, 175-А, 176-А, 182-А, 183-А, 185-А, 186-А, 190-А].

Как выше было упомянуто, плотность чистой воды (H_2O) была исследована различными авторами, как зарубежными, так и советскими учеными разными методами. Некоторые из них представлены, в справочнике под руководством профессора Н.Б. Варгафтика при высоких параметрах состояния. Авторы при исследовании плотности чистой воды использовали теоретические методы (как Ли, Ридел, Томсон, Абдуллаев, Ахундов и др.) Результаты теоретического исследования, зависят от многих субъективных и объективных причин, поэтому даст относительно большую погрешность. Теория погрешности измерения плотности исследуемых образцов (твердых, жидких и газообразных) показывает, что они имеют значение в пределах 0,005 и 0,01 % в относительной форме [167-А, 170-А, 174-А, 176-А, 182-А, 183-А, 185-А, 186-А, 190-А].

Так как нами была измерена плотность растворов системы воды и наночастиц диоксида титана (TiO_2), концентрация которого меняется до 3 %, было установлено, что с ростом концентрации диоксида титана

плотность растёт по линейному закону [167-А, 170-А, 174-А, 176-А, 182-А, 183-А, 185-А, 186-А, 190-А].

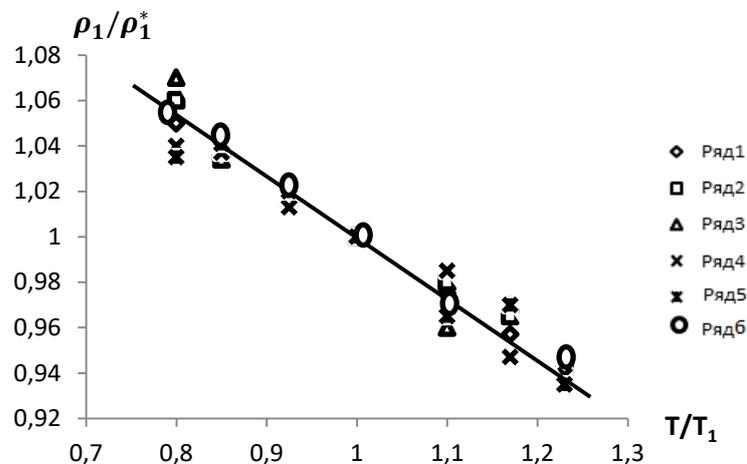


Рисунок 4.6.1- Зависимость относительной плотности от относительной температуры для исследуемых растворов системы (H_2O+TiO_2) :

обр.№1 – $(H_2O + 0,5\%TiO_2)$, *обр.№2* – $(H_2O + 1,0\%TiO_2)$, *обр.№3* – $(H_2O + 1,5\%TiO_2)$
обр.№4 – $(H_2O + 2,0\%TiO_2)$, *обр.№5* – $(H_2O + 2,5\%TiO_2)$, *обр.№6* – $(H_2O + 3,0\%TiO_2)$

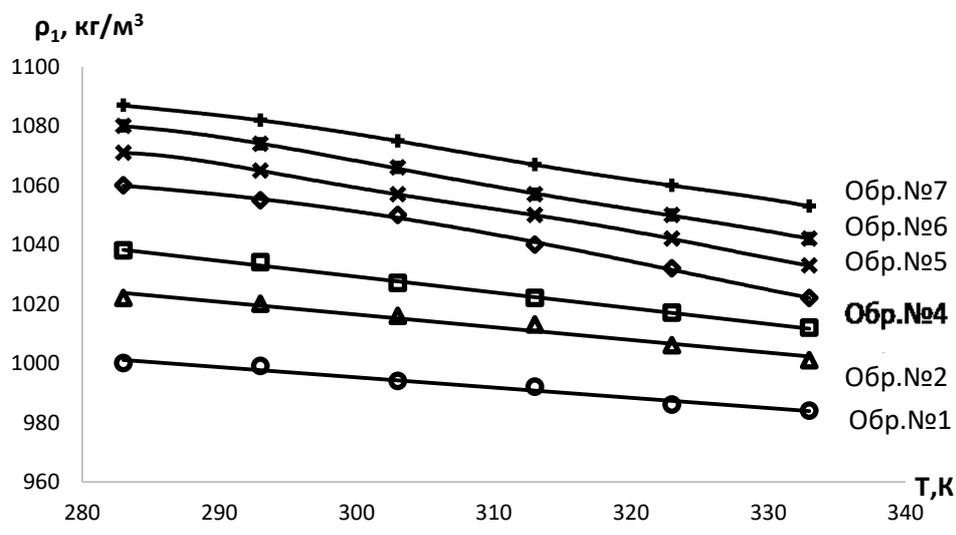


Рисунок 4.6.2- Зависимость плотности растворов системы (H_2O+TiO_2) от температуры: *обр.№1* – $(H_2O + 0,5\%TiO_2)$, *обр.№2* – $(H_2O + 1,0\%TiO_2)$,

обр.№3 – $(H_2O + 1,5\%TiO_2)$, *обр.№4* – $(H_2O + 2,0\%TiO_2)$, *обр.№5* – $(H_2O + 2,5\%TiO_2)$,
обр.№6 – $(H_2O + 3,0\%TiO_2)$.

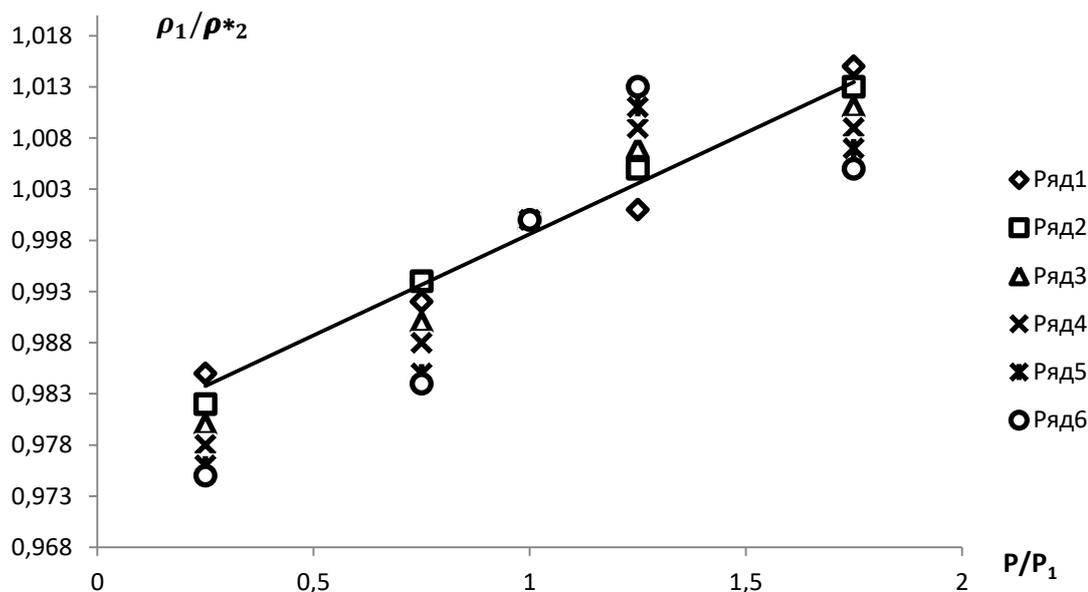


Рисунок 4.6.3- Зависимость относительной плотности от относительного давления для исследуемых растворов системы (H_2O+TiO_2):

обр№1 – ($H_2O + 0,5\%TiO_2$), *обр№2* – ($H_2O + 1,0\%TiO_2$), *обр№3* – ($H_2O + 1,5\%TiO_2$)

обр№4 – ($H_2O + 2,0\%TiO_2$), *обр№5* – ($H_2O + 2,5\%TiO_2$), *обр№6* – ($H_2O + 3,0\%TiO_2$)

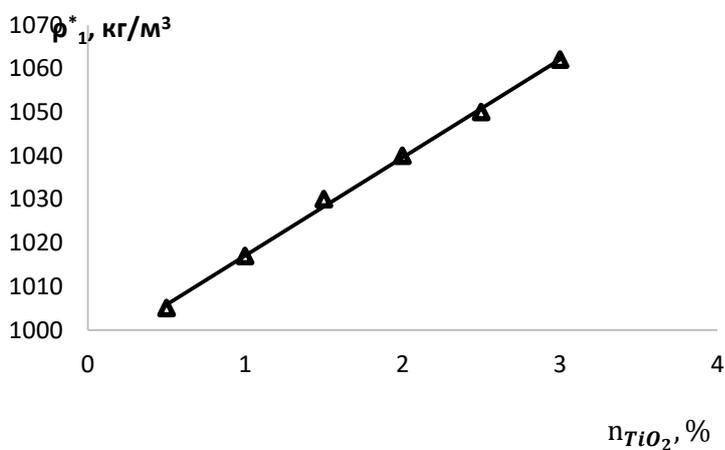


Рисунок 4.6.4- Зависимость плотности (ρ^*) растворов системы (H_2O+TiO_2) от концентрации нанонаполнителя (TiO_2).

Уравнение прямой линии, представленной на рисунке 4.6.1, имеет следующий вид [170-А, 175-А, 176-А, 182-А, 185-А, 186-А, 190-А]:

$$\frac{\rho}{\rho_1} = [1,45 - 0,245(\frac{T}{T_1})], \quad (4.6.3)$$

где $T_1=353K$.

Анализ значения ρ_1 и ρ_1^* показал, что они являются функциями давления и концентрации нанонаполнителя диоксида титана (TiO_2) (n):

$$\rho_1 = \left[0,28 \left(\frac{P}{P_1} \right) + 0,9717 \right] \cdot \rho_1^* \quad (4.6.4)$$

$$\rho_1^* = f(n_{TiO_2}) \quad (\text{рисунок 4.6.4}). \quad (4.6.5)$$

Из уравнения (4.6.3) с учетом выражения (4.6.4) и (4.6.5) получим:

$$\rho = \left[1,45 - 0,245 \left(\frac{T}{T_1} \right) \right] \left[0,028 \left(\frac{P}{P_1} \right) + 0,9717 \right] \cdot (A + Bn), \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \quad (4.6.6)$$

$$\text{где } A = 989 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}; B = 27 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3 \cdot \%}$$

С помощью выражения (4.6.6) можно численно определить плотность растворов системы ($H_2O + TiO_2$) при различных температурах и давлениях с погрешностью (0,2-1,3)%. Надо отметить, что для такого численного расчета необходимо знать концентрации наночастиц (n), в том числе диоксида титана (TiO_2), температуры (283-443)К и давления (0,101-49,01)МПа (Таблица 4.6.1).

Таблица 4.6.1.- Сравнение вычисленных значений плотности (ρ , кг/м³) вод-ных растворов титана ($H_2O + TiO_2$) при различных температурах (283-323) К и концентрациях (0 – 3,0)% TiO_2 при P = 0,101 МПа

Т, К	283			293		
Образец №1 H_2O						
ρ	Экспер.	Расчет	Δ , %	Экспер.	Расчет	Δ , %
	999,9	999,3	0,06	999,7	999,8	0,01
Т, К	303			303		
ρ	Экспер.	Расчет	Δ , %	Экспер.	Расчет	Δ , %
	994,3	994,6	0,03	992,0	989,3	0,27
Т, К	323			333 К		
ρ	Экспер.	Расчет	Δ , %	Экспер.	Расчет	Δ , %
	987,2	983,7	0,35	985,0	984,0	0,1
Образец № 2 ($H_2O + 0,5 \% TiO_2$)						
Т, К	283			293		
ρ	Экспер.	Расчет	Δ , %	Экспер.	Расчет	Δ , %
	1023	1006	1,7	1020	1001	1,95
Т, К	303			313		
ρ	Экспер.	Расчет	Δ , %	Экспер.	Расчет	Δ , %

	1016	996	1,97	1013	991	2,17
T, K	323			333		
ρ	Экспер.	Расчет	Δ , %	Экспер.	Расчет	Δ , %
	1006	984,5	2,14	1000	979,6	2,04
Образец №3 ($H_2O + 1,0\% TiO_2$)						
T, K	283			293		
ρ	Экспер.	Расчет	Δ , %	Экспер.	Расчет	Δ , %
	1039	1042	0,29	1033	1036	0,29
T, K	303			313		
ρ	Экспер.	Расчет	Δ , %	Экспер.	Расчет	Δ , %
	1027	1031,2	0,41	1022	1026,0	0,39
T, K	323			333		
ρ	Экспер.	Расчет	Δ , %	Экспер.	Расчет	Δ , %
	1016	1019,8	0,35	1010	1014,7	0,47
Образец №4 ($H_2O + 1,5\% TiO_2$)						
T, K	283			293		
ρ	Экспер.	Расчет	Δ , %	Экспер.	Расчет	Δ , %
	1060	1056,9	0,29	1056,0	1051,1	0,84
T, K	303			313		
ρ	Экспер.	Расчет	Δ , %	Экспер.	Расчет	Δ , %
	1049,0	1045,9	0,29	1040,0	1040,7	0,07
T, K	323			333		
ρ	Экспер.	Расчет	Δ , %	Экспер.	Расчет	Δ , %
	1032,0	1034,3	0,22	1023,0	1029,1	0,6
Образец №5 ($H_2O + 2,0\% TiO_2$)						
T, K	283			293		
ρ	Экспер.	Расчет	Δ , %	Экспер.	Расчет	Δ , %
	1072	1048,2	0,74	1048	1042,9	0,49
T, K	303			313		
ρ	Экспер.	Расчет	Δ , %	Экспер.	Расчет	Δ , %
	1040	1036,7	0,32	1033	1031,4	0,15
T, K	323			333		
ρ	Экспер.	Расчет	Δ , %	Экспер.	Расчет	Δ , %
Образец №6 ($H_2O + 2,5\% TiO_2$)						
T, K	283			293		
ρ	Экспер.	Расчет	Δ , %	Экспер.	Расчет	Δ , %
	1080	1079,3	0,07	1072	1073	0,12
T, K	303			313		
ρ	Экспер.	Расчет	Δ , %	Экспер.	Расчет	Δ , %
	1065	1068	0,28	1058	1062,7	0,44
T, K	323			333		
ρ	Экспер.	Расчет	Δ , %	Экспер.	Расчет	Δ , %
	1050	1056,2	0,59	1044	1050,9	0,66

Образец № 7 ($H_2O + 3,0 \% TiO_2$)						
Т, К	283			293		
ρ	Экспер.	Расчет	$\Delta, \%$	Экспер.	Расчет	$\Delta, \%$
	1088	1086,8	0,1	1082,0	1080,8	0,11
Т, К	303			313		
ρ	Экспер.	Расчет	$\Delta, \%$	Экспер.	Расчет	$\Delta, \%$
	1075	1075,4	0,04	1068	1070,0	0,19
Т, К	323			333		
ρ	Экспер.	Расчет	$\Delta, \%$	Экспер.	Расчет	$\Delta, \%$
	1061	1063,6	0,25	1054	1058,8	0,46

4.7. Получение уравнения состояния (УС) типа Мамедова–Ахундова для растворов системы (H_2O+TiO_2) при различных температурах и давлениях

Для составления уравнения состояния (УС) типа Мамедова – Ахундова нами впервые использованы экспериментальные данные по плотности исследованных растворов системы (H_2O+TiO_2), т.е. вода и наночастицы диоксида титана при высоких параметрах состояния $T=(293-433)K$ и $P=(0,101-49,01)MPa$ и концентрации наночастиц ($0-3\%TiO_2$). Для получения соответствующих экспериментальных данных мы воспользовались широко известным методом гидростатического взвешивания (установка, основанная на данном методе представлена еще профессором К.Д. Гусейновым и его учениками) [1,20,21,86,128]. Погрешность опыта, выполненного названным методом при $\alpha = 0,95$, составляет 0,1%.

Как выше было отмечено, экспериментальная установка была протестирована. Для тестирования установки был использован жидкий бензол, толуол, вода и воздух [1,20,21,86,128], [176-А, 182-А, 183-А, 186-А].

Для расчета плотности исследуемых растворов также нами было использовано уравнение состояния типа Тейта [1-4, 20, 21, 91, 93, 109, 128, 130-139, 154-157], [176-А, 183-А, 185-А, 186-А, 190-А].

В научном мире существует очень много уравнений для расчета плотности жидкостей, растворов, электролитов и наножидкостей, которые позволяют определить плотность или удельный объем вышеперечисленных веществ при различных температурах и давлениях.

Вопросами определения плотности жидкостей занимались многие ученые-теплофизики как Голубев И.Ф. (Москва), Гусейнов К.Д., Ахундов Т.С., Мамедов А. (Баку), Григорьев Б.А. (Грозный) и др.

Надо отметить, что ученые теплофизики для получения уравнений состояния (УС) в основном использовали в виде степенной зависимости (от 0 до 7) или УС в вириальном виде [1,21,86,88,89,90,108,109,113,130,158-160].

Авторы работ [1,20,21,86] для составления УС растворов, наножидкостей на основе гидразина, фенилгидразина, метилгидразина и др. использовали уравнение типа Тейта, Мамедова, Григорьева, Ахундова и др. [20,21,160]. Вышеназванные теплофизики, также успешно использовали уравнения типа Тейта для определения плотности и вязкости жидкостей [1,20,21, 88-90, 108,130,160,109,113,157,157], [170-А, 174-А, 176-А, 182-А, 185-А, 186-А, 190-А]:

$$\rho = \frac{\rho_0}{A + C \ln \left[\frac{B + P}{B_0 + P_0} \right]}, \quad (4.7.1)$$

где ρ_0 – плотность жидкостей при заданной температуре и давлении; A, C, B_0 и B – коэффициент уравнения, который определяется на основе экспериментальных данных путем выбора; P - обычно принимают $P = 4,9 \text{ МПа}$ или $9,81 \text{ МПа}$, P - изменяется от $9,81 \text{ МПа}$ до 1000 МПа [179-А, 180-А, 184-А, 187-А, 190-А].

Для определения коэффициента динамической вязкости уравнение типа Тейта используется в таком [1,20,21, 88-90,108,130,160,109, 113,157,157] виде [168-А, 178-А, 180-А, 184-А, 187-А]:

$$\eta = \eta_0 \left(1 - c \ln \left[\frac{B + P}{B_0 + P_0} \right] \right), \quad (4.7.2)$$

η_0 - коэффициент динамической вязкости при заданной температуре и давлении.

Кроме того, для составления УС (уравнение состояния) исследуемых растворов нами использовано следующее выражение $P=f(\rho)^6$. На плоскости $\frac{p}{\rho^2} - \rho^6$ нами построены их графики [1, 14, 18, 20, 21, 86, 93, 103, 106, 109, 111, 121, 125, 128, 130, 132, 144].

На рисунках 4.7.1 - 4.7.7 представлены графики зависимостей $\frac{p}{\rho^2} = f(\rho)^6$ для всех растворов как в чистом виде, так и содержащих от 0 до 3% диоксида титана.

Как видно из рисунков 4.7.1-4.7.7 и таблиц 4.7.3-4.7.9 зависимость $\frac{p}{\rho^2} = f(\rho)^6$ для всех исследуемых растворов ($H_2O + 3,0 \% TiO_2$) имеет линейный характер. Для удобства и расчета коэффициентов этих прямых линий нами и другими авторами, в том числе Мамедовым – Ахундовым были приложены поиски легких путей получения коэффициентов уравнения прямых линий.

Надо отметить, что в 60 и 70 годы прошлого века получения и расчет коэффициентов кривых линий было сложно, потому что тогда не было легко использовать ЭВМ или персональные компьютеры. Коэффициенты уравнений кривых или прямых линий определялись только на микрокалькуляторе МК-61 (до 90 годы прошлого века). При подготовке кандидатских и докторских работ профессорами Сафаровым М.М. и Маджидовым Х.М., которыми и был использован метод наименьших квадратов с помощью специальной программы, подготовленной на МК-61. В худшем случае авторы использовали уравнение прямых линий, проходящих через 2 точки (Аналитическая геометрия) [170-А, 175-А, 176-А, 179-А, 184-А, 190-А].

В настоящее время существует более 100 программ на ЭВМ микрокалькуляторах, Excel, Matlab и другие, которые можно использовать для расчета коэффициентов кривых, прямых или степенных линий с достаточно малой погрешностью или достоверными данными. Профессор Сафаров М.М. и его ученики для подготовки диссертационных работ как кандидатских, так и докторских (свыше 50 работ), успешно использовали МК-61 и в последних используют компьютерные программы Excel, Matlab и другие [178-А, 182-А, 187-А, 189-А, 190-А].

Нами в настоящей работе, используя значение плотности исследуемых растворов при различных температурах и давлениях и метод Мамедова – Ахундова получено уравнение состояния (УС) для растворов системы (H₂O+ TiO₂). Нанообъекты TiO₂ получены из Казанского государственного технологического университета. Эти коллоидные наножидкости были получены к.т.н. доцентом Хубатхужиным А.А. в 2017 году в КГХТУ. Результаты обработки и получения уравнения состояния для всех исследуемых растворов предоставлены на рисунках 4.7.1- 4.7.9.

Для образца № 1- (H₂O), (рисунок 4.7.1):

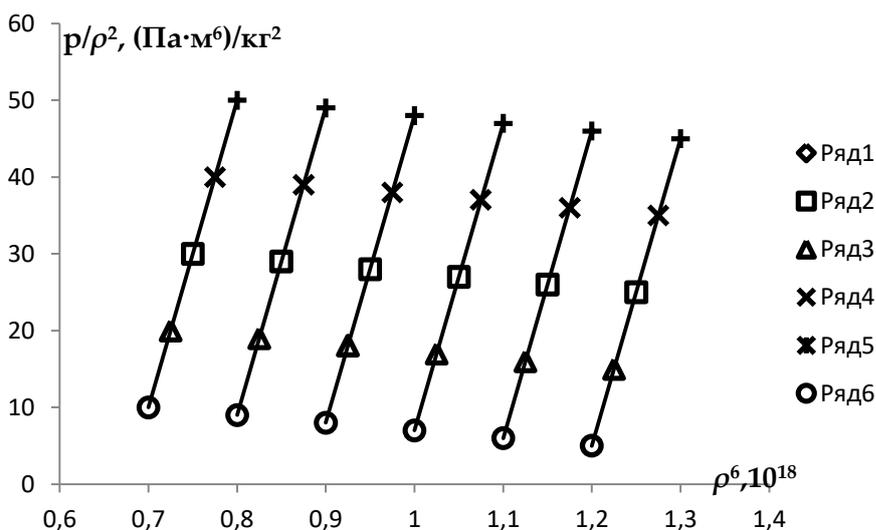


Рисунок 4.7.1- Зависимость $\frac{p}{\rho^2}$ от ρ^6 для образца №1 (H₂O) при различных температурах и давлениях: 1-433; 2-393; 3-353; 4-323; 5-293; 6-283 К.

Уравнение состояния графиков, приведенные на рисунках 4.7.1

имеют вид:

$$T=283 \text{ К}; \quad \frac{P}{\rho^2} = 250 \cdot 10^{-18} \rho^6 - 295, \quad (4.7.3)$$

$$T=293 \text{ К}; \quad \frac{P}{\rho^2} = 222,2 \cdot 10^{-18} \rho^6 - 238,9, \quad (4.7.4)$$

$$T=323 \text{ К}; \quad \frac{P}{\rho^2} = 666,7 \cdot 10^{-18} \rho^6 - 669,8, \quad (4.7.5)$$

$$T=353 \text{ К}; \quad \frac{P}{\rho^2} = 222,2 \cdot 10^{-18} \rho^6 - 192,2, \quad (4.7.6)$$

$$T=393 \text{ К}; \quad \frac{P}{\rho^2} = 285,7 \cdot 10^{-18} \rho^6 - 218,6, \quad (4.7.7)$$

$$T=433 \text{ К}; \quad \frac{P}{\rho^2} = 333,3 \cdot 10^{-18} \rho^6 - 223,3, \quad (4.7.8)$$

Таблица 4.7.1.- Значение коэффициентов уравнения Мамедова – Ахундова для образца № 1 (H₂O).

T, К	$B \cdot 10^{-18}, \frac{\text{Па} \cdot \text{кг}^4}{\text{м}^3}$	$- A, \frac{\text{Па} \cdot \text{м}^4}{\text{кг}^2}$
283	250,0	295,0
293	222,2	238,9
323	666,7	669,8
353	222,2	192,2
393	285,7	218,6
433	333,3	223,3

Для образца № 2 -(H₂O+0,5 % TiO₂) (рисунок 4.7.2):

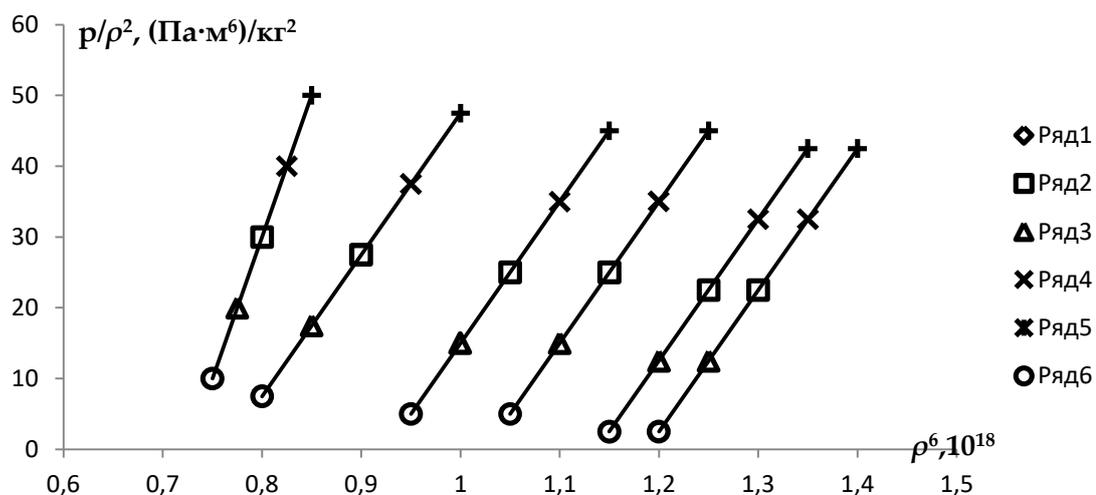


Рисунок 4.7.2.- Зависимость $\frac{P}{\rho^2}$ от ρ^6 для образца ($H_2O + 0,5\%TiO_2$) при различных температурах и давлениях: 1-433; 2-393; 3-353; 4-323; 5-293; 6-283 К.

$$T=283 \text{ К}; \quad \frac{P}{\rho^2} = 285,7 \cdot 10^{-18} \rho^6 - 349,8. \quad (4.7.9)$$

$$T=293 \text{ К}; \quad \frac{P}{\rho^2} = 222,2 \cdot 10^{-18} \rho^6 - 249,9, \quad (4.7.10)$$

$$T=323 \text{ К}; \quad \frac{P}{\rho^2} = 166,7 \cdot 10^{-18} \rho^6 - 168,3, \quad (4.7.11)$$

$$T=353 \text{ К}; \quad \frac{P}{\rho^2} = 27,38 \cdot 10^{-18} \rho^6 - 16,58, \quad (4.7.12)$$

$$T=433 \text{ К}; \quad \frac{P}{\rho^2} = 400 \cdot 10^{-18} \rho^6 - 278,0 \quad (4.7.13)$$

Таблица 4.7.2- Коэффициенты уравнения состояния (УС) типа Мамедова – Ахундова.

Т,К	$B \cdot 10^{-18}, \frac{\text{Па} \cdot \text{кг}^4}{\text{м}^3}$	- А, $\frac{\text{Па} \cdot \text{м}^4}{\text{кг}^2}$
283	285,7	349,8
293	222,2	249,9
323	166,7	168,3
353	27,38	16,58
433	400	278,0

Для образца № 3- ($H_2O + 1.0\% TiO_2$) (рисунок 4.7.3):

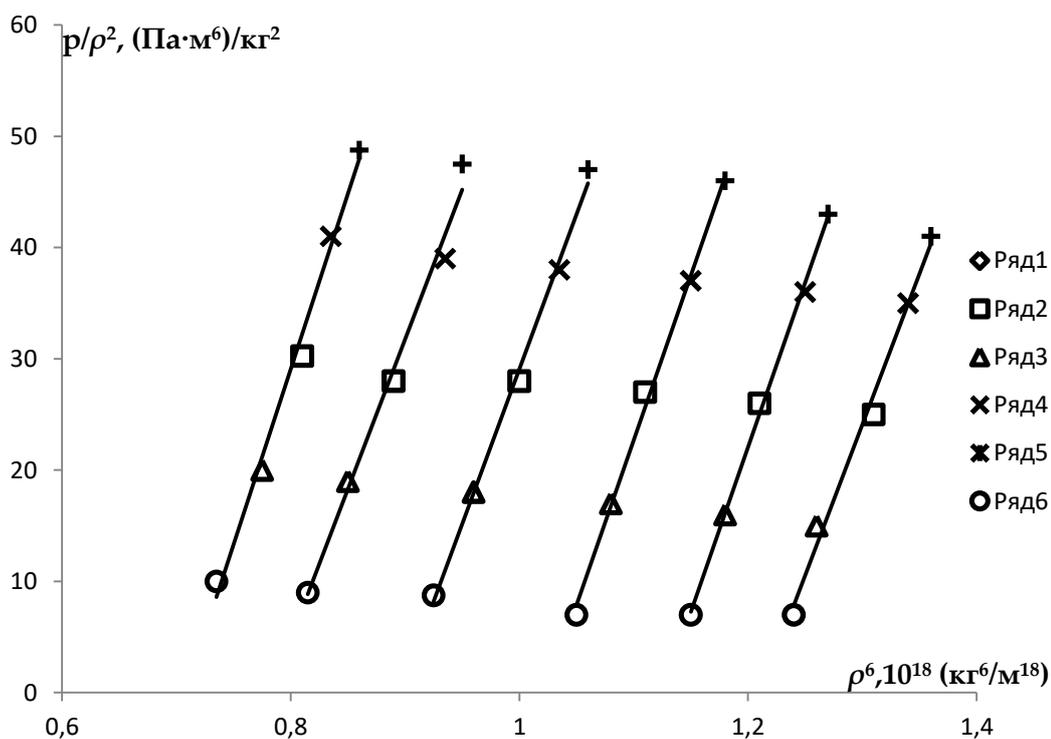


Рисунок 4.7.3- Зависимость $\frac{P}{\rho^2}$ от ρ^6 для образца ($H_2O + 1,0\%TiO_2$) при различных температурах и давлениях: 1-433; 2-393; 3-353; 4-323; 5-293; 6-283 К.

$$T=283 \text{ К}; \quad \frac{P}{\rho^2} = 285,4 \cdot 10^{-18} \rho^6 - 347,1, \quad (4.7.14)$$

$$T=293 \text{ К}; \quad \frac{P}{\rho^2} = 250 \cdot 10^{-18} \rho^6 - 252,5, \quad (4.7.15)$$

$$T=323 \text{ К}; \quad \frac{P}{\rho^2} = 285,7 \cdot 10^{-18} \rho^6 - 289,9, \quad (4.7.16)$$

$$T=353 \text{ К}; \quad \frac{P}{\rho^2} = 166,7 \cdot 10^{-18} \rho^6 - 144,9, \quad (4.7.17)$$

$$T=393 \text{ К}; \quad \frac{P}{\rho^2} = 222,2 \cdot 10^{-18} \rho^6 - 169,9, \quad (4.7.18)$$

$$T=433 \text{ К}; \quad \frac{P}{\rho^2} = 333,3 \cdot 10^{-18} \rho^6 - 236,7 \quad (4.7.19)$$

Таблица 4.7.3.- Значение коэффициентов уравнения состояния (УС) Мамедова – Ахундова при различных температурах

Т,К	$B \cdot 10^{-18}, \frac{\text{Па} \cdot \text{кг}^4}{\text{м}^3}$	$- A, \frac{\text{Па} \cdot \text{м}^4}{\text{кг}^2}$
283	285,4	347,1
293	250,0	252,5
323	285,7	289,9
353	166,7	144,9
393	222,2	169,9

433	333,3	236,7
-----	-------	-------

Для образца № 4- ($H_2O + 1,5\% TiO_2$) (рисунок 4.7.4):

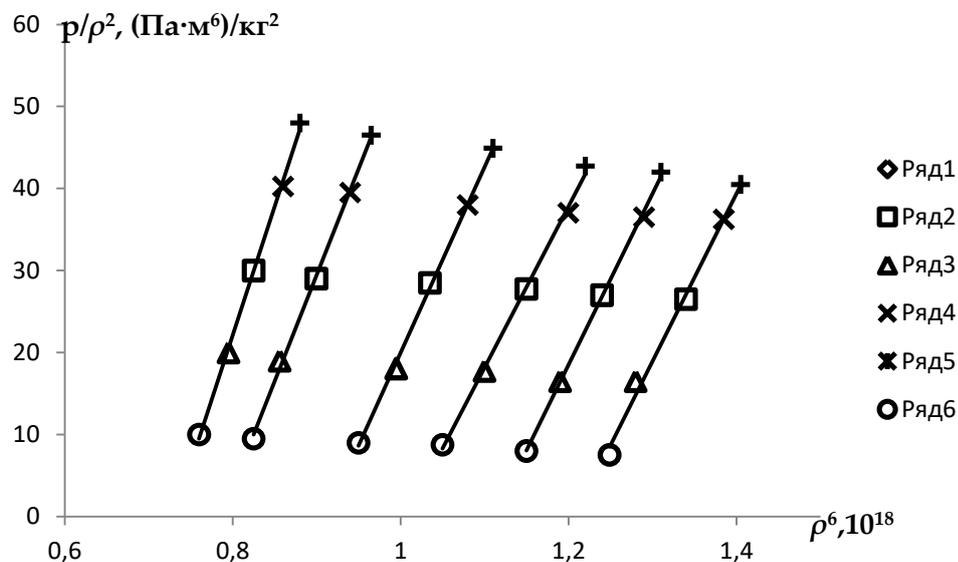


Рисунок 4.7.4 -Зависимость $\frac{P}{\rho^2}$ от ρ^6 для образца ($H_2O + 1,5\%TiO_2$) при различных температурах и давлениях: 1-433; 2-393; 3-353; 4-323; 5-293; 6-283 К.

$$T=283 \text{ К}; \quad \frac{P}{\rho^2} = 142,8 \cdot 10^{-18} \rho^6 - 162,8, \quad (4.7.20)$$

$$T=293 \text{ К}; \quad \frac{P}{\rho^2} = 222,2 \cdot 10^{-18} \rho^6 - 454,0, \quad (4.7.21)$$

$$T=323 \text{ К}; \quad \frac{P}{\rho^2} = 166,7 \cdot 10^{-18} \rho^6 - 202,0, \quad (4.7.22)$$

$$T=353 \text{ К}; \quad \frac{P}{\rho^2} = 27,38 \cdot 10^{-18} \rho^6 - 203,3, \quad (4.7.23)$$

$$T=393 \text{ К}; \quad \frac{P}{\rho^2} = 250 \cdot 10^{-18} \rho^6 - 195,0, \quad (4.7.24)$$

$$T=433 \text{ К}; \quad \frac{P}{\rho^2} = 333,3 \cdot 10^{-18} \rho^6 - 243,3, \quad (4.7.25)$$

Таблица 4.7.4. - Значение коэффициентов уравнения состояния (УС) Мамедова – Ахундова при различных температурах

T, К	$B \cdot 10^{-18}, \frac{\text{Па} \cdot \text{кг}^4}{\text{м}^3}$	- A, $\frac{\text{Па} \cdot \text{м}^4}{\text{кг}^2}$
283	142,2	162,8
293	400	454
323	200	202
353	222,2	203,3
393	250	195,0

433	333,3	243,3
-----	-------	-------

Для образца № 5- ($H_2O+2\% TiO_2$) (рисунок 4.7.5):

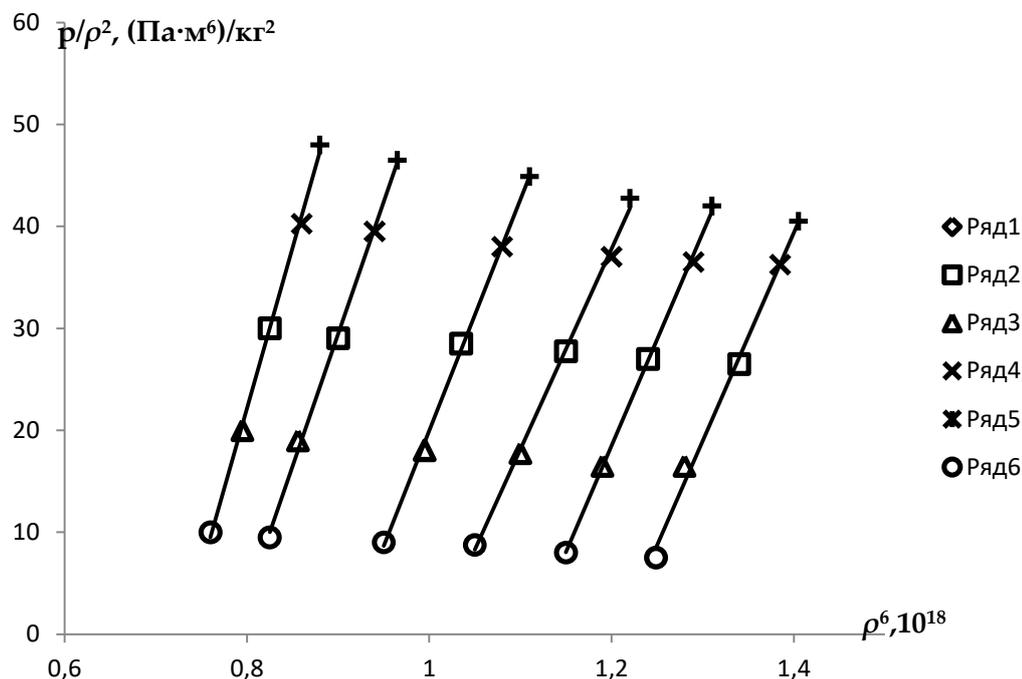


Рисунок 4.7.5 - Зависимость $\frac{P}{\rho^2}$ от ρ^6 для образца ($H_2O + 2,0\%TiO_2$) при различных температурах и давлениях: 1-433; 2-393; 3-353; 4-323; 5-293; 6-283 К.

$$T=283 \text{ К}; \quad \frac{P}{\rho^2} = 153,8 \cdot 10^{-18} \rho^6 - 180,8, \quad (4.7.26)$$

$$T=293 \text{ К}; \quad \frac{P}{\rho^2} = 200 \cdot 10^{-18} \rho^6 - 222,0, \quad (4.7.27)$$

$$T=323 \text{ К}; \quad \frac{P}{\rho^2} = 222,2 \cdot 10^{-18} \rho^6 - 227,8, \quad (4.7.28)$$

$$T=353 \text{ К}; \quad \frac{P}{\rho^2} = 222,2 \cdot 10^{-18} \rho^6 - 205,6, \quad (4.7.29)$$

$$T=433 \text{ К}; \quad \frac{P}{\rho^2} = 250 \cdot 10^{-18} \rho^6 - 202,5, \quad (4.7.30)$$

$$T=433 \text{ К}; \quad \frac{P}{\rho^2} = 250 \cdot 10^{-18} \rho^6 - 182,5, \quad (4.7.31)$$

Таблица 4.7.5. - Значение коэффициентов уравнения состояния (УС) Мамедова – Ахундова при различных температурах

T, К	$B \cdot 10^{-18}, \frac{\text{Па} \cdot \text{кг}^4}{\text{м}^3}$	$A, \frac{\text{Па} \cdot \text{м}^4}{\text{кг}^2}$
283	153,8	180,8
293	200	222

323	222,2	227,8
353	222,2	205,6
393	250	202,5
433	250	182,5

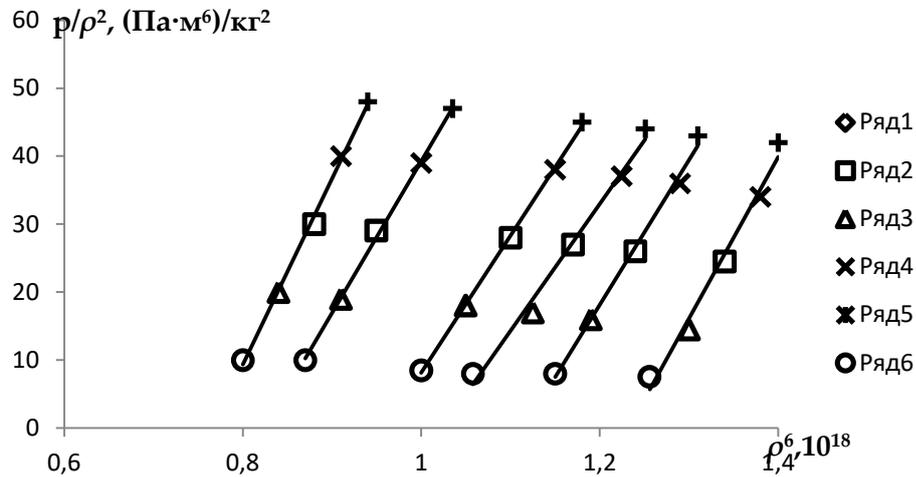


Рисунок 4.7.6 - Зависимость $\frac{P}{\rho^2}$ от ρ^6 для образца ($H_2O + 2,5\%TiO_2$) при различных температурах и давлениях: 1-433; 2-393; 3-353; 4-323; 5-293; 6-283 К.

Для образца № 6- ($H_2O + 2,5\% TiO_2$) (рисунок 4.7.6):

$$T=283 \text{ К}; \quad \frac{P}{\rho^2} = 200 \cdot 10^{-18} \rho^6 - 244,0, \quad (4.7.32)$$

$$T=293 \text{ К}; \quad \frac{P}{\rho^2} = 200 \cdot 10^{-18} \rho^6 - 222,0, \quad (4.7.33)$$

$$T=323 \text{ К}; \quad \frac{P}{\rho^2} = 200 \cdot 10^{-18} \rho^6 - 208,0, \quad (4.7.34)$$

$$T=353 \text{ К}; \quad \frac{P}{\rho^2} = 200 \cdot 10^{-18} \rho^6 - 192,0, \quad (4.7.35)$$

$$T=393 \text{ К}; \quad \frac{P}{\rho^2} = 500 \cdot 10^{-18} \rho^6 - 425,0, \quad (4.7.36)$$

$$T=433 \text{ К}; \quad \frac{P}{\rho^2} = 333,3 \cdot 10^{-18} \rho^6 - 256,7, \quad (4.7.37)$$

Коэффициенты уравнения состояния (4.7.32) – (4.7.37) в виде таблиц представлена ниже.

Таблица 4.7.6.- Значение коэффициента уравнения состояния (УС) Мамедова – Ахундова при различных температурах

T, К	$B \cdot 10^{-18}, \frac{\text{Па} \cdot \text{кг}^4}{\text{м}^3}$	- A, $\frac{\text{Па} \cdot \text{м}^4}{\text{кг}^2}$
------	--	---

283	200	244,0
293	200	222,0
323	200	208,0
353	200	192,0
393	500	425,0
433	333,3	256,7

Для образца № 7- ($H_2O + 3,0\% TiO_2$) (рисунок 4.7.9):

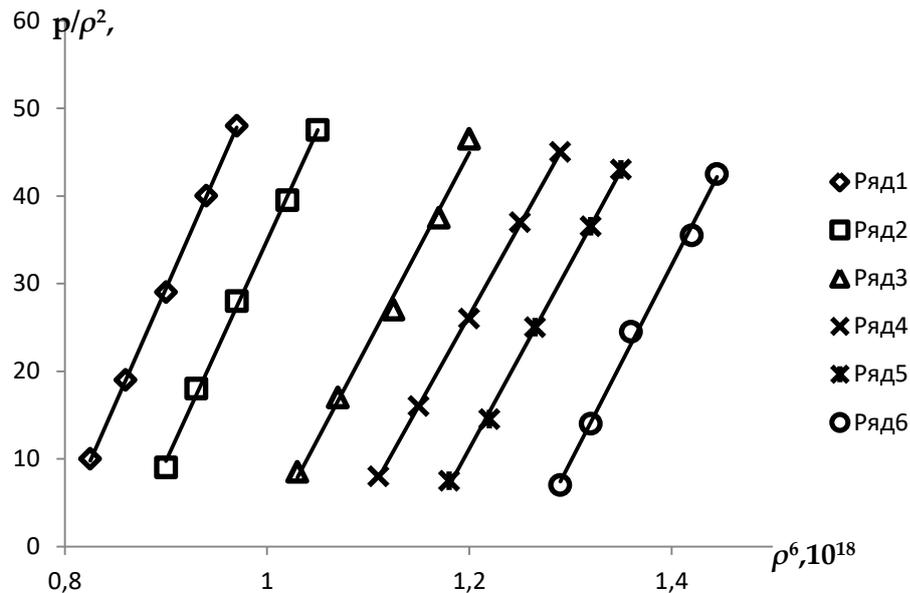


Рисунок 4.7.9 - Зависимость $\frac{P}{\rho^2}$ от ρ^6 для образца ($H_2O + 2,5\%TiO_2$) при различных температурах и давлениях: 1-433; 2-393; 3-353; 4-323; 5-293; 6-283 К.

$$T=283 \text{ К}; \quad \frac{P}{\rho^2} = 250 \cdot 10^{-18} \rho^6 - 315,0, \quad (4.7.38)$$

$$T=293 \text{ К}; \quad \frac{P}{\rho^2} = 250 \cdot 10^{-18} \rho^6 - 290,0, \quad (4.7.39)$$

$$T=323 \text{ К}; \quad \frac{P}{\rho^2} = 222,2 \cdot 10^{-18} \rho^6 - 241,1, \quad (4.7.40)$$

$$T=353 \text{ К}; \quad \frac{P}{\rho^2} = 222,2 \cdot 10^{-18} \rho^6 - 221,1, \quad (4.7.41)$$

$$T=393 \text{ К}; \quad \frac{P}{\rho^2} = 285,7 \cdot 10^{-18} \rho^6 - 247,1, \quad (4.7.42)$$

$$T=433 \text{ К}; \quad \frac{P}{\rho^2} = 250 \cdot 10^{-18} \rho^6 - 195,7, \quad (4.7.43)$$

Коэффициенты уравнения состояния (4.7.38 - 4.7.43) в виде таблиц представлены ниже.

Таблица 4.7.7.- Значение коэффициентов уравнения состояния (УС) Мамедова – Ахундова при различных температурах

Т,К	$B \cdot 10^{-18}, \frac{\text{Па} \cdot \text{кг}^4}{\text{м}^3}$	- А, $\frac{\text{Па} \cdot \text{м}^4}{\text{кг}^2}$
283	250	315,0
293	250	290
323	222,2	241,1
353	222,2	222,1
393	285,7	247,1
433	250	197,5

4.8. применение уравнения типа Тейта для расчета вязкости и плотности электролитов и растворов с эффектами памяти

В данном параграфе приводятся результаты обобщения и получения уравнения состояния типа Тейта для электролитов системы $\text{H}_2\text{O} + \text{TiO}_2$ в условиях изменения как температуры, так и давления с общей относительной погрешностью использованного метода с учетом $\alpha = 0,95, 0,1\%$. Уравнения состояния электролитов и наножидкостей даст возможность рассчитать калориметрические и термодинамические их свойства при относительно разных условиях изменения температуры и давления [1, 20, 21, 86, 103, 106, 109, 115, 121, 125, 128, 130-139, 147, 148, 154-157, 163, 165], [170-А, 175-А, 182-А, 185-А, 190-А].

Создание установки, которая позволяла бы проводить эксперименты как с изменением температуры, так и с изменением давления опыта, требует выполнение большого объема работ, для реализации которой необходима различная аппаратура, в частности вискозиметр, грузопоршневые манометры МП-600, МП-2500 и многое другое.

Для выполнения поставленной задачи можно собрать экспериментальную установку на основе U-образного вискозиметра МПЖ-4.

Надо отметить, что коэффициент динамической вязкости простых эфиров [1,20,21], сложных эфиров (ацетатов), кислот, бензолов, ксилолов, алифатических спиртов и др. в различных диапазонах изменения

температуры и давления были исследованы Назиевым Я.М, Гусейновым С.О., Шахвердиевым А.А. [1,20, 21,105,125,126,150].

Впервые аппаратура для измерения коэффициента динамической вязкости (60 годы прошлого века) разработана профессором Голубовым И.Ф. (г. Москва, ГИАП). Далее веток науки перешел в г. Баку (Азербайджан), Грозный (Чечня), Махачкала (Дагестан).

В частности, профессор Назиев Я.М. и его ученики как профессор Шахвердиев А.А., Сафаров Дж. и др. создали уникальную установку для измерения коэффициента динамической вязкости с выносными капиллярами в 80 годы 20 века [1,20, 21,105,125,126,150].

Выше названные ученики профессора Назиева Я.М. в то время занимались исследованием вязкости углеводородов и водных растворов. Надо отметить, что установка, которую разработали и создали ученики профессора Назиева Я.М., в 1990г. профессор Сафаров М.М. использовал для измерения коэффициента динамической вязкости простых эфиров и водных растворов гидразина, погрешность которого составляла около 2,6% [21, 86-89, 98, 115, 117, 121, 125].

В настоящее время для исследования динамической вязкости растворов бензола при атмосферном давлении и изменении температуры (в установленном диапазоне возможностей установки) под руководством профессора Сафарова М.М., Неъматова А.Н. выполнен ряд экспериментов. Кроме того была исследована вязкость наножидкостей с носителями различной природы (масла, углеводороды, простые эфиры, растворы бензола и др.) и в чистом виде, и с различной массовой концентрацией наночастиц (Ti, Ag, Al₂O₃, Ni, и др.), для чего была использована установка, имеющаяся в лаборатории кафедры общей физики ДГПУ им. С.Айни. Данная установка позволяет провести измерения коэффициента динамической вязкости наножидкостей при атмосферном давлении и при различных температурах.

Создание физико-химических моделей для расчета процессов теплообмена всегда сопровождается необходимостью в наличии

данных по теплофизическим и реологическим свойствам, причем в достаточно широком интервале изменения параметров состояния. Однако опыты показали, что устройство ограничено в возможностях измерения вязкости с охватом большого диапазона изменения температуры и давления, в связи с чем мы решили воспользоваться уравнением типа Тейта в следующем виде [1,20,21,89,90,103,105,108,109,113,125,126,150,158,159,160], [178-А, 179-А, 180-А, 184-А, 187-А, 190-А]:

$$\eta = \eta_0 \left(1 - A \ln \left| \frac{B+P}{B_0+P_0} \right| \right), \quad (4.8.1)$$

$$\nu = \nu_0 \left(1 - A \ln \left| \frac{B+P}{B_0+P_0} \right| \right), \quad (4.8.2)$$

где η, η_0 - коэффициент динамической вязкости растворов при изменяемых температурах и давлениях, ν, ν_0 - кинематическая вязкость при заданных параметрах состояния T, P и T_0, P_0 : A и B - соответственно коэффициенты уравнения Тейта.

Так, выражения (4.8.1) и (4.8.2) по сути являются уравнением состояния жидкостей, а как известно, составление уравнения состояния, соответствующее требованиям, представляет собой одну из важных задач молекулярной физики. Если для газовых и твердых состояний материала данная проблема частично нашла свое решение, то для жидкостей и в частности для наножидкостей этот вопрос остается открытым. На сегодняшний день не существует универсального уравнения, либо метода, позволяющего составить соответствующее уравнение состояния, отвечающего универсальности и точности для расчетов их ТФС. В связи с этим ученые все чаще прибегают к составлению эмпирических, либо полуэмпирических уравнений, которые пока дают не плохой результат. К таковым можно отнести уравнения, представленные Тейтом, Марнегхеном, Бергом, Ахундовым-Мамедовым [1,20, 21,89,90,103, 105,108,109,113, 125, 126, 150,158,159,160]. Среди

перечисленных наибольшее распространение получило уравнение состояния, предложенное в свое время Тейтом, а также его различные модификации [1,20, 21,89,90,103, 105,108,109,113, 125, 126, 150,158,159,160].

Тамман [158], один из тех исследователей, который представил наиболее удачную модификацию уравнения Тейта в следующем виде [21,105,117,131, 134,137, 139, 125, 154-157,163,], [185-А, 186-А, 190-А]:

$$-\frac{1}{v_0} \left(\frac{\partial v}{\partial P} \right)_T = \frac{A}{B+P} \quad (4.8.3)$$

где А и В – параметры, которые несут температурную зависимость нежеле от давления.

Уравнение (4.8.3) в интегральной форме приобретает следующий вид [168-А, 179-А, 180-А, 181-А, 184-А, 187-А, 189-А, 190-А]:

$$v = v_0 \left(1 - A \ln \frac{B+P}{B+P_0} \right), \quad (4.8.4)$$

где P₀- атмосферное давление, Па.

В наиболее известных методиках, создающих теоретическую основу для составления уравнения Тейта, с структурной точки зрения обычно получают сложные уравнения, в которых после проведения определенных опытов и полученных на их основе данных, принимают постоянными некоторые величины, входящие в состав этих уравнений, которые считают функциями температуры, вязкости или плотности, либо зависящими только от температуры.

Воспользовавшись результатом опытных исследований по плотности простых эфиров в жидком состоянии при атмосферном давлении и изменении температуры (до температуры кипения, T_{кип}) [21] был составлен модифицированный вариант уравнения Тейта в следующем виде [170-А, 174-А, 176-А, 182-А, 183-А, 185-А, 186-А, 190-А]:

$$\rho = \frac{\rho_0}{\left\{ 1 - C(T) \ln \left[\frac{B(T)+P}{B(T)+P_0} \right] \right\}}, \quad (4.8.5)$$

$$\text{где } C(T) = \left[1,82 - 0,8 \left(\frac{T}{T_1} \right) \right] (1,6\mu^2 - 0,43\mu + 3,14 \cdot 10^{-2}), \quad (4.8.6)$$

$$B(T) = \left[2,53 - 1,52 \left(\frac{T}{T_1} \right) \right] (5,98 \cdot 10^7 \mu^2 - 1,24 \cdot 10^7 \mu + 1,09 \cdot 10^8), \quad (4.8.7)$$

Полученное уравнение (4.8.5) с учетом выражений (4.8.6) и (4.8.7) хорошо описывает экспериментальные данные по плотности жидких простых эфиров (диэтил-, дибутил-, диамил-, диизопропил-, диалил-, дигексил-, диоктил- и др.) в интервале температур $T=(290-550)K$ и давлений (4,98-98,1) МПа со средней погрешностью (0,5-3,6) % [21].

Так, нами было установлено, что коэффициенты в составе предложенного Тейтом уравнения состояния носят переменный характер относительно простых эфиров и имеют температурную зависимость. Изучению уравнения состояния, предложенной Тейтом, посвящено большое количество научных публикаций. Относительно его коэффициентов, тоже не мало вопросов.

Некоторые [132,136,163,152] считают, что коэффициент A^{-1} представляет собой меру крутизны отталкивающих сил, который чаще всего принимают постоянным. Однако отталкивающие силы в зависимости от большого диапазона изменения параметров состояния не могут быть одинаковыми, даже для представителей одного и того же класса жидкостей. Другие исследователи утверждают, что A представляет число молекул в сфере радиуса взаимодействия межмолекулярных сил, т.е. первое координационное число. Противоречивые мнения существуют и относительно параметра B [114,119-132, 134-139]. Однако практически все исследователи считают, что этот коэффициент с ростом температуры уменьшается. Одной и той же температурной зависимости соответствуют разные закономерности, например, гиперболическая экспоненциальная либо степенная [128,131,159]. Нашим исследованиям простых эфиров соответствовала степенная закономерность [21].

Обычно, для составления уравнения состояния типа Тейта для расчета плотности жидкостей (электролитов, наножидкостей и др.) при

изменении температуры и давления (на основе экспериментальных данных [21]), на плоскости 2D, т.е. координаты (x,y), необходимо построить соответствующий график зависимости [21] $\left(\frac{\Delta P}{\Delta \eta}\right)_T$ от (P) или $\left(\frac{\Delta P}{\Delta \rho}\right)_T$ от (P), т.е.

$$\left(\frac{\Delta P}{\Delta \eta}\right)_T = f(P), \quad (4.8.8)$$

$$\left(\frac{\Delta P}{\Delta \rho}\right)_T = f(P), \quad (4.8.9)$$

После чего получаем прямые линии (рисунок 4.8.1 и 4.8.2).

Надо отметить, что коэффициенты A и B уравнение прямых линий зависят от температуры.

$$A = f(T) \text{ и } B = f(T), \quad (4.8.10)$$

Эти коэффициенты рассчитаны для каждой изотермы при помощи метода наименьших квадратов и путем графоаналитического анализа, затем они с погрешностью 0,15% аппроксимированы номиналами второй степени [21].

$$A(T) = \sum_{i=0}^2 \alpha_i T^i; B(T) = \sum_{i=0}^2 \beta_i T^i \quad (4.8.11)$$

После, рассчитав коэффициенты α_i и β_i , получаем температурную зависимость A(T), а B(T) рассчитывается только для диэтилового эфира, находящегося в состоянии жидкости [182-А, 183-А, 185-А, 186-А, 190-А].

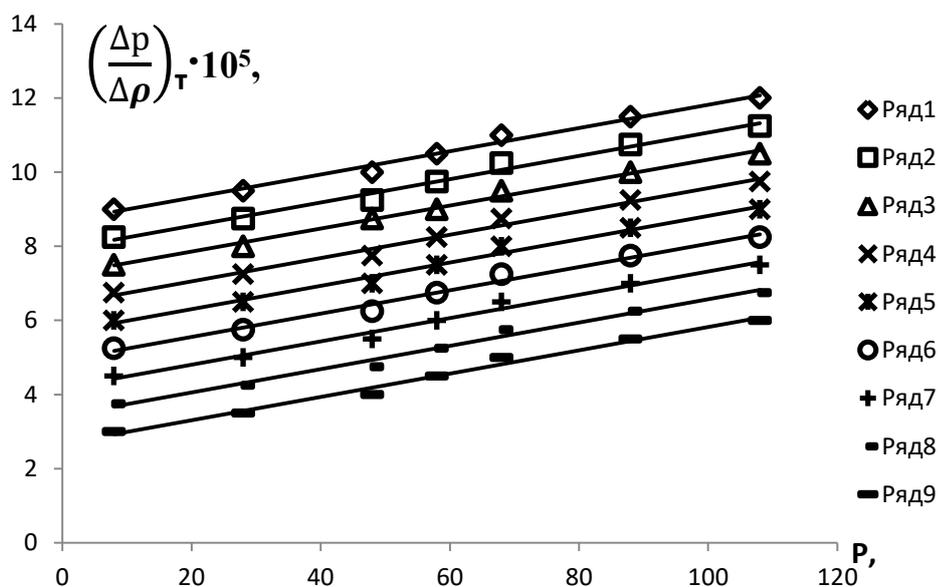


Рисунок 4.8.1- Зависимость $\left(\frac{\Delta\rho}{\Delta\rho}\right)_\tau = f(P)$ для раствора системы ($\text{H}_2\text{O} + 2.0\% \text{TiO}_2$): 1-293,5; 2-317,4; 3-341,6; 4-396,7; 5-422,7; 6-450,9; 7-480,0; 9-453,0К.

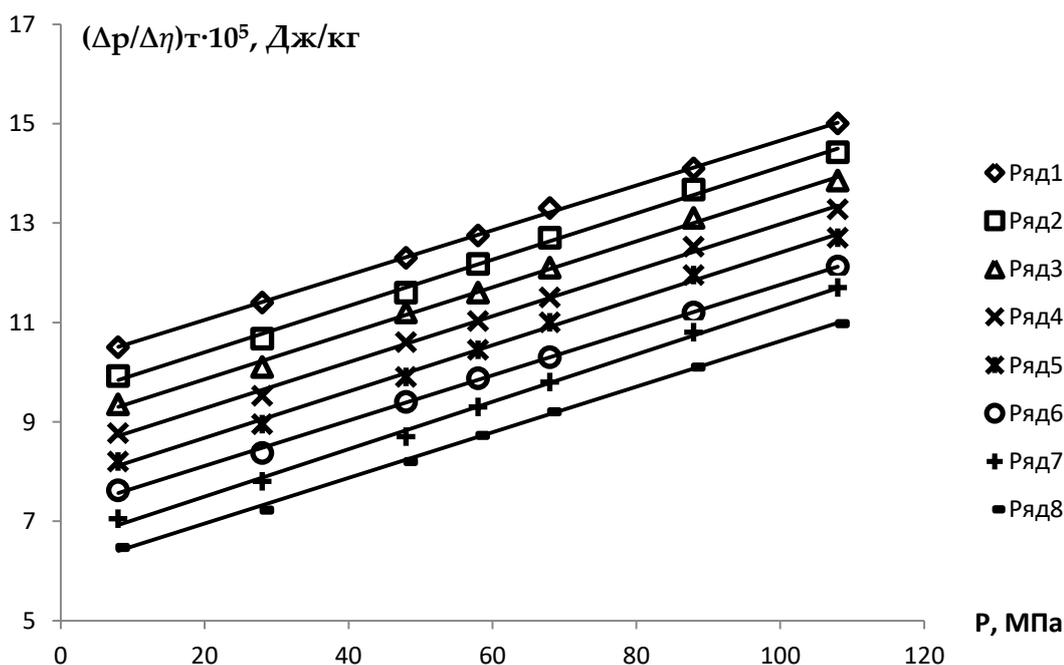


Рисунок 4.8.2- Зависимость $\left(\frac{\Delta\rho}{\Delta\eta}\right)_\tau = f(P)$ для раствора системы ($\text{H}_2\text{O} + 2.0\% \text{TiO}_2$): 1-293,0; 2-313,8; 3-339,8; 4-393,2; 5-423,0; 6-453,0; 7-473,2; 8-493,0; 9-513,6К.

При расчете коэффициентов уравнения прямых линий, которые получены на основе данных по коэффициенту динамической вязкости для растворов системы ($\text{H}_2\text{O} + 2.0\% \text{TiO}_2$) в жидком состоянии:

$$C(T) = \sum_{i=0}^2 c_i T^i; D(T) = \sum_{i=0}^2 d_i T^i \quad (4.8.12)$$

Согласно проведенным исследованиям установлено, что в уравнении типа Тейта коэффициенты не являются постоянными, а зависят от параметров состояния (для простых эфиров функции молярной массы), а для растворов дополнительно зависят еще и от концентрации добавляемых наночастиц в изучаемую жидкость.

В связи с чем для расчета плотности растворов системы ($H_2O + TiO_2$) используются коэффициенты номиналами выражения (4.8.11), а для определения коэффициента динамической вязкости используются коэффициенты $C(T)$ и $D(T)$ согласно выражению (4.8.12).

Выводы к четвертой главе

1. *Впервые* на основе экспериментальных данных и теоретико-численных методов получены аппроксимационные зависимости для расчета плотности и коэффициента динамической вязкости растворов системы вода и диоксид титана с эффектом «памяти», а также было использовано уравнение состояния Мамедова-Ахундова, типа Тейта и соответствующие значения его коэффициентов.

2. *Впервые* рассчитаны термодинамические и калорические свойства растворов при различных температурах и давлениях.

3. Используя экспериментальные данные по плотности образцов нами *впервые* был произведен расчет коэффициентов изобарического расширения и изотермической сжимаемости растворов при разных значениях параметров состояния.

4. **Установлено**, что разность теплоемкости исследуемых водных растворов, содержащих различные массовые концентрации диоксида титана с ростом массовой концентрации TiO_2 при различных температурах и давлениях увеличивается, что видимо связано с большим

значением теплоемкости TiO_2 по сравнению с теплоемкостью чистой воды.

5. **Показано**, что повышение давления способствует уменьшению разности теплоемкостей образцов почти по линейному закону, что объясняется ростом плотности при увеличении давления.

6. **Установлено**, что с ростом температуры внутреннее давление водных растворов содержащих различные массовые концентрации наночастиц диоксида титана (TiO_2) увеличивается, что связано с ростом взаимодействия молекул исследуемых растворов с повышением температуры и соответственным ростом коэффициента объемного расширения относительно изотермического коэффициента сжимаемости.

ВЫВОДЫ

На основе обзора и анализа научно - технической и патенто – лицензионной литературы была поставлена цель и сформулированы задачи исследования, по результатам которых были сделаны следующие выводы:

1. *Показано*, что введение наночастиц в воду меняют структурообразование материалов. Также показаны причины изменения плотности и вязкости растворителей. Представлены результаты экспериментального исследования плотности и динамической вязкости наножидкостей системы диоксида титана с массовой концентрацией до 3%. [167-А, 174-А, 175-А, 176-А, 182-А, 183-А, 185-А, 186-А, 187-А, 190-А], [168-А, 175-А, 178-А, 179-А, 180-А, 181-А, 184-А, 187-А, 188-А, 189-А, 190-А].

2. *Показана* необходимость знания теплофизических свойств наножидкостей при инженерно-технических расчетах, создании новых механизмов и машин (определении КПД), в ракетостроении при определении тепловых свойств, выяснении механизма активности компонентов, исследовании теплофизических характеристик. [167-А, 174-А, 175-А, 176-А, 182-А, 183-А, 185-А, 186-А, 187-А, 190-А], [168-А, 175-А, 178-А, 179-А, 180-А, 181-А, 184-А, 187-А, 188-А, 189-А, 190-А].

3. *Собраны* экспериментальные установки на основе методов гидростатического взвешивания и капиллярного вискозиметра с выносным капилляром для измерения плотности и динамической вязкости растворов в зависимости от температуры как при давлении атмосферного воздуха, так и при высоких параметрах состояния, погрешность которых после оценочных расчетов составила 1,28 и 3.0% соответственно. [167-А, 174-А, 175-А, 176-А, 182-А, 183-А, 185-А, 186-А, 187-А, 190-А], [168-А, 175-А, 178-А, 179-А, 180-А, 181-А, 184-А, 187-А, 188-А, 189-А, 190-А].

4. *Впервые* на указанных опытных устройствах нами были получены расчетно-экспериментальные данные по плотности и коэффициенту

динамической вязкости растворов системы вода и диоксид титана, концентрация которого составляла до 3,0%, как при давлении атмосферного воздуха, так и при высоких параметрах состояния [167-А, 174-А, 175-А, 176-А, 182-А, 183-А, 185-А, 186-А, 187-А, 190-А], [168-А, 175-А, 178-А, 179-А, 180-А, 181-А, 184-А, 187-А, 188-А, 189-А, 190-А].

5. **Установлена** закономерность изменения плотности и вязкости исследуемых растворов и механизм переноса импульса в этих растворах. А также **получен ряд** аппроксимационных зависимостей (программы Matlab и Excele) по плотности и динамической вязкости растворов системы вода и диоксид титана, т.е. показана корреляция между этими параметрами при различных параметрах состояния [167-А, 174-А, 175-А, 176-А, 182-А, 183-А, 185-А, 186-А, 187-А, 190-А], [168-А, 175-А, 178-А, 179-А, 180-А, 181-А, 184-А, 187-А, 188-А, 189-А, 190-А].

6. **Впервые** для проведения расчета плотности и динамической вязкости исследуемых растворов с эффектами памяти нами использовано уравнение состояния типа Тейта и уравнение состояния Мамедова-Ахундова.

7. **Впервые** на основе экспериментальных данных по плотности исследуемых растворов нами рассчитан коэффициент изобарического расширения и коэффициент изотермический сжимаемости, а также разность теплоемкостей исследуемых растворов с добавками нанопорошка с эффектами памяти в зависимости от температуры и давления [167-А, 174-А, 175-А, 176-А, 182-А, 183-А, 185-А, 186-А, 187-А, 190-А].

8. **Установлено**, что с повышением температуры плотность исследуемых растворов содержащих разное массовое концентрации наночастицы диоксида титана уменьшается по линейному закону, а с ростом давления растет [167-А, 174-А, 175-А, 176-А, 182-А, 183-А, 185-А, 186-А, 187-А, 190-А].

9. **Показано**, что с ростом массовой концентрации наночастиц диоксида титана в составе исследуемых растворов их плотность увеличивается и влияния температуры на изменение их плотности растет, что связано

ростом массы исследуемых растворов в их единицу объема и ростом межмолекулярного расстояния [167-А, 174-А, 175-А, 176-А, 182-А, 183-А, 185-А, 186-А, 187-А, 190-А], однако при повышении внешнего давления ее влияние уменьшается в силу уплотнения молекул исследуемых растворов.

10. *Показано*, что при температуре $T=433\text{K}$ при изменении давления от 9,81МПа до 49,01МПа плотность растворов, содержащих различную массовую концентрацию TiO_2 увеличивается почти одинаково и примерно составляет 3,0%, что свидетельствует о том, что при повышенных температурах взаимодействие молекулы растворов не очень сильно отличаются [167-А, 174-А, 175-А, 176-А, 182-А, 183-А, 185-А, 186-А, 187-А, 190-А].

11. *Установлено*, что коэффициент динамической вязкости водных растворов, содержащих различную массовую концентрацию TiO_2 с ростом температуры уменьшается по закону параболы, а с повышением давления растет [168-А, 175-А, 178-А, 179-А, 180-А, 181-А, 184-А, 187-А, 188-А, 189-А, 190-А].

12. *Установлено*, что увеличение динамической вязкости водных растворов с ростом массовой концентрации наночастиц диоксида титана связано с большим вкладом наночастицы в передачи импульса из одного изотермического слоя к другому в водных растворах, содержащих различное количество TiO_2 .

13. Показано, что с ростом давления влияние температуры на изменение коэффициента динамической вязкости водных растворов, содержащих различную массовую концентрацию наночастиц диоксида титана уменьшается, что связано с хорошим уплотнением молекулы исследуемых объектов с ростом давления [168-А, 175-А, 178-А, 179-А, 180-А, 181-А, 184-А, 187-А, 188-А, 189-А, 190-А].

14. *Установлено*, что чем больше будет диапазон изменения температуры, тем больше будет влияния давления на изменение коэффициента динамической вязкости водных растворов, содержащих

различное количество наночастиц диоксида титана, что связано с увеличением расстояния между молекулами водных растворов;

– что с ростом массовой концентрации наночастиц диоксида титана в состав водных растворов взаимодействия между их молекулы увеличивается и это затрудняет приближении молекулы друг к другу под действием внешнего давления и переноса импульса молекулы из одного изотермического слоя к другому уменьшается, что приведет к уменьшению влияния внешнего давления на коэффициент динамической вязкости исследуемых объектов при различных температурах.

– что разность теплоемкости исследуемых водных растворов содержащих различное массовое концентрации диоксида титана с ростом массовой концентрации TiO_2 при различных температурах и давлениях увеличивается, что видимо связано с большим значением теплоемкости TiO_2 по сравнению теплоемкости чистой воды.

– что с ростом температуры внутренняя давления водных растворов содержащих различное массовое концентрации наночастицы диоксида титана (TiO_2) увеличивается, что связано с росту взаимодействия молекулы исследуемых растворов с повышением температуры.

15. **Показано**, что рост внутреннего давления исследуемых водных растворов, содержащих различное количество TiO_2 с повышением температуры, связано с большим ростом коэффициента объемного расширения, относительно их коэффициента изотермической сжимаемости [167-А, 174-А, 175-А, 176-А, 182-А, 183-А, 185-А, 186-А, 187-А, 190-А], [168-А, 175-А, 178-А, 179-А, 180-А, 181-А, 184-А, 187-А, 188-А, 189-А, 190-А].

Рекомендации, перспективы дальнейшей разработки темы исследования диссертационной работы

1. Составлены подробные таблицы плотности и динамической вязкости исследуемых растворов системы (воды + наночастиц диоксид титана) в интервале температур (283-433)К и давления (0,101-49,01)МПа при

различных концентрациях диоксида титана (0-2,5)% и дополнен банк данных новыми данными, которые могут быть применены на практике при инженерных расчетах.

2. Разработанная модель структуры наножидкостей позволила выполнить анализ процесса переноса импульса энергии в растворах системы вода и диоксид титана.

3. Результаты исследования внедрены в Институте промышленности Министерства Промышленности и новых технологий Республики Таджикистан при расчетах технологических процессов.

4. Модернизированная аппаратура для исследования плотности и динамической вязкости наножидкостей используется аспирантами, магистран-тами, соискателями, докторантами в научных исследованиях и студентами для выполнения лабораторных и дипломных работ в научных лабораториях кафедры «Общая физика» ТГПУ им. С. Айни. (акт о внедрении прилагается).

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ИНФОРМАЦИИ

1. **Зарипова, М.А.** Влияние наночастиц на изменение теплофизических, термодинамических свойств некоторых кислородосодержащих, азотосодержащих органических жидкостей при различных температурах и давлениях./ **М.А. Зарипова**// Дис. д-ра тех.наук, Душанбе,2016.-305с.
2. **Тиллоева, Т.Р.** Теплофизические и термодинамические свойства коллоидного водного раствора наносеребра. / **Т.Р. Тиллоева**// Дис. ... к.т.н. Душанбе. 2016.-164с.
3. **Гуломов, М.М.** Влияние углеродных нанотрубок на изменение тепло, температуропроводности и плотности жидкого диэтилового эфира./**М.М. Гуломов** //Дис. к.т.н. Душанбе, 2016.-132с.
4. **Сафаров, Джавид** (P, ρ , T) зависимость ионных жидкостей / **Джавид Сафаров**// www.nist.gov
5. **Ивановский, А.Л.** Углеродные нанотрубки: синтез и моделирование /**А.Л. Ивановский** // Успехи химии, -2002. -Т.71. -№3.-С.203-224.
6. **Суздаев, И.П.** Нанотехнология: Физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов./**И.П. Суздаев**// -М: ЛИБРКОМ. -529 С.
7. **Димитриев, А.С.** Введение в нанотеплофизику// **А.С. Димитриев**//М.: БИНОМ. Лабораторный знаний, 2015, -790 с
8. **Глечинский, Б.С.** Компьютерное моделирование наночастиц, формирование и их рост в паровой фазе процесса конденсации/ **Б.С. Глечинский, С.А. Кореченко** // www.nist.gov.
9. **Мищенко, С.В.** Углеродные наноматериалы. Производство. Свойства. Применение./ **С.В. Мищенко, А.Г Ткачев** //-М.2008.-320с.
10. **Солнцев, К.А.** Получение углеродных наноматериалов методом вакуумно-плазменного синтеза./**К.А. Солнцев, П.И. Иващенко, А.Л. Имельянов, Л.С. Щац** //Тезыси докладов конференции

“Нанотехнологии- производство-2006”, 29-30 ноября 2006, г.Фрязно.- С.168-169.

11. ПАТ.6884404 США, МКИ D 01 F9/12. Способ производства углеродных нанотрубок и/или фуллеренов и аппарат для его реализации. /**Kazunori Anazava, KeiShimotani, HiroyukiWatanabe, MassuaakiShimizu**-26 апр.2005.-7с.

12. **Шульга, Ю.М.**ИК и КР спектры фуллеритов $(\text{CH}_4)_{0,56} \text{C}_{60}$ и $(\text{C}_2\text{H}_2)_{0,23} \text{C}_{60}$./ **Ю.М. Шульга, В.М. Мартиненко, С.А. Баскаков** // Фуллерены и наноструктуры в конденсированных средах. Минск.-2011.-С.104-108.

13. **Пушкарчук, А.Л.** Моделирование электронных и спиновых свойств комплекса $\text{C}_{60}(\text{FeCr}_2)_2$ методом функционала плотности./ **А.Л. Пушкарчук** // Наноструктуры в конденсированных средах: сб.науч.ст./ П.А. Витязь-Минск. 2011,-С.162-168.

14. **Сафаров, М.М.** Влияние некоторых наноразмерных амфотерных оксидов на изменение тепло-, электро- и термодинамических свойств гидразингидрата./ **М.М. Сафаров, М.А. Зарипова, Х.А. Зоиров, А.С. Назруллоев** // Монография. Душанбе.-2016.-229с.

15. **Патанкар, С.В.** Численное решение задач теплопроводности и конвективного теплообмена при течении в каналах/ **С.В. Патанкар**// Пер. с англ. Е.В. Калабина; под. ред. Г.Г. Янькова.- М.: Издательство МЭИ, 2003.-312с

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

17. **Давлатов, Н. Б.** Расчет и оптимизация теплового реактора с учетом интенсификации рабочего тела (гидразина+ фуллерен C_{60}) и (моторное масло +силикагель)./ **М.М. Сафаров, М.А. Зарипова, Д.А. Шарифов, Н.Б. Давлатов, Ф.Х. Насруллоев, А.С. Назруллоев** //Материалы Республиканской научно-практической конференции ”Ломоносовские

чтения”, посвященной 1150-летию ученого в области химии и медицины Абубакра Закирия Розы (24-25 апреля 2014г.), Филиал МГУ, Душанбе-2014,-С.26-28.

18. **Зарипова, М.А.** Об одном методе расчета термодинамических свойств водных растворов фенилгидразина /П.А. Пулатов, М.М. Сафаров, **М.А. Зарипова**// Инженерно-физический журнал, Минск, 1999.- №2, Т.72, Деп. № 2035 -Б98.- 7с.

19. **Третьяков, Ю.Д.** Водородные соединения азота и их производные. Гидразин. Гидроксиламин. / **Ю.Д. Третьяков и др.** // Неорганическая химия. Химия элементов: Учебник для вузов. В 2 книгах. Кн. II / Ю. Д. Третьяков, Л. И. Мартыненко, А. Н. Григорьев, А. Ю. Цивадзе.- М.: Химия, 2001.- С. 869-872.-583 с., ил. — ISBN 5-7245-1214-9;

20. **Зарипова, М.А.** Теплофизические и термодинамические свойства водных растворов гидразина и фенилгидразина. / **М.А. Зарипова**// Монография. Душанбе,2007.-129с.

21. **Сафаров, М.М.** Теплофизические свойства простых эфиров и водных растворов гидразина при различных температурах и давлениях. //Дис. д-ра техн.наук, Душанбе, 1993, 495с.

22. **Раков, Э.Г.** Методы получения углеродных нанотрубок. /**Э.Г. Раков**// Успехи химии, -2000. -Т.69. -№1. -С.41-59.

23. **Раков, Э.Г.** Химия и применение углеродных нанотрубок./ **Э.Г. Раков** // Успехи химии, -2001. -Т.70. -№10. -С.934-973.

24. **Kroto, H.W.** C₆₀: Buck- minster fullerene/ **H.W. Kroto, S.Heath, S.C. O'Brien, R.F. Curl, R.E. Smalley** //Nature.-1985. -V. 318. -P.162-163.

25. **Osawa, E.** Super aromaticity/ **E.Osawa** // Kagaku (Kyoto), Jap.-1970.- V.25.-№9.-P.854-863.

26. **Бочвар, Д.А.** О гипотетических системах: карбододекаэдре, с-икосаэдре-и карбон-икосаэдре / **Д.А. Бочвар, Е.Г. Еальперн**/ Докл. АН СССР, 1973. -Т.209. -№3. -С.610-612.
27. **Крото, Г.** Симметрия, космос, звезды и C_{60} /**Г. Крото**// УФН. 1998. -Т. 168. -№3. -С.343-358.
28. **Kratschmer, W.** Solid C_{60} : a new form of carbon/ **W. Kratschmer, L.D. Lamb, K. Fostiropoulos, D.R. Huffman**//Nature, -1990. -V.347. -P.354-358.
29. **Braun, T.** The epidemic spread of fullerene research/ **T. Braun** // Angew. Chem.Int. Ed. -1992. -V.31. -P.588-589.
30. **Соколов, В.И.** Фуллерены - новые аллотропные формы углерода: структура, электронное строение и химические свойства/ **В.И.Соколов, И.В. Станкевич** // Успехи химии. -1993. -Т.62. - №5. -С.455-473.
31. **Kratschmer, W.** Fullerenes: new form of crystalline carbon /**W. Kratschmer, D.R. Huffman** //Carbon, -1992.- V.30. -№8. -P.1143-1147.
32. **Вольпин, М.Е.** Фуллеренная аллотропная форма углерода/ **М.Е. Вольпин** //Вестник РАН, -1993. -№1. -С.25-30.
33. **Елецкий, А.В.** Фуллерены/**А.В. Елецкий, Б.М.Смирнов**// УФН, 1993. - Т.163. -№2.-С.33-60.
34. **Козырев, С.В.** Фуллерены, строение динамика кристаллической решетки, электронная структура и свойства/ **С.В. Козырев, В.В. Роткин** // ФТП, -1993. -Т.27.-№49.-С.1409-1434.
35. **Елецкий, А.В.** Фуллерены и структуры углерода/ **А.В. Елецкий, Б.М. Смирнов** // УФН. -1995.-Т.165. -С.977-1009.
36. **Сидоров, Л.Н.** Фуллерены/ **Л.Н. Сидоров, М.А. Юровская, А.Я. Борщевский, И.В. Трушков, И.Н. Иоффе.** - М.: Экзамен, 2005.-688 С.

37. **Gleiter, H.** Nanostructured materials: Basic concepts and microstructure/ **H.Gleiter** // Acta materialia. -2000.-V.48, -P. 1-28.
38. **Kroto, H.** Fullerene Science - a most international endeavor/ **H. Kroto** // J.Mol. Graph. Modell. -2001. -V.19. -P.187-188.
39. **Kroto, H.** Fullerene Science - a most international endeavor/ **H. Kroto** // J.Mol. Graph. Modell. -2001. -V.19. -P.187-188.
40. **Трефилов, В.И.** Фуллерены основа материалов будущего/ **В.И. Трефилов, Д.В. Щур** и др.// - АДЕФ-Украина, Киев, 2001. - 148с.
41. **Osawa, E.** Analysis of the growth mechanism of carbon nanotubes by C-2 ingestion/ **E. Osawa, M. Yoshida, H.Ueno** et al. // Fullerene Science and Technology, 1999.-V.7.-N2. -P.239-262.
42. **Iijima, S.** Helical microtubules of graphitic carbon/ **S. Iijima**//Nature,-1991. -V.354. -P.56-58.
43. **Елецкий, А.В.** Углеродные нанотрубки/ **А.В. Елецкий** // УФН, -1997. - Т. 167. -№9. -С.945-972.
44. **Харрис, П.** Углеродные нанотрубки и родственные структуры/ **П.Харрис**-Новые материалы XXI.-М.: Техносфера, 2003. -336с.
45. **Неретин, И.С.** Кристаллохимия фуллеренов/ **И.С. Неретин, Ю.Л. Слово-хотов**// Успехи химии, -2004. -Т.73.-№5. -С.4922-4925.
46. **Крестинин, А.В.** Однослойные нанотрубки: механизм образования и перспективы технологии производства на основе электродугового процесса/ **А.В.Крестинин**//Рос.хим.журн., 2004. -Т.48.-№5.-С.21-27.
47. **Iijima, S.** Single-shell carbon nanotubes of 1-nm diameter/ **S. Iijima, T. Ichi-hashii** // Nature, -1993.-V.363. -P.603-605.

48. **Andrews, R.** Multiwall carbon nanotubes: synthesis and application/ **R. Andrews**, J.D. Jacques, D. Qian, T. Rantell//Acc.Chem.Res. -2002. -V.35. -P. 1008-1017.
49. **Du, F.** Nanotubes in multifunctional polymer nanocomposites/ **F.Du**, K.I. Winey// Handbook of Nanomaterials. Ed.by Yu.Gogosi. -2006.- CRC Press. - P.565-584.
50. **Dai, H.** Carbon nanotubes: Synthesis, integration and properties/**H. Dai** // Acc. Chem.Res. -2002, -V.35. -PP.1035-1044.
51. **Раков, Э.Г.** Пиролитический синтез углеродных нанотрубок и нановолокон/ **Э.Г. Раков**//Рос.хим.журн., 2004. -Т.48.- №5. -С. 12-20.
52. **Раков, Э.Г.** Нанотрубки и фуллерены/ **Э.Г. Раков**// -М.: Логос, -2006. - 376с
53. **Дьячков, П.Н.** Углеродные нанотрубки: строение, свойства, применения /**П.Н. Дьячков**// -М.: Бином, 2006. -293с.
54. **Осипьянц, Ю.А.** Фуллерены новые вещества для современной техники/ **Ю.А. Осипьянц**, В.В. Кведер //Материаловедение, -1997.-№1. - С.2-6.
55. **Рыжонков, Д.И.** Наноматериалы/ **Д.И. Рыжонков**, В.В. Лёвина, Э.Л. Дзи-дзигури// -М.: Бином, -2008. -365с.
56. **Мальцева, П.П.** Мир материалов и технологий: нанотехнологии, наноматериалы, наносистемная техника/ **Мальцева П.П.**// -М.: Техносфера, -2008. – 432с.
57. **Елецкий, А.В.** Механические свойства углеродных наноструктур и материалов на их основе/**А.В. Елецкий**//У ФН, 2007. -Т. 177. -№3. -С.233-274.

58. **Долматов, В.Ю.** Ультрадисперсные алмазы детонационного синтеза/ **В.Ю. Долматов**// -СПб.: СПбГПУ, -2003. -344с.
59. **Долматов, В.Ю.** Детонационные наноалмазы: синтез, строение, свойства и применение/ **В.Ю. Долматов** // Успехи химии, -2007. -Т.46.- №4.-С.375-397.
60. **Возняковский, А.П.** Самоорганизация в нанокompозитах на основе детонационного синтеза/ **А.П. Возняковский** // ФТТ, -2004.-Т.46. -№4. - С.629-632.
61. **Возняковский, А.П.** Сорбционные свойства и супрамолекулярная организация дисперсионной среды полиблочных полисилоксановых сополимеров/ **А.П. Возняковский, Е.М. Криворучко**// Высокомолек. соедин.сер.А., -2003.-Т.45.-№2. -С.272-282.
62. **Туйчиев, Ш.Т.** Влияние фуллереновой сажи на структуру и механические свойства фторопласта/ **Ш.Т. Туйчиев, Б.М. Гинзбург, С. Табаров** и др. // Докл. АН РТ, 2005. -Т.48.- №7. -С.110-115.
63. **Туйчиев, Ш.Т.** Влияние фуллереновой сажи на структуру и тепловые свойства кристаллической решетки политетрафторэтилена/ **Ш.Т. Туйчиев, Б.М.Гинзбург, Д.Нуралиев** и др. //Докл. АН РТ, 2005. -Т.48.- №7. -С. 116-120.
64. **Гинзбург, Б.М.** Трибологические свойства фторопласта-4, модифицированного фуллереновой сажей, при сухом трении скольжения /**Б.М. Гинзбург, Д.Г. Точильников, А.А. Шепелевский, А.М. Лексовский, Ш. Туйчиев** // Журнал прикладной химии, 2006. -Т.79.- вып. 9. -С. 1534- 1537.
65. **Джон, Леман С.** Массивы углеродных нанотрубок для источников и приемников инфракрасного света/ **Джон Леман, С.** //www.nist.gov.
66. **Каннан, Ш.К.** Скорость потока флюидов в углеродных нанотрубках. / **Ш.К. Каннан** //www.nist.gov.

67. **Серхио, Б.** Характеристика теплообмена потенцией на водной основе / **Б.Серхио**//www.nist.gov.
68. **Haiping, H.** Влияние рН на теплопередачу в наножидкостях, содержащих наночастицы ZrO_2 и TiO_2 / **H. Haiping** //www.nist.gov.
69. **Нуретдинов, И.А.** Синтез новых производных фуллерена и перспективы их практического применения./ **И.А. Нуретдинов, В.П. Губская, Г.М. Фазлеева** и др. // Сборник научных статей. Фуллерены и наноструктуры в конденсированных средах. Минск.-2011.-С.23-32.
70. **Franco, L.**, [et.al] // Chemical Communication.-2005.-p.2128-2130.
71. **Губская, В.П.**, и др.Изв. АН Сер.химия.-2005.-№7.-С.1594-1608.
72. **Туйчиев, Ш.Т.** Влияние добавок фуллерена и гамма –облучения на деформационно-термическое поведение структуры СКИ-3. Фуллерены и наноструктуры в конденсированных средах. / **Ш. Туйчиев, Д. Рашидов, Б.М. Гинзбург** // Минск.-2011.-С.49-55.
73. **Трошин, П.А.** Органические солнечные батареи: структура, материалы. Критические параметры и перспективы развития/ **П.А.Трошин, Р.Н. Любовская, В.Ф. Разумов**// Рос. Нанотехнологии.-2008.-Т.3,№5-6,-С.56-77.
74. **Трефилов, В.И.** Фуллерены-основа материалов будущего/ **В.И. Трефилов** и др.//- Киев:АДЕФ-Украина, 2001.-148с.
75. **Полункин, Е.В.** Кинетические исследования процессов окисления органических соединений в присутствии экзомодифицированных фуллеренов. Фуллерены и наноструктуры в конденсированных средах./ **Е.В. Полункин, Р.С. Жила, Т.М. Каменева, П.А. Трошин** // Минск.-2011.-С.154-159.

76. **Туйчиев, Ш.Т.** Кристосольваты фуллерена C_{60} в некоторых полимерах./ **Ш. Туйчиев** Б.М. Гинзбург, С. Табаров и др. //Фуллерены и наноструктуры в конденсированных средах. Минск.-2011.-С.117-121.
77. **Багровская, Н.А.** Физико-химические свойства полистирольных пленок, модифицированных фуллеренами. / **Н.А. Багровская, А.В. Носков** и др.// Фуллерены и наноструктуры в конденсированных средах. Минск.- 2011.-С.190-195.
78. **Katz, E.A.** Potential of fullerene-based materials for utilization of solar energy/ **E.A.Katz** // Physics of the Solid State.-2002.-Vol.44.-№3.-p.621-625.
79. **Споляэ, Д.М.** Электрические и фотоэлектрические свойства гетеропереходов слоистых полупроводников $A^{III}B^{VI}$ фуллерит C_{60} ./ **Д.М. Споляэ, И.А. Евтодиев, П.Г. Лозовану** // Фуллерены и наноструктуры в конденсированных средах. Минск.- 2011.-С.269-274
80. **Корниенко, Н.Е.** Коллективные свойства химических связей атомов Sn, Fe, Ti и др. с фуллеренами C_{60} . / **Н.Е. Корниенко** // Фуллерены и наноструктуры в конденсированных средах. Минск.- 2011.-С.377-383
81. **Корниенко, Н.Е.** Изменение структуры фуллеритов C_{60} под влиянием атомов металлов, при электронном и лазерном облучении /**Н.Е.Корниенко** и др.// Вестник Тамбовского университета. Серия Естественных и технических наук.-2010.Т.15, Вып.3.-С.951-952.
82. **Myshenko, S.V. Goh Y.W.**Crystallation and dynamic mechanical behavior of double- C_{60} -end capped poly(ethylene oxide) / multi-walled carbon nanotube composites / **Y.W. Goh, S.H.Goh, G.O.Xu, K.P. Pramoda, D.W.Zhang** //Chemical Physics Letter.-2003.Vol.379.№3-4,-P.236-241.
83. **Куш, С.Д.** Разделение смеси фуллеренов. / **С.Д. Куш, Н.С. Куюнко** // Наноструктуры в конденсированных средах: сб.науч.ст./П.А. Витязь-Минск. 2011,-С.206-211.

84. **Semenov, K.N.** Sorption of light fullerenes C60 and C70 on NORIT-AZO carbon/**K.N. Semenov et.al.**// Russ.J.Appl.Cytm.-2004.-Vol.77,№10,-p.1627-1630.
85. Способ разделения фуллеренов: RU 2107026; опубл.03.09.93.
86. **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, 1979-392с.
87. **Мустафоев, Р.А.** Теплофизические свойства углеродов при высоких параметрах состояния./ **Р.А. Мустафоев**//-М.:1980.-296с.
88. **Голубев, И.Ф.** Определение удельного веса жидкостей и газов при высоких давлениях методом гидростатического взвешивания./ **И.Ф. Голубев** // Научн.труды ГИАП. – М., 1957. – Вып.УП. – С.47 – 61.
89. **Голубев, И.Ф.,** Добровольский О.А. Измерение плотности азота и водорода при низких температурах и высоких давлениях./ **И.Ф. Голубев** // Газовая промышленность. – 1964. - № 5. –С.43 – 48.
90. **Зарипова, М.А.** Экспериментальные установки для измерения теплопроводности и плотности водных растворов гидразина и фенилгидразина / М.М. Сафаров., **М.А. Зарипова,** Имони Бахроми Маниш, А.Н. Нурматов // Монография:- Иран.-Изд. Эсхаг, Тегеран, пл. Энгиллаб, 2013.-238с.
91. **Зарипова, М.А.** Экспериментальные установки для измерения теплопроводности и плотности водных растворов гидразина и фенилгидразина / М.М. Сафаров., **М.А. Зарипова,** Имони Бахроми Маниш, А.Н. Нурматов // Монография:- Иран.-Изд. Эсхаг, Тегеран, пл. Энгиллаб, 2013.-238с.

92. **Тимрот, Д.Л., Хлопкина А.В.** Экспериментальное определение вязкости воды и водяного пара при высоких параметрах». // Теплоэнергетика.-1963.-№7.-С.64-67.
93. **Асланов, Г.А.** Исследование Р-ρ-Т-зависимости и динамической вязкости формиатов в широком интервале параметров состояния»: Дис.к.т.н.-Баку,1981.-166с.
94. **Варгафтик, Н.Б.** Теплопроводность жидкостей./ **Н.Б. Варгафтик, //** Изв.ВТИ.-1949.№8.-С.6-11.
95. **Варгафтик, Н.Б.** Справочник по теплопроводности жидкостей и газов /**Н.Б.Варгафтик, Л.П. Филлипов, А.А. Тарзиманов, Е.Е. Тоцкий.//** М.: Энергоатомиздат,1990,-352с.
96. **Варгафтик, Н.Б.** Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. / **Н.Б. Варгафтик//** -М.: Наука, 1972.-720 с.
97. **Голубев, И.Ф.** Бикалориметр для определения теплопроводности газов и жидкостей при высоких давлениях и различных температурах./ **И.Ф. Голубев//** Теплоэнергетика. – 1963. - № 12. – С.78 –82.
98. **Голубев, И.Ф., Назиев Я.М.** //Труды ЭНИ им. Есьмена АН АзССР. – Баку, 1962. – Т.15. – С.70 –73.
99. **Амирханов, Х.И.** Теплофизические свойства жидкостей и газов. / **Х.И. Амирханов //Сб. статей Даг.фил.АН СССР. Ин-т физики.-Махачкала, 1979.-170 с.**
100. **Кирилин, В.А.** Исследования термодинамических свойств веществ./ **В.А.Кирилин, А.Е. Шейндлин //** – М. – Л.: Госэнергоиздат, 1963. –560 с.
101. **Кей, Дж.** Таблица физических величин. / **Дж. Кей, Т. Леби //**– 1962.М.: – 244 с.
102. **Давлатов, Н.Б.** Влияние наноструктурных частиц на изменение термодинамических и адсорбционных свойств на линии увлажнения

/М.М. Сафаров, М.А. Зарипова, А.С. Назруллоев, М.М. Гуломов, **Н.Б. Давлатов**, А.Г. Мирзомамадов, С.С. Абдуназаров, З.Ю. Норов // Тезисы докладов 10-го Всероссийского симпозиума с международным участием, Термодинамика и материаловедение. Физико-технический институт имени А.Ф.Иоффе, РАН, 7-11 сентября 2015. Санкт Петербург, -С.42.

103. **Davlatov, N.B.** Effect of Fullerenes C_{60} , C_{70} and CNTs on the Thermophysical Properties of Nitrogen- and Oxygen-Containing Liquids (Rocket Fuel) / М.М. Safarov, М.А. Zaripova, **N.B. Davlatov**, М.М. Gulomov //Advanced Materials and Technologies, Tambov, 2016, №1, -p. 17-28

104. **Давлатов, Н.Б.** Исследование влияния наночастицы на изменение интенсификационных характеристик ракетных топлив. Энерго- и ресурсо-сбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: / М.М. Сафаров, А.С. Назруллоев, И.М. Бахром, **Н.Б. Давлатов**, М.А. Зарипова// Материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. М. 2015. Т. 3. № 1.-С. 207-210.

105. **Давлатов, Н.Б.** Влияние наночастицы фуллерена (C_{70}), некоторых непереходных металлов и их окисей на изменение теплопроводности низкотемпературных топлив при различных температурах и давлениях (обзор и эксперимент) / М.М. Сафаров, М.А. Зарипова, **Н.Б. Давлатов**, Б.М. Иман, А.С. Назруллоев, Х.А. Зоиров // В сборнике: Актуальные проблемы биохимии и бионанотехнологии. V Международная научная Интернет-конференция. ИП, Синяев Д. Н.. Казань, 2014.-С. 66-76.

106. **Давлатов, Н.Б.** Влияние некоторых нанометаллических оксидов, Ag (99,99%) и фуллерена на изменение физико-химических свойств ракетных топлив (обзор-эксперимент) В сборнике: Актуальные проблемы науки/ М.М. Сафаров, А.С. Назруллоев, И.Б. Маниш, Т.Р. Тиллоева, **Н.Б. Давлатов**, М.А. Зарипова // Материалы I Всероссийской (заочной)

научно-практической кон-ференции (с международным участием). под общей редакцией А.И. Вострецова. 2014.-С. 76-84.

107. **Давлатов, Н.Б.** Влияние фуллерена C_{60} , C_{70} , нанокристаллической меди на изменение теплопроводности и температуропроводности жидкого гидразина в широком интервале параметров состояния/ М.М.Сафаров, **Н.Б. Давлатов**, И.Б. Маниш, М.А. Зарипова, Т.Р. Тиллоева// Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. № 19.-С. 60-63.

108. **Давлатов, Н.Б.** Компьютерное моделирование химических и фазовых равновесий в системах с неидеальными растворами/ М.М. Сафаров, Х.Х. Назаров, М.А. Зарипова, **Н.Б. Давлатов**, А.С. Назруллоев, Неъматов А., М.М. Гуломов, С.Г. Ризоев, З.Ш. Асомиддинов, Г.Н. Неъматов, М.Ф. Курбо-нов// Вестник Таджикского национального университета, (научный журнал), Серия естественных наук, Душанбе, Сино, 2016, 1/4 (216),-С.166-169.

109. **Давлатов, Н.Б.** Плотность и уравнение состояния бинарных водных растворов $(0,5N_2H_4+0,5H_2O)$ мол./М.М. Сафаров, **Н.Б. Давлатов**, М.А.Зарипова // Материалы 10 Международной теплофизической школы, 3-8 октября 2016 г., “Теплофизические исследования и измерения при контроле качества веществ, материалов и изделий”. Душанбе-Тамбов, 2016.-С.335-340.

110. **Давлатов, Н.Б.** О механизме процесса переноса тепла в наножидкостях и их применение/ М.М. Сафаров, М.А. Зарипова, **Н.Б. Давлатов**, Т.Р. Тиллоева //Материалы 8 Международной научно-практической конферен-ции “Перспективы развития науки и образования” посвященной 25-летию государственной независимости Республики Таджикистан и 60- летию ТТУ имени акад. М.С. Осими (3-4 ноября 2016г.), ч. 2, Душанбе,-С.184-187.

111. **Davlatov, N.B.** Thermodynamic properties of nanofluids independence temperature and pressures/ М.М. Safarov, М.А. Zaripova, **N.B. Davlatov**, A.S. Nazrulloev, S.G. Rizoiev, A. Nematov, D.S. Djuraev, M.T., Turgunboev, T.R. Tilloeva, S.S. Rafiev, D.Sh. Hakimov, M.M. Gulomov, M.A. Abdulloev, R.Dj. Dav-latov // Book of Abstracts, 6th Rostock International Conference: THERMAL- 2017 “Thermophysical Properties for Technical Thermodynamics «Institute of Technical Thermodynamics University of Rostock, Germany.17 – 18 July 2017.-P.77.
112. **Зарипова, М.А.** Определение коэффициента активности жидкого коллоидного гидразина/ М.М.Сафаров, М.А. Зарипова, Иман Бахром Маниш // Материалы Девятой Международной теплофизической школы, Теплофизические исследования и измерения при контроле качества веществ, материалов и изделий, 6-11 октября 2014 г., Душанбе, - С.318-321.
113. **Миснар, А.** Теплопроводность твердых тел, жидкостей, газов и их композитов./А. Миснар//М.:Мир,1968.-432с.
114. **Харитонов, К.Г.** Динамическая вязкость обычной и тяжелой воды.: Автореф. дис.к.т.н.-М.:1989.-20с.
115. **Назиев, Я.М., Шахвердиев А.Н., Абдуллоев Т.Ш.** Вязкость алифатических спиртов» (методы и результаты экспериментов)// Обзоры по тепло-физическим свойствам веществ, М.-1991.-№1(87).-46с.
116. **Ривкин, С.Л., Левин А.Я., Израилевский Л.Б.** Вязкость воды и водяного пара.-М.:Изд-во стандартов, 1979.-128с.
117. **Абдуллоев, Т.Ш.** Вязкость высших спиртов при различных температурах и давлениях.: Автореф. дис. к.т.н.-Баку, 1992.-22с.
118. **Агаев, Н.А., Юсибова А.Д.** Вязкость обычной и тяжелой воды при высоких давлениях в температурном интервале 0-150°С. //Докл. АНСССР, 1968.-Т.180.-№2.-С.334-337.

119. **Stanley, E., Batten R.** Viscosity of water at High Pressures and Moderate Temperatures.//J.Phys. Chem.-1969.-V 73.№5.-P.1187-1191.
120. **Голубев, И.Ф.** Вязкость газов и газовых смесей. М.: Физматгиз, 1959,-375с.
121. **Zaripova, M.A.** Thermophysical Feature of Water Mixtures Mixed up With Hydrazine under various Temperature and Pressures.(Abstract) / M.M. Safarov, M. A. Zaripova, F.S. Rajabov, V.S. Davlatova //14th European Conference on Thermo- physical properties, September 16-19, 1996, Lyon, France,-P.464.
122. **Геращенко, Ю.А.** Температурные измерения: Справочник/ **Ю.А. Геращенко, А.Н.Гордов, Р.И.Лах, Н.Я.Ярышев.**//-Киев, Наукова думка.1984,-495с.
123. **Зиновьев, В.Е.** Теплофизические свойства металлов при высоких температурах. /**В.Е. Зиновьев.** //Справочник. –М.: Металлургия, 1989. – 384 с.
124. **Платунов, Е.С.** Теплофизические измерения и приборы. /Е.С.Платунов, С. Е.Буравой, В.В. Курепин, Г.С. Петров. //Под общ.ред. **Платунова Е.С.** –Л.: Машиностроение. Ленинград. Отд., 1986. –256с.
125. **Мамедов, А.А., Гусейнов К.Д.** Применение закона соответственных состояний к вязкости жидкостей и их паров.//Журнал физической химии.-1969.-Т.43.-№2.-С.413-416.
126. **Голик, А.З., Азнакаев Э.Г.** Вычисление явной температурной зависимости вязкости жидкости методом эффективного потенциала. –В кн.1: физика жидкого состояния. -Киев: Высшая школа, 1976.-№4.-С.96-98.
127. **Люстерник, В.Ю.** Обобщение опытных данных по вязкости водорода в широкой области температур и давлений. //Теплофизические свойства газов.-М.: Наука,1970.-С.46-50.

128. **Атанов, Ю.А.** Приближенное уравнение состояния жидкостей при высоких давлениях.//Труды метрологических институтов СССР.-1969.- Вып.106 (164).С.40-48
129. **Зарипова, М.А.** Экспериментальная установка для измерения теплоемкости жидкостей при высоких параметрах состояния / М.М.Сафаров, А.И. Богданов. **М.А. Зарипова**, С.М. Сияхаков, Х. Маджидов// Тез.науч. практ. конф. -Душанбе, 28-30 октября 1993.-С.45.
130. **Давлатов, Н.Б.** Уравнение состояния типа Тейта для жидких растворов. Теплопроводность/ М.М. Сафаров, М.Ф. Курбонов, Ф.Б. Курбонов, Ш.Т. Юсупов, **Н.Б. Давлатов**, А.С. Назруллоев, Д.А. Шарифов, Г.Н. Нейматов //Материалы Девятой Международной теплофизической школы, Тепло-физические исследования и измерения при контроле качества веществ, материалов и изделий,6-11 октября 2014 г.Душанбе, МТФШ-9.-С.447-452.
131. **Голик, А.З.**, Чалый А.В. Обобщение уравнение состояния типа Тейта на случай больших давлений и двойных растворов.// Украинский физический журнал.-1975.-Т.20.-№6.-С.993-996.
132. **Ginnell, R.** Derivation of the Tait Equation and its Relation to the Structure of Liquids- Jhc Journal of chemical physics.-1961.-V.34.-№4.- P.1249-1252.
133. **Расторгуев, Ю.Л.**, Ковальский Е.В. Уравнение состояния Тейта и его проверка по экспериментальным данным.//Изв. Вузов СССР. Нефть и газ.-1975.-№8.-С.57-60.
134. **Циммерман, С.С.** Уравнение Тейта для системы азот-водород.// ЖФХ.-1975.-Т.49.-№5.-С.1273-1274.
135. **Могель, Х.И.**, Чалый А.В. Модифицированное уравнение Тейта в критической области.//Украинский физический журнал.-1977.-Т.22.-№1.- С. 101-107.

136. **Абовский, В.А.** Об уравнении Тейта.//ТВТ.-1972.-Т.10.-№6.-С.1221-1226.
137. **Neese, G.A.** Squire on the Tait and Related Equations of physical chemistry.-1968.-V.72.-№1.-P.128-136.
138. **Сысоев, В.М.** О статическом обосновании функционального вида уравнения Тейта.//Физика жидкого состояния.-Киев: Высшая школа.-1975.-№3.-С.34-38.
139. **Сафаров, М.М.,** Самадов Г., Ахмедов Х. Обобщение уравнений Тейта для простых эфиров.: Сб. Трудов студентов, посв. 60-летию ДГПУ им. К. Джуроева.-Душанбе, 1991.-С.19-20.
140. **Сафаров, М.М.,** Сияхаков С.М. Исследование динамической вязкости жидких простых и смешанных эфиров в зависимости от температуры. //Докл. АН Республики Таджикистан,-1992.-№5.-С.255-258.
141. **Сафаров, М.М.** Расчет вязкости диэтилового эфира при различных температурах и давлениях. /Сб. научных работ.-Вып.1.- Курган-Тюбе, 1992.-144с.
142. **Голубев, И.Ф.,** Агаев Н.А. Вязкость предельных углеводородов.-Баку: Азернашр, 1964.-160с.
143. **Давлатов, Н.Б.** Теплофизические свойства некоторых углеродных материалов/ М.М. Сафаров, Х.Х. Назаров, **Н.Б. Давлатов,** А.С. Назруллоев, М.А. Зарипова, Т.Р. Тиллоева, М.М. Гуломов, С.Г. Ризоев, Э.Ш. Тауров, Д.Ш. Хакимов, Д.А. Назирмадов, С.С. Рафиев, А.Р. Раджабов // Вестник Таджикского национального университета, (научный журнал), Серия естественных наук, Душанбе, Сино, 2016, 1/4 (216),-С.40-45.
- 144.**Saha, S.** Molecular dynamics simulation of thermal transport at a nanometer scale constriction in silicon / **S. Saha,** L. Shi // Journal Applied Physics. 101. 074304. 2007.
145. **Давлатов, Н.Б.** Влияние переходных нанометаллов на изменение плотности водных растворов./ М.М. Сафаров, М.А. Зарипова, Иман

Бахроми Маниш, А.С. Назруллоев, **Н.Б. Давлатов**, Б.М. Махмадиев // Сборник тезисов докладов научной конференции "Актуальные проблемы современной науки" посвященной 70-летию Победы в Великой Отечественной Войне, 21- 24 сентября 2015. Изд.-во "МИСиС". С.80-81.

146. **Давлатов, Н.Б.** Влияние некоторых наноамфотерных оксидов аг (99,99%) и фуллерена на изменение физико-химических свойств ракетных топлив (Обзор-эксперимент) /М.М. Сафаров, А.С. Назруллоев, Иман Бахроми Маниш, Т.Р. Тиллоева, **Н.Б. Давлатов**, М.А. Зарипова, С.Г. Ризоев, Ш.З. Нажмудинов // Материалы 10 Международной теплофизической школы, 3-8 октября 2016 г., "Теплофизические исследования и измерения при контроле качества веществ, материалов и изделий". Душанбе-Тамбов, 2016.-С.109-120.

147. **Халилов, Ш.Х.** Исследование динамической вязкости сложных эфиров и их смесей с углеводородами при различных температурах и давлениях. / Автореф. дис.-к.т.н. Грозный., 1979.-24с.

148. **Геллер, В.З.**, Кранберг А.В. О связи вязкости с термическими свойствами. //Инженерно-физический журнал.- 1973.-Т.25.-№5.-С.837-841.

149. **Расторгуев, Ю.Л.**, Керамиди А.С. Экспериментальные исследования коэффициента динамической вязкости n-алканов при высоких давлениях и различных температурах.//Теплофизические свойства жидкостей.-М.: Наука, 1973.-С.131-136.

150. **Ахундов, Т.С.**, Таиров А.Д. О некоторых обобщенных данных по вяз-кости ароматических углеводородов.//Изв. вузов СССР. Нефть и газ.- 1978.-№10.-С.67-69.

151. **Керамиди, А.С.**, Расторгуев Ю.Л., Григорьев Б.А. Экспериментальное исследование коэффициента динамической вязкости высших нормальных парафиновых углеводородов.//Теплофизические свойства жидкостей.-М.-Наука, 1976.-С.90-96.

152. **Циклис, Д.С.,** Масленникова В.Я., Абовский В.А. О корреляции константы уравнения Тейта.//Докл. АН СССР.-1977.-Т.233.-№5.-С.816-820.
153. **Сысоев, В.М.,** Голик А.З. Исследование связи теплофизических свойств вещества с параметрами межмолекулярного взаимодействия на основе уравнения Тейта.//Теплофизика высоких температур.- 1983.-Т.21.-№3.-С. 454-459.
154. **Адаменко, И.И.,** Самойленко Л.П. Об уравнении состояния Тейта. // Физика жидкого состояния.-Киев, 1987. -№15.-С.117-120.
155. **Ginell, R.,** Ginell A.M. Tait coefficients of rafter in humidity and moisture.-N.Y., 1965.-V.3.-p.2115-2122.
156. **Вервейко, В.Н.,** Вервейко М.В., Мелихов Ю.Ф., Мельников Г.А. Уравнение Тейта.//Ультразвук и термодинамические свойства веществ. – Курск, 1993.-С.42-49.
157. **Вервейко, В.Н.,** Вервейко М.В. Уравнение Тейта для нематических жидких кристаллов.//Материалы 5 Международного совещания-семинара «Инженерно-физические проблемы новой техники».М.:1998.-С.274-275.
158. **Циклис, Д.С.** Плотные газы.-М.: Химия, 1977-165с.
159. **Woh, A.** Die Kanpressions gleichung der flussingkeiten. //Z.Phus.Chem.-1921.-№2.-p.995.
160. **Маджидов, Х., Сафаров М.М.,** Гайдей Т.П. Материалы VII Всесоюзной конференции по теплофизическим свойствам веществ. Ташкент; Фан, 1982, -С.296.
161. **Маджидов, Х., Сафаров М.М.** Инженерно-физический журнал, 1986, т.50, №3, -С.465-471.
162. **Маджидов, Х., Сафаров М.М.** – Теплофизика высоких температур, 1986, т.24, №6, -С.103.

163. **Tait, P.G.** Report on jam of the Physical Properties of Water.-1888.-V. 47. p.141-147.

164. **Жданов, А.А.** Температурная зависимость вязкости сжиженного азота при постоянной плотности. //Журнал экспериментальной и теоретической физики.-1956.-Т.31.-№1.-С.14-37.

165. **Маджидов, Х., Нуриддинов З.** Экспериментальное исследование коэф-фициента теплопроводности, плотности и вязкости простых эфиров в зависимости от температуры.:Сб. физика жидкостей и растворов.- Душанбе, 1982.-С.12-19.

166. Краткий справочник физико-химических величин. Под редакцией К.П. Мищенко и А.А.Равделя.Изд."Химия".-Л.-1972.-200с.

[167-А]. **Исмонов, Ф.Т., Розиков К.Н., Маджидов Х., Тиллоева Т.Р., Хубатхузин А.А., Яхьяев Ш.О.** Расчет изотермического коэффициента сжимаемости водных растворов диоксида титана. Материалы международной научно-практической конференции "Электроэнергетика Таджикистана: Актуальные проб-лемы и пути их решения" посвященная 80-летию М.Б. Иноятова и 70-летию М.В. Шамсиева, приуроченная ко дню энергетика. Душанбе-19 декабря 2019, Филиал МЭИ в г. Душанбе. С.262-266.

[168-А]. **Исмонов, Ф. Д.** Взаимосвязь между динамической и термодинами-ческой характеристиками растворов системы бензола и полистирола при атмосферном давлении, $T=293K$./**Фируз Довудович Исмонов**// Вестник Таджикского национального университета серия естественных наук.- 2018.-№1.-С.131-137.

[169-А]. **Исмонов, Ф. Д.** Тибқи муносибати босалоҳият ба таълими физика Конференсияи илмӣ – амалии Ҷумуриявӣ дар мавзӯи « Мушкилоти муосири рушди илмҳои табиӣ – риёзӣ дар Ҷумурии Тоҷикистон» 2019, с. 144.

[170-A]. **Исмонов, Ф. Д.** Муодилаи ҳисобкунӣ бо усули баркашии гидростатикӣ. Конференсияи илмӣ-методии Ҷумҳуриявӣ дар мавзӯи «Проблемаҳои истифодаи технологияи иноватсионӣ дар таълими фанҳои табиӣ-риёзӣ» Бахшида ба татбиқи муносибати босалоҳият дар таълими фанҳои табиӣ ва технологияи информатсионӣ, 2018, С. 42.

[171-A]. **Исмонов, Ф. Д.** Основные проблемы использования инновационной технологии. Конференсияи илмӣ-методии Ҷумҳуриявӣ дар мавзӯи «Проблемаҳои истифодаи технологияи иноватсионӣ дар таълими фанҳои табиӣ-риёзӣ» Бахшида ба татбиқи муносибати босалоҳият дар таълими фанҳои табиӣ ва технологияи информатсионӣ, 2018,-С. 93.

[172-A]. **Исмонов, Ф. Д.** Использование инновационных технологий на уроках физики. Конференсияи илмӣ-методии Ҷумҳуриявӣ дар мавзӯи «Проблемаҳои истифодаи технологияи иноватсионӣ дар таълими фанҳои табиӣ-риёзӣ» Бахшида ба татбиқи муносибати босалоҳият дар таълими фанҳои табиӣ ва технологияи информатсионӣ, 2018,-С, 95.

173. Краткий справочник физико-химических величин. /Под.ред. К.П.Мищенко и А.А.Равделя. Ленинград, Химия, 1972, 200с.

[174-A]. **Исмонов, Ф. Д.** Уравнение состояния Мамедова – Ахундова – Сафарова электролитов системы H_2O+TiO_2 при различных температурах и давлениях./**Фируз Довудович Исмонов**// Вестник Таджикского национального университета серия естественных наук.- 2020.-№3.-С.127-135.

[175-A]. **Исмонов, Ф. Д.** Применение уравнения Тейта для расчета вязкости, плотности электролитов и простых эфиров./ **Фируз Довудович Исмонов**// Вестник технологического университета Таджикистана–2019.- №4 (39).-С.22-27.

[176-A]. **Исмонов, Ф. Д.** Коэффициент изотермический сжимаемости и текучести некоторых органических водных растворов./ Маҷмӯаи мақолаҳои конференсияи ҷумҳуриявӣ илмию амалӣ дар мавзӯи

«Заминаҳои рушд ва дурнамои илми химия дар Ҷумҳурии Тоҷикистон», бахшида ба 60-солагии факултети химия ва гиромидошти хотираи д.и.х., профессор, академики АИ ҶТ Нӯъмонов И. У. Душанбе, ДМТ, 2020.-С. 47-49.

[177-А]. **Исмонов, Ф. Д.** Влияния индия на кинетику окисления сплава $Al+1\%Be$. / Маводи конференсияи илмӣ-амалии ҷумҳуриявӣ дар мавзӯи «Нақши илмҳои табиатшиносӣ, дақиқ ва риёзӣ дар оmodасозии кадрҳои муосири илмӣ, омӯзгорӣ ва муҳандисӣ» бахшида ба Бистсолаи омӯзиш ва руди фанҳои табиатшиносӣ, дақиқ ва риёзӣ дар соҳаи илму маориф (солҳои 2020-2040), 30-солагии Истиклолияти давлатии Ҷумҳурии Тоҷикистон ва 90-солагии ДДОТ ба номи Садриддин Айни. Душанбе, ДДОТ, 2021.-С. 33-36.

[178-А]. **Исмонов, Ф.Д.** Влияние диоксида титана на изменение динамической вязкости воды. / Маводи конференсияи ҷумҳуриявии илмию амалӣ дар мавзӯи «Энергетикаи гармо ва хосиятҳои гармофизикии моддаҳо». Душанбе, ДТТ, 2021.-С. 84-87.

[179-А]. **Исмонов, Ф.Д.** Исследование динамической вязкости водных растворов наноматериала диоксида титана TiO_2 при различных температурах и давлениях. / Х. Маджидов, М. Сафаров, С. Зубайдов. // Паёми политехникӣ. Душанбе, 2021 №2(54).-С. 8-12.

[180-А]. **Исмонов, Ф.Д.** Динамическая вязкость водных растворов диоксида титана TiO_2 в зависимости от температуры и давления. / Х. Маджидов. // Маводи конференсияи байналмиллалӣ имӣ-амалӣ дар мавзӯи «Илмҳои техникӣ ва таҳсилоти муҳандисӣ барои рушди устувор». Душанбе, ДТТ ба номи акад. М.С. Осимӣ 2021.-С. 130-136.

[181-А]. **Исмонов, Ф.Д.** Динамической вязкости водных растворов диоксида титана. / Х. Маджидов. // Маводҳои симпозиуми физикони Тоҷикистон бахшида ба 85-солагии академик Р.Марупов. Институти физикаю техникаи ба номи С.У.Умаров. Душанбе, 2021.-С. 81-84.

[182-A]. **Исмонов, Ф.Д.** Исследование плотности водных растворов диоксида титана./ Х. Маджидов. // Маводҳои симпозиуми физикони Тоҷикистон бахшида ба 85-солагии академик Р.Марупов. Институти физикаю техникаи ба номи С.У.Умаров. Душанбе, 2021.-С. 84-87.

[183-A]. **Исмонов, Ф.Д.** Исследование плотности водных растворов наночас-тиц TiO_2 при различных температурах и давлениях./ Ф. Исмонов, Х. Маджидов, М. Сафаров. // Паёми политехникӣ. Душанбе, 2021 №2 (54).-С.28-32.

[184-A]. **Исмонов, Ф.Д.** Интерпретация экспериментальных данных по динамической вязкости водных растворов диоксида титана TiO_2 в зависимости от температуры и давления. / Х. Маджидов, Ф.Д. Исмонов // Маводи конференсияи илмӣ-амалии ҷумҳуриявӣ дар мавзӯи «Проблемаҳои муосири илмҳои табиатшиносию риёзӣ ва методикаи таълими онҳо дар муассисаҳои таҳсилоти олии касбӣ» бахшида ба 20 солаи омӯзиш ва рушди фанҳои табиатшиносӣ, дақиқ ва риёзӣ дар соҳаи илму маориф (солҳои 2020-2040). Душанбе, 2021.-С. 443-448.

[185-A]. **Исмонов, Ф.Д.** Интерпретация и обобщение экспериментальных данных по плотности водных растворов диоксида титана TiO_2 в зависимости от температуры и давления. / Х. Маджидов, Ф.Д. Исмонов // Маводи конференсияи илмӣ-амалии ҷумҳуриявӣ дар мавзӯи «Проблемаҳои муосири илмҳои табиатшиносию риёзӣ ва методикаи таълими онҳо дар муассисаҳои таҳсилоти олии касбӣ» бахшида ба 20 солаи омӯзиш ва рушди фанҳои табиатшиносӣ, дақиқ ва риёзӣ дар соҳаи илму маориф (солҳои 2020-2040). Душанбе, 2021.-С. 448-454.

[186-A]. **Исмонов, Ф.Д.** Обобщение экспериментальных данных по плотности водных растворов диоксида титана в зависимости от температуры и давления. / Ф.Д. Исмонов // Материалы 13 МТФШ, Душанбе, Тамбов, 2022.-С. 136-140.

[187-А]. **Исмонов, Ф.Д.** Динамическая вязкость и плотность водных растворов в зависимости от температуры, давления и массовой концентрации диоксида титана. / Ф.Д. Исмонов // Паёми политехникӣ. Душанбе, 2022 №2(58).-С. 53-58

[188-А]. **Исмонов, Ф.Д.** Анализ экспериментальных данных по динамической вязкости водных растворов диоксида титана в зависимости от температуры и давления. / Ф.Д. Исмонов // Маводи конференсияи илмӣ-методии ҷумҳуриявӣ доир ба «Проблемаҳои татбиқи муносибати босалоҳият ба таълими фанҳои табиӣ-математикӣ дар муассисаҳои таҳсилоти миёнаи умумӣ ва миёнаву олии касбӣ» бахшида ба амалигардонии «Бистсолаи омӯзиш ва рушди фанҳои табиатшиносӣ, дақиқ ва риёзӣ дар соҳаи илму маориф (солҳои 2020-2040)», ДДОТ. Душанбе, 2022.-С. 93-95

[189-А]. **Исмонов, Ф.Д.** Интерпретация экспериментальных данных по динамической вязкости водных растворов диоксида Титана TiO_2 в зависимости от температуры и давления. / Х. Маджидов, Ф. Исмонов, З. Давлатов // Маводи конференсияи илмӣ - амалии ҷумҳуриявӣ дар мавзӯи «Қорҳои риёзии ниёғони тоҷику форс Умари Хайём», Донишгоҳи байналмилалӣ сайёҳӣ ва соҳибқории Тоҷикистон, 2022-С. 80-85.

[190-А]. **Исмонов, Ф.Д.** Динамическая вязкость плотность водных растворов в зависимости от температуры, давления и массовой концентрации диоксида титана. / Х. Маджидов, Ф.Д. Исмонов // Научное и периодическое издание «Инженер», ИА КР, 2023 №26, -С. 100-109.

ПРИЛОЖЕНИЕ

«Утверждаю»

Директор ГНУ «Научно-исследовательский институт промышленности»

к.т.н.  М. Баротов

«23»  2022 г.

АКТ

научно-технической комиссии о реализации и внедрении научных положений и выводов диссертации Исмонова Фируза Довудовича на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника» на тему: «Влияние наночастиц диоксида титана на изменение плотности и вязкости воды».

Комиссия в составе: д.х.н. доцент Раджабова С.И., - председатель, членов комиссии: с.н.с. Каюмова А.И., с.н.с. Таваровой Д. свидетельствуют о том, что по результатам исследования теплопроводности, температуропроводности и плотности были получены следующие научные результаты, указанные в кандидатской диссертации Исмонова Фируза Довудовича:

-получены аппроксимационные зависимости, описывающие плотность и вязкость наножидкостей системы (вода+наночастиц TiO_2 (0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3%)) в зависимости от температуры и давления;

-дополнен и расширен банк данных теплофизических и термодинамических характеристик системы (вода+наночастицы диоксида титана TiO_2 (0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3%)) в зависимости от температуры и давления, новыми данными;

-разработанные экспериментальные стенды могут быть использованы для экспресс определения плотности и вязкости технологических материалов в научных лабораториях;

-полученные результаты экспериментальных исследований, эмпирических уравнений и уравнения состояния по плотности и термодинамическим свойствам воды и диоксида титана TiO_2 (0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3%) в зависимости от температуры, давления и содержания диоксида титана TiO_2 используется для инженерных расчетов в АООТ «Душанбинская ТЭЦ» с целью улучшения экономических, экологических и энергетических показателей теплоэнергетического оборудования;



«Утверждаю»

Ректор Таджикского государственного педагогического университета имени Садриддина Айни
А.И. Ибодуллозода

« 20 » 04 2023 год

АКТ

научно-технической комиссии о реализации и внедрении научных положений и выводов диссертации Исмонова Фируза Довудовича на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника» на тему: **«Влияние наночастиц диоксида титана на изменение плотности и вязкости воды».**

Комиссия в составе: профессор Сангинзод Д.Ш. – председатель, членов комиссии: к.т.н., доцент Сияхакова С.М., к.ф.м.н., доцент Ньматова А., к.т.н., доцент Туйчиева Х.Ш., к.т.н., доцент Мирзомамадова А.Г. свидетельствует о том, что по результатам исследования теплопроводности, плотности и вязкости, углеводородных жидкостей были получены следующие научные результаты, указанные в кандидатской диссертации Исмонова Фируза Довудовича:

- полученные эмпирические уравнения и уравнение состояния могут использоваться для инженерных расчетов, аспирантами для выполнения диссертационных работ и студентами, магистрантами и докторантами при выполнении курсовых и дипломных работ и диссертаций;

- созданная аппаратура для измерения жидкости и вязкости наножидкостей используется в научной и учебной лабораториях кафедры «Общей физики» Таджикского государственного педагогического университета имени С.Айни аспирантами, магистрантами и преподавателями при выполнении диссертационных работ и студентами при выполнении дипломных, курсовых и лабораторных работ;

-дополнен и расширен банк данных термодинамических и реологических характеристик системы (вода + наночастиц TiO_2 (0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3%)) в зависимости от температуры и давления, новыми данными;

-разработанные экспериментальные стенды могут быть использованы для экспресс определения плотности и вязкости технологических материалов в научных лабораториях;

