

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РЕСПУБЛИКИ ТАДЖИКИСТАН**

**ТАДЖИКСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени Садриддина Айни**

На правах рукописи
УДК 634+635-151(575.3)

КУРБОНОВ Мухамадали Файзалиевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ, ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ,
АДСОРБЦИОННЫХ И МАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ
ПРОИЗВОДСТВА ПИВА ИЗ МЕСТНОГО СЫРЬЯ**

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук по
специальности **01.04-14**– Теплофизика и теоретическая теплотехника

**Научный руководитель: академик
МИА, академик ИА РТ, академик
МАХ, доктор технических наук, про-
фессор, заслуженный деятель науки и
техники Таджикистана
Сафаров Махмадали Махмадиевич,**

Душанбе – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Основные условные обозначения и сокращения.....	5
	ВВЕДЕНИЕ.....	6
Глава 1.	ОБЗОР СОСТОЯНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА ПИВА И ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕГО КОМПОНЕНТОВ.....	18
1.1.	Производство пива в Республике Таджикистан.....	18
1.2.	Состояние исследования структурообразующих компонентов производства пива	19
1.2.1.	Основные характеристики сусла как исходного продукта для производства пива	26
1.3.	Теоретическое обоснование определения теплофизических характеристик системы сусло + вода.....	28
1.4.	Основные физико-химические свойства воды.....	32
	Заключение к первой главе.....	37
Глава 2.	МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СМЕСЕЙ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ И КИНЕТИКИ ИХ ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ...	38
2.1.	Экспериментальные установки для определения теплофизических свойств исследуемых объектов. Измеритель теплоемкости типа ИТ-с- 400.....	38
2.1.1.	Экспериментальная установка для определения теплоемкости растворов при различных температурах и давлениях	40
2.1.2.	Определение удельной теплоемкости и некоторых термодинамических характеристик исследуемых образцов по экспериментальным данным.....	42
2.1.3.	Экспериментальная установка для комплексного определения теплофизических свойств при различных температурах и давлениях.....	43

2.1.4.	Измеритель теплопроводности типа ИТ-λ-400.....	44
2.1.5.	Экспериментальная установка для измерения коэффициента температуропроводности жидкостей при различных температурах и давлениях.....	47
2.2.	Определение погрешности измерения теплофизических свойств веществ.....	51
2.3.	Расчет термодинамических свойств продуктов пива	55
2.3.1.	Расчет энергии Гиббса.....	55
2.3.2.	Закон Гесса.....	55
2.3.3.	Энтропия.....	56
2.3.4.	Энтальпия. Тепловой эффект реакции.....	57
2.4.	Способ и устройства для исследования кинетики термического разложения смесей исследуемых объектов.....	60
	Заключение ко 2 главе.....	61
Глава 3.	РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ, ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ И КИНЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОДУКТОВ ПИВА.....	63
3.1.	Исследование теплофизических свойств системы вода+сусло.....	63
3.1.1.	Плотность, коэффициент поверхностного натяжения системы (вода+сусло) в зависимости от температуры при атмосферном давлении.....	63
3.1.2.	Исследование кинетики разложения в системах вода + сусло	64
3.2.	Модель теплового баланса.....	65
3.3.	Расчет кинетики исследуемых образцов.....	70
3.4.	Влияние температуры на изменение скорости химической реакции согласно теории Арениуса-Эйринга.....	75
3.5.	Расчет гиббсовской адсорбции из изотермы поверхностного натяжения методом графического дифференцирования.....	80

3.6.	Заключение к 3 главе	84
Глава 4.	ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ ПО ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИМ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИМ СВОЙСТВАМ ИССЛЕДУЕМЫХ СИСТЕМ И ИХ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА.....	85
4.1.	Плотность пивного сусла в зависимости от температуры в режиме аэрации и без аэрации.....	85
4.2.	Влияние температуры, количества сухого вещества на изменение теплопроводности продуктов пива без режима аэрации.....	94
4.3.	Взаимосвязь между теплоемкостью и кинетикой продуктов пива при различных концентрациях сусла без режима аэрации.....	100
4.4.	Теплоёмкость и энтальпия системы продуктов пива в зависимости от температуры и давления, без режима аэрации ...	107
4.5.	Уравнение состояния исследуемых образцов.....	116
4.6.	Применение уравнения типа Гейта для расчета плотности продуктов пива.....	118
4.7.	Обработка экспериментальных данных по основным показателям продуктов пива.....	120
4.8.	Заключение к 4 главе.....	130
	ВЫВОДЫ.....	132
	ЛИТЕРАТУРА.....	135
	ПРИЛОЖЕНИЕ.....	159

ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

λ – теплопроводность, $\left(\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}\right)$

C_p – удельная теплоемкость, $\left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}\right)$

a – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$

τ – время, (с)

T – температура по шкале Кельвина, (К)

Q – количество теплоты, (кДж)

Fo – критерий Фурье

P – давление, (МПа)

ΔT – разность значений температуры, (К)

Pr – критерий Прандтля;

Gr – критерий Грасгофа;

ρ – плотность, $\left(\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}\right)$

$\rho_{\text{насып.}}$ – насыпная плотность, $\left(\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}\right)$

$t_{a,n-1}$ – коэффициент Стьюдента

α – доверительная вероятность

α_p – коэффициент теплового расширения, (1/К)

β_T – изотермическая сжимаемость, (1/Па)

P_i – внутреннее давление, (Па)

m – темп регулярного охлаждения, (1/с)

U – показания потенциометра, (мВ)

ε – степень черноты;

$\alpha_{\text{луч.}}$ – коэффициент теплоотдачи излучением, $\left(\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}\right)$

ν – коэффициент кинематической вязкости, $\left(\frac{\text{м}^2}{\text{с}}\right)$

d – диаметр ядра бикалориметра, (м)

$G_{\text{я}}$ – масса ядра, (кг)

G_1 – вес поплавка в воздухе, (кг)

G_2 – вес поплавка в исследуемых объектах, (кг)

$V_{\text{п}}$ – объем кварцевого поплавка, (м^3)

$V_{\text{н}}$ – объем манганиновой проволоки, (м^3)

ВВЕДЕНИЕ

Сегодня во всем мире отмечается преобладающий интерес к качеству продуктов питания, вызванный соответствующим развитием стран и государств мира. В подавляющем случае решение поставленного вопроса, связанного с недостатком или экономией как энерго-, так и экономических ресурсов, главным образом, зависит от местных географических возможностей.

С целью соответствующего изучения, анализа, выбора и проектирования надлежащих конструкций и схем пивзаводов малой мощности, требуются заранее разработанные математические модели, протекающих при их эксплуатации процессов. Математическое моделирование в сравнении с физическим экспериментом представляет собой возможность значительной экономии времени и капитальных вложений для получения соответственных параметров работы устройств и аппаратов, однако достоверность численных результатов имеет прямую зависимость от экспериментально полученных данных по свойствам веществ (физико-химические, термодинамические, кинетика разложения материалов и т. д.). Данная проблематика также имеет место и в вопросах изучения термодинамических параметров теплоносителей и продуктов, используемых в производстве пива высокого качества.

Процесс приготовления пивного сусла является основополагающим в производстве пива. От качества приготовленного сусла зависит будущий продукт. Этот процесс является одним из самых энергоемких в технологии производства пива, который занимает значительную производственную площадку предприятия. Процесс варки пивного сусла можно исключить лишь путем введения соответствующего его концентрата.

Поскольку пивное сусло относится к категории термолабильных продуктов, в процессе его приготовления должны обеспечиваться соответствующие условия, предусматривающие минимальное время контакта с теплообменивающейся поверхностью и оптимальную температуру. На сегодняшний день существует целый ряд теплообменных аппаратов, предназначенных для произ-

водства пивного сусла. В качестве наиболее перспективных, к их числу относятся роторные пленочные теплообменные аппараты (РПА).

В прикладном плане, рациональное и эффективное применение каких-либо достижений и открытий в науке во многом зависят и базируются на знаниях в области физической химии, термодинамики для различных групп веществ и материалов для дальнейшей их обработки, хранения, транспортировке и др. Наиболее важным среди прочих свойств веществ и материалов является кинетика разложения, а также физико-химические и термодинамические свойства, поскольку процессы обработки при высоких температурах широко распространены в народном хозяйстве и в быту, в том числе и в пищевой промышленности.

Актуальным вопросом на сегодняшний день считается тщательное изучение термодинамических и физико-химических свойств веществ, при этом учитываются происходящие процессы на уровне межчастичного взаимодействия с учетом ориентационных эффектов, развитие которых наблюдается в пищевых продуктах под влиянием внешнего поля, температуры и давления. Глубокое изучение данных параметров имеет огромное теоретическое и прикладное значение. Многосторонний подход к решению поставленных задач, а именно практическое применение термодинамических методов статистической обработки, физической и координационной химии, молекулярной физики, оптики, механики сплошных сред и др., позволил получить новые достижения данных направлений касательно пищевых продуктов. Кроме всего, численные результаты названных параметров применяются и в инженерных расчетах, связанных как с проектированием, так и с соответствующей обработкой, сопровождением и эксплуатацией теплообменных устройств и аппаратов.

Применение приблизительных данных по термодинамическим свойствам, физико-химическим свойствам веществ не допустимо, поскольку в последствие это приводит к превышению реальных размерных показателей устройств и приборов, тем самым снижает их технические и экономические показатели. Таким образом, определение физико-химических параметров, а также термодинамических характеристик продуктов пива (сусло + вода) за-

кладывают основу в развитии современных понятий о теории жидкого состояния, установлению механизма взаимодействия между молекулами в подобных жидкостях (ньютоновских жидкостях), применительно к конкретным веществам (пищевым продуктам).

Критериальное уравнение Нуссельта, которое характеризует теплообменный процесс в рассматриваемом роторном пленочном теплообменнике выглядит следующим образом [85]:

$$Nu = f\left(\text{Pr}, \text{Re}, \text{Re}_{\text{TM}}, Kq, \frac{\delta}{D}, \frac{H}{D}, \frac{\omega}{\omega_0}\right)$$

В реальных условиях настоящую функцию можно решить лишь при помощи эксперимента, в котором на практике должны рассматриваться процессы теплообмена в момент концентрирования пивного сула в РПА и их соответствующей математической обработки. Составные критерии настоящего выражения устанавливаются путем определения теплофизических параметров в рассматриваемом процессе. На сегодняшний день моделирование считается одним из современных, наиболее эффективных и точных методов обработки результатов исследования, который нашел все большую востребованность во многих областях науки. С помощью моделирования тех или иных процессов можно значительно сократить время проведения опытов, и освоения работы новых технологий и производств. Наибольшее применение среди них получило математическое моделирование, что напрямую связано с прогрессом в технике и технологиях [1-4].

Актуальность темы исследования. Сегодня во всем мире отмечается преобладающий интерес к качеству продуктов питания, вызванный соответствующим развитием стран и государств мира. В подавляющем случае решение поставленного вопроса, связанного с недостатком или экономией как энерго-, так и экономических ресурсов, главным образом, зависит от местных географических возможностей.

Актуальным вопросом на сегодняшний день считается тщательное изучение термодинамических и физико-химических свойств веществ, при этом учитываются

происходящие процессы на уровне межчастичного взаимодействия с учетом ориентационных эффектов, развитие которых наблюдается в пищевых продуктах под влиянием внешнего поля, температуры и давления. Глубокое изучение данных параметров имеет огромное теоретическое и прикладное значение. Кроме всего, численные результаты названных параметров применяются и в инженерных расчетах, связанных как с проектированием, так и с соответствующей обработкой, сопровождением и эксплуатацией теплообменных устройств и аппаратов. Таким образом, исследование физико-химических и термодинамических свойств, а для разлагающихся продуктов, кинетических параметров реакции и их различного рода термического разложения для последующего моделирования процессов в теплообменниках и аппаратах для получения пива, а также анализа эффективностей выбранных конструктивных решений, определения времен «живучести» продуктов пива до ухудшения его свойств и необходимости перезаправки, является чрезвычайно важной и актуальной проблемой.

Связь работы с научными программами и грантами. Диссертационные исследования выполнены в рамках научно-технической программы «Теплофизика и теплоэнергетика» по направлению научной деятельности Технологического университета Таджикистана «Разработка методов и средств повышения надежности и эффективности эксплуатации энергетических средств в мини пивзаводах». Основные результаты диссертации, представленные в качестве аппроксимационных зависимостей по физико-химическим и термодинамическим свойствам изученных веществ, применяются в соответствующих расчетах в процессах проектирования мини пивзаводов. Аппроксимационные зависимости, полученные по составленным подробным таблицам термодинамических и физико-химических свойств системы вода и сусло в условиях аэрации и без аэрации, рекомендуется для использования проектными организациями при расчёте различных технологических и химических процессов, а разработанная аппаратура – для выполнения научно-исследовательских работ.

Целью работы является совершенствование технологии и оборудования для производства пива с использованием местного сырья Республики Таджикистан на базе экспериментально-расчетных исследований основных механизмов теплообменных процессов.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1. Определение состояния исследования основных закономерностей касательно технологии производства пива в условиях Республики Таджикистан.

2. Исследование физико-химических и термодинамических свойств, равновесного состояния и кинетики термического разложения продуктов пива в выбранном интервале температур (298-379) К, давлений (0,101-9,81) МПа и влияния условий аэрации.

3. Определение механизмов влияния процесса аэрации семенных дрожжей на физико-химические и термодинамические свойства исследуемой системы (сусло + вода), а также на кинетику потребления кислорода дрожжевыми клетками и на концентрацию сухих веществ сусла на стадии основного брожения при разных температурах.

4. Совершенствование методики определения физико-химических, термодинамических характеристик (теплопроводности, температуропроводности, теплоемкости и т.п.) и кинетики разложения объектов исследования.

5. Проведение технико-экономического обоснования, совершенствования технологической схемы производства пива с применением местного сырья Таджикистана и разработка рекомендаций по их дальнейшему применению.

Разработаны и созданы установки для:

а) реализации методов монотонного разогрева и регулярного теплового режима первого рода, служащие основой для экспериментального исследования теплопроводности, температуропроводности и теплоёмкости объектов (сусло + вода и их смеси) при различных температурах и давлениях;

б) получения термограмм исследуемых веществ;

в) получения экспериментальных значений физико-химических, термодинамических свойств изучаемых веществ при температурах от 298 до 379 К и давлениях от 0,101 до 9,81 МПа;

г) выявления зависимости физико-химических и термодинамических характеристик изучаемых системы (сусло + вода) от температуры, давления;

д) получения аппроксимационных зависимостей на основе проведенных экспериментальных исследований, позволяющих установить взаимосвязь между названными параметрами и параметрами состояния;

ж) на основе выполненных экспериментов и соответственного анализа по исследованию кинетики процессов разложения изучаемых веществ в результате термохимического воздействия, выявлена динамика и константы формальной кинетики данной реакции.

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:

1. Усовершенствованы экспериментальные установки для измерения температуро-проводности (метод регулярного режима), теплоемкости (метод монотонного разогрева), путём добавления грузопоршневого манометра и пережимного сосуда при различных давлениях.

2. Разработан способ изменения теплофизических параметров (ρ , λ , c_p , α) сусла в технологическом оборудовании путем регулирования расхода воздуха для аэрации.

3. Получены экспериментальные данные по физико-химическим и термодинамическим параметрам продуктов для производства пива на основе растворов «сусло + вода» и кинетике реакции термического разложения данного продукта с учётом и без учёта аэрации в интервале температур (298-379)К и давлений (0,101-9,81)МПа.

4. Проведен численный анализ влияния аэрации на результат исследования периода термического разложения продуктов для производства пива и изменения их основных физико-химических и термодинамических параметров.

5. Получены эмпирические формулы, устанавливающие связь теплопроводности, теплоемкости, температуропроводности и плотности образцов с

температурой и давлением: $P-\lambda-T$; $P-a-T$; $P-c_p-T$; $P-c_p-p-T$, позволяющие вычислить данные параметры в неисследованных точках температуры, давления и концентрации компонентов.

6. Получены выражения для расчета кинетики протекания химических процессов при брожении суслу путем аэрации в различных условиях, результаты которых способны дать дальновидную оценку течения этих процессов во времени.

Практическая ценность работы:

1. Усовершенствованные экспериментальные установки можно использовать для определения физико-химических свойств и скорость разложения продуктов для производства пива с существенной экономией времени и ресурсов, с учетом аэрации.

2. Полученные физико-химические свойства объектов исследования и дополняют банк значений по термодинамическим характеристикам системы сусло + вода новыми данными, которые могут быть использованы в практических расчетах процессов и технологических аппаратов производства пива.

3. Кинетические параметры реакций термического разложения, определенные по экспериментальным данным, позволяют оценить период эффективности использования продуктов для производства пива до его разложения и потери свойств.

4. Математические модели, которые были созданы в процессе исследования, позволяют выполнить прогноз течения соответствующих технологических процессов во время брожения продуктов для производства пива.

Результаты исследования внедрены:

Усовершенствованные экспериментальные установки для измерения теплоемкости, температуропроводности, теплопроводности и получения термограммы системы «сусло + вода» используется в научных и учебных лабораториях кафедры «Машины и аппараты пищевых производств» Технологического университета Таджикистана преподавателями, аспирантами, магистрантами при выполнении выпускных, квалификационных и научных работ. В предприятии ООО «Санет» в технологическое оборудование были внесены усовершенствования (уменьшение толщины корпуса варочного оборудования, уменьшение оборота мешалок, изменение

направления движения теплоносителя) и заменен зарубежный солод на солод производства Республики Таджикистан (акты о внедрении результатов прилагаются).

На защиту выносятся:

1. Новые варианты соответствующих опытных установок и обоснование их использования при опытном изучении температуропроводности (метод регулярного теплового режима), теплоемкости (работающей методом монотонного разогрева) системы сусла и воды в условиях комнатной температуры и изменения давления опыта;

2. Экспериментальная установка для исследования теплоемкости и способ получения термограммы для электролитов, т. е. установления адиабатического изменения температур с учетом времени разложения;

3. Аппроксимационные зависимости, с помощью которых можно выполнить надлежащий расчет соответственных физико-химических и термодинамических параметров веществ с изменением параметров состояния (температура и давление), а также установить связь температуры разложения со временем при аэрации образцов и без нее.

4. Экспериментальные данные по температуропроводности, теплопроводности, теплоемкости, плотности при различных температурах $T = (298-379)$ К и давлениях $p = (0,101-9,81)$ МПа, а также температуре разложения исследуемых растворов (адиабатического изменения температур);

5. Закономерности температурного изменения скорости химической реакции, термического разложения. Значение кинетических констант химической реакции (предэкспоненты энергии активации);

6. Результаты исследований кинетики протекания химических процессов на стадии главного брожения и разработанная математическая модель кинетики сбраживания пивного сусла.

Степень достоверности результатов исследований подтверждается результатами контрольных измерений на опытных устройствах, применяемых для экспериментов; результатами тестирования примененных методик и алгоритмов, разработанных для решения основных задач по изучению про-

цесса теплопереноса в менее сложных нестационарных нелинейных задачах по теплоёмкости, температуропроводности и теплопроводности; выполнением ряда экспериментальных исследований, результаты которых хорошо согласуются с расчетными, полученными с помощью эмпирических уравнений.

Личный вклад автора заключается в постановке и выполнении задач исследования, в выборе методов и установления пошагового решения этих задач, выявлении основных закономерностей процессов приготовления пива и связанных с ними физико-химическими превращениями, проведении экспериментов по исследованию соответствующих характеристик в условиях производства, получении данных по энергии активации, степени и кинетики разложения, а также в самостоятельном проведении соответствующей обработки и анализа, полученных в ходе экспериментов результатов по физико-химическим и термодинамическим свойствам (теплопроводность, теплоемкость, плотность, температуропроводность, разность энтальпии, разность энтропии, энергии Гиббса, энергии Гельмгольца, внутренняя энергия, коэффициент изотермической сжимаемости, коэффициент объемного расширения, разность теплоемкости и коэффициентов модифицированных уравнений типа Тейта) и получении основных выводов по выполненному объему работы.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на: 23th National and International Meeting on Inverse Problems. Michigan, USA, (2010); 2^{-ой} Международной научно-технической конференции "Новое в технологии и технике пищевых производств" Воронеж, (2010); Республиканской научной конференции "Проблемы современной координационной химии", посвященной 60-летию члена корреспондента АН РТ, доктора химических наук, профессора Аминджонова А.А., Душанбе, (2011); 13^{-ой} Российской конференции по теплофизическим свойствам веществ (с международным участием), Новосибирск (2011); 4-ой Международной научно-практической конференции "Современные энергосберегающие тепловые технологии, СЭТТ", Москва, (2011); 19 European Conference on Thermophysical Properties, Thessaloniki, Greece, (2011); Республиканской науч-

но-практической конференции «Перспективы развития исследований в области химии координационных соединений», посвященной 70-летию профессора О. Азизкулова, Душанбе, (2011); 18th Symposium on Thermophysical Properties, Boulder, Colorado, USA, (2012); Восьмой Международной теплофизической школе, посвященный 60-летию профессора Сафарова М.М., Душанбе-Тамбов, (2012); 4^{-ой} Конференции Евро-Азии, Москва, (2014); Девятой Международной теплофизической школе “Теплофизические исследования и измерения при контроле качества веществ, материалов и изделий”, Душанбе-Москва-Тамбов, (2014); VII^{-ой} Международной научно-практической конференции: «Научное обозрение физико-математических и технических наук в XII веке», Москва, (2014); 10^{-ой} Международной научно-практической конференции «Образование и наука», Руснаука, Прага, (2014); Международной научно-технической конференции “Нанотехнологии функциональных материалов” (НФМ-2114), Санкт-Петербург, (2014); Десятой Международной теплофизической школе “Теплофизические исследования и измерения при контроле качества веществ, материалов и изделий”, Душанбе-Москва-Тамбов, (2016); Конференции ТНУ, Душанбе, (2016).

Публикации. Основные результаты диссертационной работы изложены в 20 печатных работах в материалах международных и республиканских конференций, а также в престижных научных журналах, 5 из которых опубликованы в журналах из списка, рекомендованного ВАК при Президенте Республики Таджикистан.

Структура и объём работы. Настоящая исследовательская работа состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка использованной литературы из 212 наименований. В работе также содержатся 41 рисунков, 37 таблиц и в целом изложена на 170 страницах машинописного текста и 12 страниц приложения включительно.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приводится актуальность, цель и задачи исследования, научная новизна, практическая значимость работы, а также обзор изученной

информации уже выполненных работ в данном направлении. Показана актуальность и необходимость проведения комплексного экспериментального изучения удельной теплоёмкости, теплопроводности, температуропроводности, определения термодинамических функций (энтальпия, энтропия, энергия Гиббса, энергии Гельмгольца и др.) и исследования процесса изменения адиабатического измерения температуры.

В первой главе представлен обзор литературных данных по вопросу состояния исследования процессов производства пива и основных характеристик её компонентов. Приведены описания методов экспериментальных исследований растворов, в связи с чем, освещается актуальность исследования свойств системы сусло + вода, в частности, образование анизотропной структуры и связанные с этими процессами особенности физико-химических и термодинамических свойств таких систем. Подобные исследования могли бы быть полезными и при теоретическом описании жидких многофазных сред.

Во второй главе представлены использованные экспериментальные установки и подробные описания к ним, порядок выполнения работ на них и соответствующая методика расчета погрешности измерения. Для определения теплофизических и термодинамических свойств системы сусла и его растворов за основу был взят и усовершенствован известный метод монотонного разогрева, предложенный в свое время профессорами Е.С. Платуновым и Сафаровым М.М.

В третьей главе приведены экспериментальные значения теплофизических и термодинамических свойств продуктов пива (сусло + вода). На экспериментальной установке, разработанной профессором Платуновым Е.С. и его учениками измерена удельная изобарная теплоёмкость, температуропроводность и теплопроводность (разработки профессора Сафарова М.М. и его учеников) продуктов пива в зависимости от давления с учетом поля аэрации и без него. Также в данной главе приведены результаты теоретического расчета кинетики разложения исследуемых образцов (теории Ленгмюра-Арениус-

са-Эйринга), и результаты экспериментального исследования физико-химических и термодинамических свойств в зависимости от температуры, давления и поля аэрации.

В четвертой главе представлены методики анализа и обработки полученных экспериментальных данных, которые опираются на законы термодинамического подобия и соответственных состояний. Также в главе приведен порядок обработки полученных результатов, на основе которых были выведены соответствующие эмпирические уравнения.

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

**Диссертационная работа выполнена на кафедре «Общая физика»
Таджикского государственного педагогического университета имени
С.Айни.**

Глава 1. ОБЗОР СОСТОЯНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА ПИВА И ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕГО КОМПОНЕНТОВ

1.1. Производство пива в Республике Таджикистан

Пиво является напитком, имеющим древнюю историю, а рецепты его приготовления насчитываются в сотни.

История напитка. Пиво представляет собой насыщенный диоксидом углерода пенистый напиток, относящийся к категории слабоалкогольных, который получают в результате брожения солода (в основном ячменного) путем использования пивных дрожжей и добавления в него хмеля. От качества составных компонентов как сырья, в свою очередь, зависят вкусовые, питательные и другие потребительские качества напитка.

Китайцы изготавливали пиво из риса, индейцы готовили из кукурузы. Существенное изменение в приготовлении пива явилось добавление хмеля. Первыми, кто стали варить пиво по новому рецепту стали европейцы в начале VIII-го века. Отсюда оно приобрело название хмельного напитка.

Основным компонентом, сырьём данной отрасли считается солод. Солод представляет собой зерна злаков, которые дали ростки. Чаще всего применяют ячмень. Для производства пива в среднем необходимо несколько недель. Готовый продукт производители стараются сразу довести до потребителя, поскольку напиток богат большим количеством микроэлементов (живые микробы, дрожжи), которые нормализуют микрофлору и тем самым функцию кишечника. Поэтому свежее пиво еще называют «живым».

Согласно статистике, приведенной Агентством по статистике Республики Таджикистан, в стране 25 пивоваренных предприятий, которые в общей сложности производят семь сортов пива. За 2018 год они выпустили 94,2 тысячи декалитров пива, когда в 2014 году произвели 109,5 тысяч декалитров пива. Анализ упомянутых официальных данных показывает, что с каждым годом объем потребления данного вида продукции сокращается. Однако, по

тем же официальным показателям, потребление пивопродукций в РТ имеет тенденцию увеличения за счет импорта.

Цена за легкое пиво типа лагер в Таджикистане самая низкая в мире. Например, в городе Худжанде стоимость 0,5 литра данного пива составляет около 50 центов. В Душанбе на несколько центов дороже. Так, пиво «Аливария», «Душанбе», «Кристал» от производителя (центр столицы) стоит около 4-5 сомони (40-50 центов), а нефильтованное живое пиво «Сим-Сим» в фирменном баре около 7 сомони (60 центов), осветленное в среднем 7 сомони.

Сегодня на наш рынок поступает достаточно конкурентоспособная продукция от отечественных производителей.

Жесткость воды при производстве пива должна быть в пределах рецептуры определенного сорта, вкусной, без запаха и постороннего вкуса. Если применяемая вода не отвечает установленным нормативам, то ее искусственным способом умягчают, однако в этом случае молекула воды разрушается.

"Таджикистан – горная страна, которая насыщена чистыми водами горных рек, талой водой ледников, которая по своей природе является мягкой. Применение этой воды, качественного солода, хмеля и дрожжей способствует получению качественного пива. Кроме талой горной воды, также широкое применение нашли родниковые воды горных районов республики.

Данное обстоятельство стало следствием замещения в магазинах отечественной продукции импортным пивом, несмотря на то, что выпускаемый объем пива отечественными производителями может обеспечить и собственный рынок и даже экспортировать его.

1.2. Состояние исследования структурообразующих компонентов производства пива

Сырье. В приготовлении пива необходимы следующие основные ингредиенты: ячмень, хмель, вода и дрожжи.

От качества данных составляющих зависит и качество готовой продукции, представляемой на потребительский рынок. Зная их свойства можно управлять технологическим процессом его приготовления и получать желаемый результат.

Как было отмечено выше, ячмень является главным сырьем в приготовлении пива. Использование ячменя обосновано его значительным содержанием крахмала. Также после его переработки в нем имеется шкурка зерен, так называемая мякинная оболочка, которая образует фильтрующий слой. Производство пива начинается от переработки ячменя в солод.

Нередко применяются и несоложенная кукуруза, рис, сорго, ячмень.

Ячмень. Ячмень представляет собой зерновую культуру, колос которого имеет длинную ость. Его подразделяют на несколько групп, каждая из которых имеет свои особенности в процессе приготовления пива. Состав и свойства ячменя также разный. Его влажность колеблется от 12 до 20%. Влажный ячмень плохо прорастает, поэтому в таких случаях возникает необходимость в его дополнительной сушке. Хранить ячмень необходимо при влажности не более 15%. Химический состав ячменя: общие углеводы 70,0-85,0%, белок 10,5-11,5%, минеральные вещества 2,0-4,0%, жиры 1,2-2,0%, прочие вещества 1,0-2,0%. Основным среди них является крахмал, который является экстрактом для сбраживания.

Крахмал. Доля крахмала $(C_6H_{10}O_5)_n$ в ячмене составляет 50-63-65%, который является одним из значимых компонентов. Он образуется в результате ассимиляции и заключительной конденсации глюкозы $(C_6H_{12}O_6)$ в клетках мучнистого тела медленно созревающего зерна, который имеет в основном две структуры: амилоза и амилопектин.

Пентозаны. Пентозаны состоят из пентоз - ксилозы и арабинозы, влияние которых на качество пива не значительны.

Белковые вещества. В ячмене содержание белка составляет от 8 до 16%. Однако, несмотря на его незначительную концентрацию в пиве, на его

качество влияет в значительной степени. Поэтому производители стремятся уменьшить его концентрацию в солоде из соотношения (0,7-1,0%).

Протеины. Протеины являются представителями высокомолекулярных белков с относительной молекулярной массой от 20 000 до 300 000, нерастворимые в воде и осаждающиеся при кипячении их водных растворов. Ячмень содержит около 92% протеина.

Глютелин. Белок ячменя содержит около 30% глютелина, который в слабощелочных растворах способен раствориться.

Проламин. Проламин он же гордеин в составе белка ячменя занимает около 37%, растворим в 80%-ном спиртовом растворе и незначительно может попадать в дробину.

Глобулин. Глобулин ячменя он же эдестин способен раствориться в слабосолевых растворах и составляет приблизительно 15% белка ячменя. Эдестин состоит из четырех компонентов, среди которых сера-глобулин, не способен полностью осаждаться, что может стать следствием помутнения пива.

Альбумин. Альбумин он же лейкоцин, в белке ячменя содержится до 11% и способен растворяться в чистой воде. С помощью кипячения полностью осаждается и благодаря ферментативному превращению в расщепляющие продукты в процессе солодоращения и затирания его содержание уменьшается.

Высокомолекулярные продукты расщепления. Они содержат комплекс продуктов расщепления протеина и пептонов. Они повышают пеностойкость напитка, однако могут стать следствием его помутнения.

Низкомолекулярные продукты расщепления. Образуются из мельчайших составляющих белковых веществ – аминокислот за счет полимеризации пептидов.

Аминокислоты представляют собой основной источник питания для дрожжей в процессах построения новых клеток.

Жиры (липиды). В составе зерна ячменя содержится до 3% жиров, которые в основном накапливаются в алейроновом слое и в зародыше. Липиды являются представителями жирных кислот, т. е. углеводородные соединения с концевой группой COOH , посредством которой уточняется слабая кислота. Жирные кислоты бывают:

- с короткой цепочкой (уксусная кислота CH_3COOH);
- с цепочкой средней длины, имеющей 5-14 атомов углерода;
- с длинными цепочками, имеющих 16-18 атомов углерода.

Сложные эфиры - это соединения кислот и спирта. Глицерин является спиртом (трехвалентным пропиловым, пропанолом).

Минеральные вещества. В ячмене их содержание колеблется в пределах 2-3% и в основном имеет неорганические связи. К таковым относятся фосфаты, силикаты, калийные соли.

Прочие вещества. В состав ячменя также входят дубильные, горькие вещества, полифенолы, а также витамины и ферменты.

Хмель. Хмель – многолетнее двудомное растение из группы крапивоцветных и семейства коноплевых растений. В их состав входят горькие смолы, придающие соответствующую горечь пиву и эфирные масла, которые обладают ароматическими свойствами. Сушку хмеля до влажности 8-12% проводят при 50°C , после чего его упаковывают. Сухой хмель содержит: горькие вещества 18,5%; хмелевое масло 0,5%; дубильные вещества 3,5%; белок 20,0%; минеральные вещества 8,0%, целлюлозу и др.

Горькие вещества являются поверхностно активными веществами (ПАВ) из-за чего пена у напитка стойкая. Они так обладают незначительным бактериостатическим свойством, продлевающим срок годности пива. Поэтому для повышения стойкости пива проводят специальные мероприятия.

Хмелевое эфирное масло по своей природе представляет собою смесь углеводород- и кислородсодержащих соединений. Также, в зависимости от сорта, хмель может содержать низкокипящие монотерпены типа Мирцен.

Дубильные вещества (полифенолы) также присутствуют в хмеле, имеющие важные свойства для приготовления пива:

- вяжущее свойство;
- связывание и осаждение белковых веществ;
- окисление в флорафены;
- связывание с железными солями (черноватый оттенок).

Дубильные вещества это сложные полимерные соединения, установленные путем соответствующих анализов, на основе которых было установлено, что они содержат большое количество мономерных фенольных соединений, из-за чего дубильные вещества еще называют полифенолами. Хмельные и солодовые полифенолы отличаются друг от друга повышенной степенью конденсации и более высокой химической активностью.

Химический состав, пищевые свойства и особенности биологического действия пива.

Технология производства пива состоит из трех этапов:

1. Приготовление солода. Этап заключается в проращивании и в последующей обработке зерен ячменя. Затем ростки от них удаляют, сушат и откладывают их на месяц.
2. Приготовление сусла. На этом этапе заготовленный солод заливают водой. В полученной массе (затор) протекает процесс расщепления крахмала на простые сахара. Интенсивность процесса приобретает с добавлением хмеля в массу и ее проваривания. Получившуюся массу называют суслом.
3. Третий этап заключается в фильтрации и охлаждении полученного отвара, в который потом добавляют специальные пивные дрожжи. Через некоторый период времени полученную массу дображивают уже при более низких температурах в течении нескольких недель и, даже месяцев, после чего готовый продукт разливают по тарам (бутылки, банки, бочки).

Этиловый спирт (около 30 г/л), как и углеводы считается главным компонентом пива, который повышает его калорийность (400-450 ккал/л) [29, 39], а углекислый газ улучшает желудочную секрецию, что в свою очередь

способствует нормализации кровотока в мышцах, мозге, печени, легких и почках.

Этанол в составе пива не оказывает дегидратирующего эффекта, поскольку в составе также имеется большое количество воды. Относительно вина пиво имеет небольшое количество высших спиртов порядка 50-100 мг/л, а содержание метилового спирта практически равно нулю.

Представителями азотосодержащих в его составе являются полипептиды и аминокислоты. Компоненты, которые содержатся в незначительном количестве в основном делятся на следующие группы: минеральные соединения, витамины, органические кислоты, фенольные соединения, горькие вещества, ароматические соединения, биогенные амины и эстрогены.

В составе пива также включены ионы калия (160 - 450 мг/л), натрия (около 120 мг/л), кальция (около 80 мг/л), магния (около 80 мг/л), фосфора (около 140 мг/л), серы и хлора, тиамина (0,005-0,15 мг/л), рибофлавина (0,3-1,3 мг/л), аскорбиновой кислоты (20-50 мг/л), никотиновой кислоты (5-20 мг/л), фолиевой кислоты (около 110 мг/л), а также железа, меди, цинка и другие, содержание которых не превышает 1 мг/л [18].

Органические кислоты в пиве содержатся в виде солей (лимонной кислоты (около 130 мг/л), пировиноградной (около 60 мг/л), уксусной (около 90 мг/л), глюконовой (около 30 мг/л) и щавелевой (около 15 мг/л)), а также в нем присутствуют полифенолы в пределах 150-300 мг/л [6], среднее содержание которых представлено в таблице 1.

Из-за низкого содержания полифенолов в составе пива по сравнению с вином увеличивается риск развития злокачественных образований мочевыводящих путей [26]. Их наличие в пиве развивает его бактерицидное, бактериостатическое действие. Однако присутствие фенольных соединений нарушает коллоидную структуру пива, что приводит к его помутнению и к выпадению осадков.

Горькие вещества в составе пива являются представителями малосмолистых и высокосмолистых веществ. Технология производства пива и спосо-

бы его хранения могут стать причиной полимеризации, окисления, вплоть до изменения его начальных свойств. Малосмолистые вещества представляют собой соединения гумулонов, лупулинов и группы других соединений. Эти вещества, как и другие экстрактивные вещества хмеля, являются представителями психоактивных соединений и оказывают на организм седативное, снотворное действие, а в больших дозах способен вызвать галлюцинацию.

Также в состав пива входят и ароматические соединения (более 70 компонентов), такие как монотерпены (мирицен) и сескьюитерпены (b - кариофиллин, гумулин, фарнисин и др.). Окисленная фракция включает терпеновые спирты (линалуол, гераниол), другие спирты, эфиры и их производные, альдегиды, кетоны, фитоэстрогены и др. [10, 35].

Также как и в любой другой пищевой промышленности, в пивоваренной промышленности для улучшения вкусовых, ароматических качеств, продления срока хранения, ускорения срока изготовления и многое другое используют пищевые добавки, не влияющие на его биологические свойства.

В настоящее время широко применяют разнообразные стабилизаторы коллоидной стойкости.

Таблица 1.1. - Содержание высших спиртов в пиве

Спирт	Концентрация, мг/л
n-Пропанол	9,8
Изобутанол	9,6
Амиловые спирты	60,1
2-Фенилэтанол	19,8

Таблица 1.2. - Состав готового пива типа “пилзнер”

Спирт	4,8 – 5,1 % об. (мл/100 мл)
Экстракт	3,9 – 4,1 г/100 г
Вода	920 г/кг
Физиологическая калорийность пива	400 – 440 кДж/кг
Углеводы (>40)*	27 – 30 г/л
Белки и аминокислоты (>30)*	4,3 г/л

Минеральные вещества и микроэлементы (>40)*	1500 – 1700 мг/л
в том числе натрий	40 – 45 мг/л
витамины (>14)*	200 – 220 мг/л
Органические и жирные кислоты (>100)*	630 – 680 мг/л
Фенольные вещества (>50)*	150 – 155 мг/л
Хмелевые вещества (>130)*	250 – 500 мг/л
Двуокись углерода	0,50 г/100 г
Двуокись серы	3 мг/л
Нуклеиновые вещества (>25)*	300 мг/л
Амины, амиды, пиразины (>50)*	70 мг/л
Побочные продукты брожения (>300)*	1500 – 1800 мг/л
Балластные вещества	1520 – 1530 мг/л
Нитраты	25 – 33 мг/л
Оксалаты	12 – 13 мг/л

* Указанные в скобках числа обозначают общее число отдельных соединений, объединенных в составе той или иной группы веществ.

1.2.1. Основные характеристики сула как исходный продукт для производства пива

В производстве пива процесс затирания является одним из основополагающих. Суть данного процесса заключается в том, чтобы нерастворимые вещества солода могли перейти в растворимое состояние, тем самым получаемые компоненты поступают в раствор и приобретают статус вещества экстракта.

К числу растворяющихся компонентов относятся сахара, декстрины, минеральные вещества и некоторые белки, а к числу не растворяющихся крахмал, целлюлоза, часть высокомолекулярных белков и другие соединения, удаляемые из раствора в виде дробины путем фильтрования.

Несмотря на старания производителей как можно большее количество дробины перевести в растворимые компоненты, т.е. экстракт, важным является качество получаемого экстракта. Например, в экстракте не должно присутствовать дубильных веществ из оболочек.

Поскольку немало важную роль играет расщепление крахмала путем затирания, температура, при которой протекает процесс, оказывает непосредственное влияние. Благодаря влиянию определенной температуры под действием ферментов происходит его расщепление на сахара и растворимые декстрины без остатка, т.е. активность ферментов от оптимальной для них температуры.

В теплом состоянии водного раствора крахмал впитывает большое количество воды, в результате чего твердые зерна крахмала набухают и в последствие разрываются. Таким образом, раствор становится вязко-текучим, консистенция которого во многом зависит от того количества жидкости (воды), которое они поглотят и для разных зерновых культур он разный. Данный процесс называется клейстеризацией. Клейстеризованный крахмал не содержит твердых зерен, что способствует его лучшему расщеплению.

Разжижение. Длинные цепочки крахмала под влиянием амилазы разрываются на более короткие, в связи с чем, вязкость раствора в целом уменьшается.

Процесс разжижения представляет собой уменьшение вязкости раствора (клейстеризованного крахмала). Из-за разной длины получаемых цепочек образуются мальтозы и другие сахара, глюкоза и мальтотриоза.

Процесс расщепление крахмала следует держать под строгим контролем, поскольку не расщепленный крахмал в пиве вызывает клейстерное помутнение. Контроль осуществляется при помощи 0,02-н раствора йода (спиртового раствора йода и йодистого калия) путем его добавления в охлажденный образец пробы. Окрашивание пробы от темно-синего до красного цвета свидетельствует о наличии крахмала и более крупных декстринов, в то время как декстрины малой фракции и все сахара не влияют на его желто-коричневый окрас.

Осахаривание по своей сути это процесс, при котором крахмал полностью расщепляется на мальтозу и декстрины, которые в последствие подвергаются сбраживанию и дображиванию.

Содержание глюкана в ячменном зерне также способствует гелеобразованию. В связи с этим также проводят расщепление данного продукта с помощью эндоглюканазы при температуре 40-50⁰ С. По истечению некоторого времени при данной температуре глюкан переходит в растворенное состояние, тем самым уменьшается вероятность гелеобразования.

Ненасыщенные жирные кислоты практически всегда содержатся в дробленом солоде, окисление которых неизбежно, если не удалить из его состава кислород, что в свою очередь достичь невозможно в силу применяемых смесительных устройств, способствующих контакту помола с воздухом. Однако ферментативное расщепление, несмотря на полное удаление кислорода, происходит липоксигеназой. Это вещество накапливается в лепестке и корешке зародыша, реагирующее на изменения температуры.

1.3. Теоретическое обоснование определения теплофизических характеристик системы сусло + вода

Охарактеризование, а также проектирование теплообменных устройств, требуются относительно точные данные по физико-химическим, теплофизическим и термодинамическим параметрам (теплоёмкость, теплопроводность, температуропроводность, энтальпия, энтропия, энергия Гиббса, энергия Гельмгольца и т.п.).

Теплопроводность, теплоемкость и температуропроводность растворов изучали с помощью метода монотонного разогрева [75-79]. Подробные схемы, эксплуатация, проведение опытов и расчет погрешности соответственных измерений также изложены в [75, 79].

Согласно изложенной выше цели, нами было выбрано соответствующее теплообменное устройство для исследования этих параметров в условиях концентрирования пивного сусла (таблица 1.3) [85].

65-70%-ю концентрацию в растворе создают путем многократного концентрирования сухими веществами в течении 20-30 минут и при условии $T = 70 \div 80^0$ С. Процесс должен проводиться при строгом обеспечении необхо-

димого давления, разреженности, температуры сусла в начале и конце концентрирования, а также температуры внутренней теплообменивающейся поверхности в трех ее точках по высоте [85].

Таблица 1.3. - Технологические режимы процесса концентрирования пивного сусла в экспериментальном роторном пленочном аппарате

Величина	Обозначение	Размерность	Пределы изменения
Подача исходного сусла	G_H	кг/с	0,8 - 2,7
Температура исходного сусла	t_H	$^{\circ}\text{C}$	22 – 60
Концентрация сухих веществ в сусле	C_H	%	10 -15
Давление греющего	$P_{\text{изб}}$	МПа	0,040 -0,506
Давление в аппарате	$P_{\text{ост}}$	МПа	0,020-0,065

По итогам опытов мы стали располагать данными о вязкости, плотности, поверхностного натяжения, теплопроводности, температуропроводности и теплоемкости. Также на основе экспериментов нами была установлена связь этих свойств исследуемого вещества с температурой, концентрацией сухих веществ и получено соответствующее выражение. Зависимость была установлена в интервале температуры от 20 до 70 $^{\circ}$ С и концентрации сухих компонентов в диапазоне от 10 до 70 % с интервалом в 10 %.

Данные по плотности вещества были получены пикнометром. Используя эти данные нами была показана связь плотности от концентрации добавляемых сухих веществ сначала при заданной температуре, а потом показана связь плотности от изменения температуры при заданной концентрации вводимых в образец сухих веществ. Поверхностное натяжение на границе раздела фаз (пивное сусло и его паровоздушная смесь) было изучено методом наибольшего давления пузырьков (метод Ребиндера).

ПАВ (поверхностно-активные вещества) пивного сусла относительно молекул самого растворителя сахара, слабо взаимодействует с ним. В итоге ПАВ вытесняясь скапливаются на поверхности, тем самым уменьшая меж-

молекулярное взаимодействие и соответственно поверхностное натяжение. На снижение поверхностного натяжения также влияет и повышение температуры.

Вязкость веществ исследована вискозиметром Гепшлера.

Согласно результатам исследований, представленных в [85] при малых концентрациях сухих веществ (10-30 %) вязкость также мало изменяется, однако при более значительных концентрациях порядка 50-60 % вязкость резко увеличивается (90 %). Таким образом, зависимость при малых концентрациях носит прямолинейный характер, а при больших она отклоняется от прямой (Finenger и Mark). С учетом частичной сольватации вязкость примет следующий вид [3]:

$$\eta = \frac{an}{V - V^1} \quad (1.1)$$

где: α – множитель, зависящий от формы частиц; n – общая численность частиц; V – объем системы, мл; V^1 – объем частицы как со сферически, так и с энергетически связанной с ней средой.

Рост величины n в формуле (1.1) приводит к снижению разности $(V - V^1)$ в знаменателе этой же формулы, что становится результатом резкого роста вязкости, чем концентрации.

Снижению вязкости способствует сопутствующий рост температуры опыта от 0 до 60° С. Связь между вязкостью и удельным объемом определяется с помощью [6]:

$$\eta = \frac{c}{V - \omega} \quad (1.2)$$

где C и ω , независящие от параметров состояния, частные постоянные. Поэтому $(V - \omega)$ является "свободным объемом" изучаемого раствора, который при изменении параметров состояния также изменяется и соответственно изменяет и вязкость системы в целом.

Математической обработкой полученных экспериментальных данных стало возможно уравнением регрессии связать этот параметр от температуры и концентрации сухих веществ в пивном сусле [85]:

$$\ln \eta = -0.805 - 0.129CB + 0.004t - 0.001CBt \quad (1.3)$$

Эмпирическое уравнение, используемое в процессе обобщения полученных результатов поверхностного натяжения образцов [85]:

$$\delta = (90.31 - 0.276CB - 0.156t) \cdot 10^{-3}, \text{ Н/м} \quad (1.4)$$

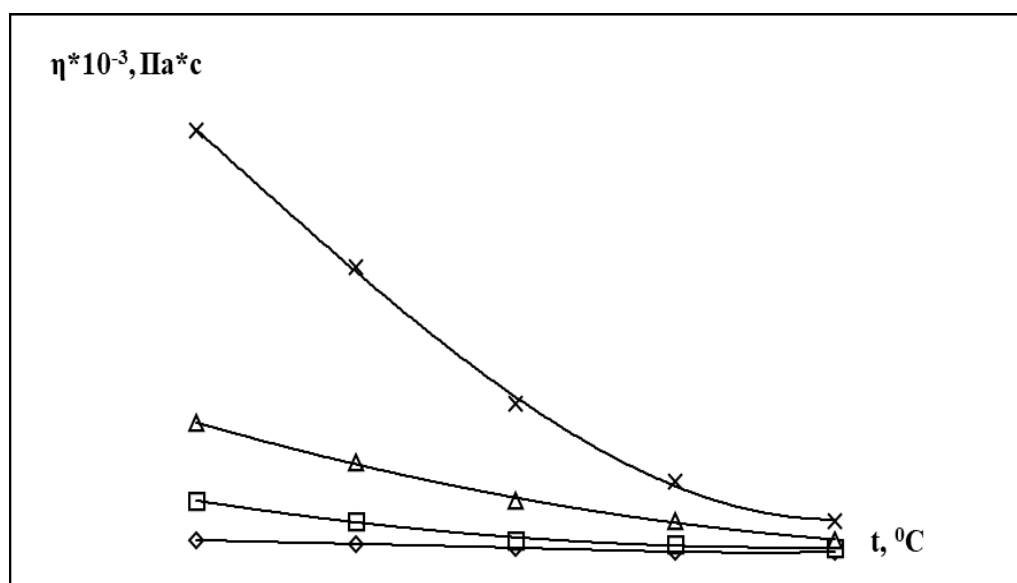


Рисунок 1.1. Зависимость вязкости пивного сула от температуры: 1 – концентрация СВ 10%; 2 – концентрация СВ 20 %; 3 – концентрация СВ 30%; 4 – концентрация СВ 40%; 5 – концентрация СВ 50%; 6 – концентрация СВ 60%

Использованием метода двух точек по температурно-временным интервалам были вычислены теплопроводность, объемная теплоемкость, температуропроводность. Результаты расчета ТФС пивного сула при температурно-концентрационной зависимости сведены в таблицу 1.4 и получены соответствующие эмпирические выражения для численного определения вязкости и поверхностного натяжения исследуемого вещества в температурно-концентрационной зависимости.

Таблица 1.4. - Значения коэффициентов температуропроводности, теплопроводности и теплоемкости пивного сусла при разном диапазоне температур и концентрации сухих веществ

Кон-я сух. веществ,	10	20	30	40	50	60
Температура, °С	Температуропроводность, 10^{-6} м ² /с					
20	11,0	10,9	10,8	10,7	10,6	10,5
30	11,2	11,1	10,9	10,8	10,7	10,6
40	11,5	11,3	11,1	10,9	10,8	10,7
50	11,6	11,5	11,3	11,1	10,9	10,8
60	11,7	11,6	11,4	11,3	11,1	11,0
	Коэффициент теплопроводности, Вт/(мК)					
20	0,492	0,466	0,424	0,398	0,370	0,352
30	0,494	0,478	0,446	0,428	0,385	0,368
40	0,496	0,486	0,468	0,440	0,406	0,382
50	0,498	0,492	0,476	0,452	0,428	0,404
60	0,500	0,496	0,482	0,470	0,439	0,420
	Теплоемкость, 10^{-3} кДж/м					
20	4,6	4,5	4,4	4,3	4,2	4,1
30	4,4	4,3	4,2	4,1	3,9	3,8
40	4,2	4,1	4,0	3,8	3,7	3,6
50	4,0	3,8	3,7	3,6	3,5	3,4
60	3,8	3,7	3,6	3,5	3,4	3,3

Анализ зависимости, представленных в таблице 1.4 теплофизических свойств от температуры и концентрации сухих веществ показал их незначительное изменение. Полученные средние значения данные теплофизических свойств с помощью метода интерполяции применяются для критериального описания процесса теплообмена (критериальное уравнение теплообмена 1.1) [85].

1.3. Основные физико-химические свойства воды

В физике жидкого состояния, в силу своей аномальности большое значение имеет вода и ее растворы [15, 22, 25, 65, 95, 96, 101-104, 106-114, 117, 119-136].

В качестве примера можно отметить ее аномально малый изобарный коэффициент теплового расширения (α_p), а также экстремумы, которые

наблюдаются в зависимостях скорости звука, ее плотности, сжимаемости и теплопроводности от температуры. И наоборот, ее изохорная теплоемкость (C_V) аномально велика и имеет очень малую температурную зависимость (273-373 К), что также не свойственно другим жидкостям.

В классической теории Бернала и Фаулера [15] вода изучается в качестве смеси трех структур. Согласно данной теории ее аномальности зависят от изменения соотношения числа молекул этих структур при соответствующем изменении температуры. Однако существует множество мнений касательно количества и типа этих структур.

Так, по мнению Холла [111], например, вода состоит из двух структур «рыхлой» (льдоподобной, ажурной) и плотноупакованной, у которых молярный объем отличается друг от друга. Согласно Самойлову [92-94], льдообразный каркас обладает структурой типа льда – f , а плотноупакованная структура представляет собой мономеры воды, которые замещают пустое пространство данного каркаса, сформировавшегося молекулами, связанными между собой водородными связями.

Ниже, в таблице 1.5 приведены некоторые физико-химические свойства воды.

Таблица 1.5. - Основные физико-химические свойства воды при атмосферном давлении и $T = 293$ К

Молекулярная масса μ , кг/моль	Температура кипения Т,К	Температура плавления Т,К	Плотность d , кг/м ³	Вязкость η , Па·с	Теплопроводность, Вт/(м·К)
0,018	373	273	1000	$1,03 \cdot 10^{-3}$	0,564

В таблице представлены стандартные справочные данные коэффициента динамической вязкости воды в зависимости от температуры (0...900° С) и давления (при давлении разреженного газа до 1000 МПа). Представленные данные предназначены для замены существующих таблиц ГСССД 6-89 “Вода. Коэффициент динамической вязкости при температурах 0...800° С и давлениях от соответствующих разреженному газу до 3000 МПа”. Необходимость

замены вызвана переходом на новую международную температурную шкалу 1990 г., а также переходом на новое основное уравнение для динамической вязкости, учитывающее новые экспериментальные данные и уточняющее значения вязкости в некоторых областях [107].

Подробные экспериментальные и теоретические данные по теплопроводности водных растворов органических жидкостей, электролитов, кислот и др. представлены в [19-23, 32-38].

Таблица 1.6. - Основные экспериментальные работы по теплопроводности воды

Год	Автор	Литер. источ.	Температурный диапазон, К	Диапазон давления, МПа
1923	Бриджмен	[19]	303 – 348	0,1 – 1200
1932	Шмидт, Зельшопп	[116]	282 – 542	0,1 – 7,5
1940	Тимрот, Варгафтик	[106]	301 – 604	0,1 – 40
1940	Ридель	[84]	293 – 353	0,2
1954	Расторгуев	[83]	273 – 353	0,1
1955	Шмидт, Ляйденфрост	[30]	305 – 345	0,1
1955	Джиллам, Лам	[31]	277 – 293	0,1
1956	Чаллонер, Пауэлл	[113]	274 – 353	0,1
1959	Лаусон и др.	[59]	303 – 383	0,1 – 800
1959	Варгафтик, Олещук	[22]	294 – 623	0,1 – 21,7
1962	Фритц, Польшц	[110]	298	0,1
1968	Ле Найндр и др.	[60]	277 – 643	0,1 - 50
1968	Тарзиманов, Лазовой	[103,104]	302 – 427	3 – 98
1968	Чернеева	[112]	373 – 623	10 – 100
1970	Бах, Григуль	[14]	293 – 363	0,1
1974	Минамияма, Ята	[63]	311 – 473	10,4 – 100
1974	Такизава, Нагашима, Тани-	[102]	273 – 373	0,1 – 48,7
1974	шит, Расторгуев, Григорьев, Ишханов	[83]	258 – 473	0,1 – 201

1974	Амирханов, Адамов, Магомедов	[5]	298 – 623	0,1 – 245,3
1974	Кастелли, Станли	[54]	275 – 305	1 – 140
1976	Сирота, Латунин, Беляева	[95]	493 – 673	2,4 – 27,6
1980	Спирин	[96]	273 – 298	0,1
2002	Магомедов У.Б	[122]	273-473	0,1-2000
2003	Бушуев	[96]	293	0,1
2003	Магомедов У.Б.	[121]	293-543	0,1-500
2006	Александров А.А. и др.	[120]	273-473	0,1-1000
2013	Магомедов У.Б.	[119]	293-645	0,1-600

Таблица 1.7. - Рекомендованные значения теплопроводности воды на линии насыщения [54, 106, 119, 121, 122-129], ($\lambda \cdot 10^3$, Вт/(мК)), при $T = 273\text{--}573$ К

T	λ	T	λ	T	λ	T	λ	T	λ
273	565	343	658	403	683	463	669	523	617
283	599	353	664	413	684	473	663	633	605
303	615	363	671	423	683	483	656	543	592
313	628	373	676	433	680	493	648	553	577
323	640	383	679	443	677	503	638	563	562
333	649	393	682	453	674	513	628	573	544

Пальмер [73] предположил, что механизм переноса, свойственный воде, проявляется тогда, когда ее молекулы образуют водородные связи. Водородные связи оказывают двойное влияние на теплопроводность воды:

1. Они способствуют появлению цепочек, направленных в сторону температурного градиента
2. Организованная цепочка, разрываясь на одном конце восстанавливается на другом, тем самым создает дополнительный перенос тепла вдоль данной цепочки.

Водородные связи имеют температурную зависимость, т.е. рост температуры приводит к росту количества оборванных связей. Таким образом, при повышении температуры водородные связи рвутся, отбирая тепло, и восстанавливаются с понижением температуры, отдавая полученное тепло. Во время процесса наблюдается формирование изменяющихся молекулярных цепей, которые также направлены вдоль теплового потока, тем самым передавая энергию связи вдоль образовавшейся цепи. Согласно предположению Пальмера именно соответствующим образованием связей и можно объяснить высокую теплопроводность воды и ее положительный температурный коэффициент. Согласно оценке Пальмера перенос тепла ее водородными связями достигает около 80%. Однако, стоит отметить, что предложенным методом сложно объяснить рост теплопроводности воды с повышением температуры, поскольку с ее повышением увеличивается численность разорванных связей, тем самым наблюдается уменьшение теплопроводности практически всех гидроксильных жидкостей. Спад теплопроводности при увеличении концентрации сухих веществ в растворе подчиняется объяснению теорией Пальмера [80] и Эйкена [37], которая зависит от водородных связей. Каждая молекула в структуре льда имеет две водородные связи также имеющих связь с двумя другими. Эта связь такова, что две другие молекулы образуют с данной молекулой еще по одной связи. По этой причине молекула воды связана четырьмя связями с ближайшими молекулами. Таким образом, по численности количество молекул в два раза меньше количества связей. Кинетику изотермического процесса описывают с помощью топохимических моделей Колмогорова-Ерофеева, Гарнера-Проута-Томпкинса, Рогинского-Шульца и Литвиненко И.В. [62], которые также использовали для обработки результатов изотермического ТГА.

В 80-е годы XIX века вышел в свет «Очерки по химической динамике» Вант-Гоффа и статья Аррениуса, где освещена зависимость скорости инверсии водного раствора тростникового сахара от температуры в виде экспоненты [3, 7, 16, 23, 61, 79-81, 88-90].

В последние годы применение ЭВМ в научно-технических расчетах привело к необходимости в данных о теплофизических свойствах воды и водяного пара. Наиболее удобным решением оказалось получение соответствующих уравнений состояния [7].

В справочнике [119] представлены обобщенные формулы для численного способа определения теплопроводности воды при $T = (273 \div 473)$ К и $P_s - 1000$ МПа; динамической вязкости воды при $T = (333 \div 473)$ К и $P_s - 500$ МПа; теплопроводности водно-солевых растворов при $T = (293 \div 473)$ К и $P_s - 100$ МПа; динамической вязкости водно-солевых растворов при $T = (333 \div 473)$ К и $P_s - 100$ МПа. В настоящем справочнике приведены экспериментальные данные теплопроводности воды при T - до 473 К и P - более 100 МПа, а также и водно-солевых систем вблизи линии насыщения и при высоких температурах давлениях и концентрации, полученных в разное время различными авторами. Кроме того, в справочнике представлены данные динамической вязкости при повышенных параметрах состояния.

Заключение к первой главе

В данной главе представлены литературный обзор по теплофизическим и термодинамическим свойствам воды и продуктов пива, а также их физико-химические свойства, которые способствуют адекватной оценке действующему состоянию и степени изученности данных веществ, согласно которым была раскрыта и показана актуальность настоящей работы.

Глава 2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РАСТВОРОВ И КИНЕТИКИ ИХ ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ

2.1. Экспериментальные установки для определения теплофизических свойств исследуемых объектов. Измеритель теплоемкости типа ИТ-С- 400

Назначением данного прибора, т.е. ИТ-с-400, является измерение удельной теплоемкости веществ в температурной зависимости, таких как твердые, сыпучие, порошкообразные, жидкие, волокнистые и др. [76,79].

Идея базируется на сравнении анализа динамического *c*-калориметра с другими ее составными частями (тепломером и адиабатической оболочкой. В ампулу, условно обозначенную цифрой 2, помещается образец, также условно обозначенный цифрой 1. Ампула накрывается крышкой и затем верхней частью устройства. От основания через тепломер 3 к ним подводится тепло в монотонном режиме [75, 76, 79, 90]. Скорость их нагрева зависит от скорости изменения напряжения, которое можно фиксировать по шкале прибора.

Измерительная ячейка включает корпус, оболочку 8 разъемную теплоизолированную, металлическое ядро с элементами 1,2,4,10,11. Тепловой поток Q_m , поступающий на образец определяется [75, 76]:

$$Q_m = Q_0 + Q_a, \quad (2.1)$$

где, Q_0 – тепловой поток, направленный на образец, Вт; Q_a –тепловой поток, затрачиваемый на нагрев ампулы, Вт.

Q_0 рассчитывается как:

$$Q_0 = c \cdot m_{об} \cdot v, \quad (2.2)$$

где: c – удельная теплоемкость образца в Дж/(кг·К); $m_{об}$ – масса образца в кг и v – скорость нагрева в К/с.

Q_a рассчитывается как:

$$Q_a = C_a \cdot \vartheta, \quad (2.3)$$

где: C_a – полная теплоемкость ампулы в Дж/К.

Зная разность температуры на тепломере \mathcal{G}_δ тепловой поток, проходящий через него можно рассчитать, если знать теплопроводную способность тепломера K_m :

$$Q_m = K_m \cdot \mathcal{G}_m \quad (2.4)$$

Параметр $K_m = K_m(t)$ является постоянным коэффициентом прибора.

Теплоемкость рассчитывают так [64, 75-77]:

$$C = \frac{1}{m_{об}} \cdot \left(\frac{K_m \cdot \mathcal{G}_m}{\vartheta} - C_a \right), \quad (2.5)$$

где: C – удельная теплоемкость образца в Дж/(кг·К)

Если температура тепломера мало изменяется, то в этом случае приходится определять еще и время запаздывания температуры на нем следующим образом:

$$\tau_m = \frac{\mathcal{G}_m}{\vartheta}, \text{ сек} \quad (2.6)$$

Учитывая изложенное, (2.5) приобретает следующий вид:

$$C = \frac{K_m}{m_{об}} (\bar{\tau}_{об} - \bar{\tau}_{амн}), \quad (2.7)$$

где: $\bar{\tau}_{об} = \frac{\sum_{i=1}^n \tau_{об_i}}{n}$, сек – среднее время запаздывания температуры на тепломере,

получаемое за несколько опытов с образцом, а $\bar{\tau}_{амн} = \frac{\sum_{i=1}^n \tau_{амн_i}}{n}$, сек – то же, но полученное в опытах без образца с пустой ампулой; n – количество опытов;

Тогда тепловая проводимость тепломера K_m будет равна:

$$K_m = \frac{C_{обр}}{\tau_{тр.м} - \tau_{амн}}, \quad (2.8)$$

где: $C_{обр.м}$ – полная теплоемкость трансформаторного масла в Дж/К;

$\bar{\tau}_{тр.м}$ – среднее значение времени запаздывания температуры на тепломере нескольких замеров, сек. (формула 2.9);

$$\bar{\tau}_{тр.м} = \frac{\sum_{i=1}^n \tau_{тр.м_i}}{n}, \quad (2.9)$$

где: $\tau_{тр.м_i}$ – время запаздывания температуры на тепломере в опытах с трансформаторным маслом в, с; n – количество экспериментов ($n = 5$). Опыты без образца проводятся в том же порядке, что и с образцом (формула 2.10).

$$\bar{\tau}_{амп} = \frac{\sum_{i=1}^n \tau_{амп_i}}{n}, \text{ сек} \quad (2.10)$$

где: $\tau_{амп_i}$ – экспериментально полученное значение времени запаздывания температуры на тепломере в опытах без образца. Так, полную теплоемкость материала устанавливают:

$$C_{обр} = C_{тр.м} \cdot m, \quad (2.11)$$

где: $C_{тр.м}$ – удельная теплоемкость исследуемого образца в температурной зависимости, Дж/(кг·К) и m – его масса, 10^{-3} кг.

2.1.1. Экспериментальная установка для определения теплоемкости растворов при различных температурах и давлениях

Теплоемкость жидкостей нами исследована устройством, основополагающей которого является монотонный разогрев образца, позволяющее провести соответствующие измерения при $T = 273 \div 473$ К и разных давлениях (рисунок 2.1). В комплект его основных элементов входят: калориметр (1), графопостроитель (2), сосуд с тающим льдом (3) и электроизмерительные приборы (9) – (11). Калориметр выполнен в виде цилиндра, с наружной стороны которого намотан нагреватель (4), внутри которого установлено промежуточное ядро, изготовленное в виде цилиндрического радиатора (5), обладающего большой теплопроводной способностью. Исследуемое вещество заливается в пазы ядра, по оси которого устанавливается термопара (6). Проводится изоляция ка-

лориметра с наружной стороны и только после этого размещается в медный цилиндр (7), температура которого регулируется на уровне температуры тающего льда. Устройство имеет систему измерения и изменения давления опыта.

Ко дну металлического цилиндра сварена металлическая трубка. Материал трубки нержавеющая сталь, имеющая соединение с грузопоршневым манометром при помощи пережимного сосуда повышенного давления (12) – (17). Промежуточное ядро (5) препятствует теплопроводности жидкости, что способствует относительной точности опытов при настоящем режиме.

Опыт выполняется таким образом: В калориметр заливают опытное вещество (8), после чего медный цилиндр вместе с калориметром устанавливается в водоледную смесь (3), в которой выдерживается до момента достижения системой термодинамического равновесия. После приобретения термодинамического равновесия, включается нагреватель (4) и графопостроитель Н-306 (2). Графопостроитель в ходе эксперимента вычерчивает зависимость изменения температуры калориметра (ось y) от времени проведения опыта (ось x) с учетом того, что нагреватель работает с постоянной мощностью [44-49, 51, 90, 137].

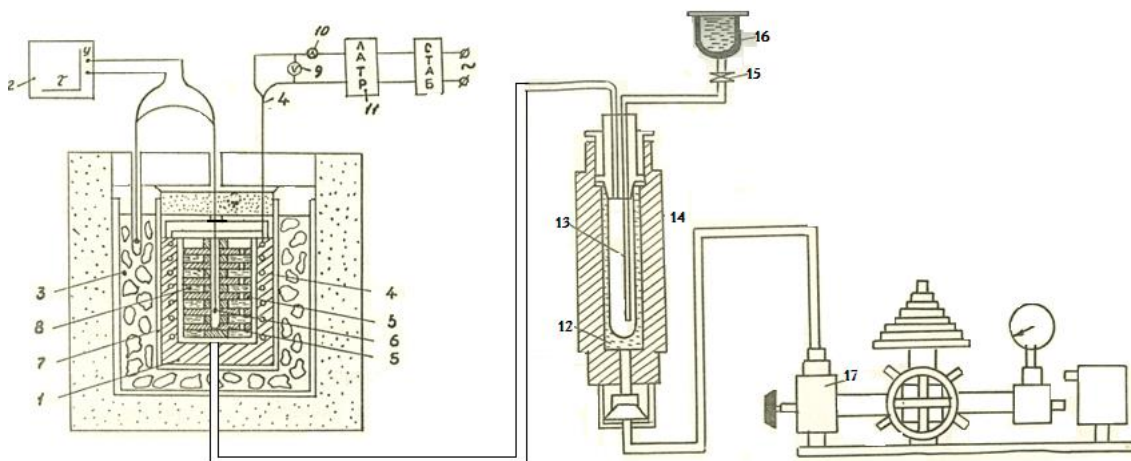


Рисунок 2.1. Схема экспериментальной установки для измерения удельной теплоемкости жидкостей и растворов в зависимости от температуры и давления: 1-калориметр, 2-графопостроитель, 3-водоледная смесь, 4-нагреватель, 5-радиатор, 6-дифференциальная термопара, 7-медный цилиндр, 8-калориметр для исследуемой жидкости, 9-11-электроизмерительные приборы, 12-глицерин, 13-полиэтиленовый мешочек, 14-пережимной сосуд, 15-вентиль, 16-металлический стакан, 17-грузопоршневой манометр

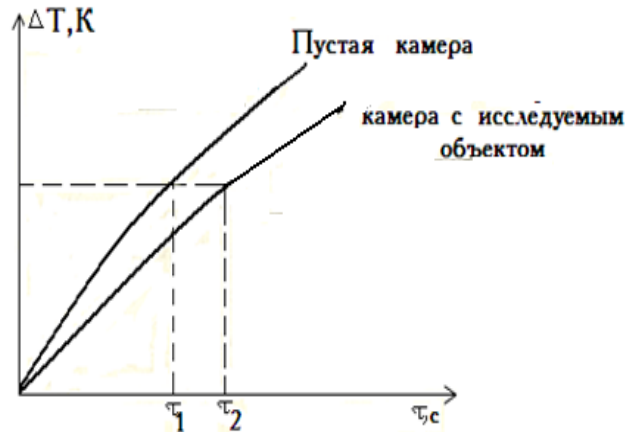


Рисунок 2.2. Зависимость повышения температуры, измерительной ячейки ΔT от времени τ .

2.1.2. Определение удельной теплоемкости и некоторых термодинамических характеристик исследуемых образцов по экспериментальным данным

Таким образом, полученные в ходе экспериментов данные используются для расчета удельной теплоемкости исследуемых веществ следующим образом [90]:

$$C_p = \frac{\tau_x (m_1 C_1 + B + K \tau_{2cp}) - \tau_1 (B + K \tau_{1cp})}{\tau_1 m_x}, \quad (2.12)$$

где: m_x - масса опытного вещества (жидкости); m_1 - масса эталонной жидкости; $\tau_{cp} = \frac{\tau_1 + \tau_2}{2}$; τ_1 - время нагрева эталонной жидкости; τ_2 - время нагрева исследуемой жидкости; $B = 40,93$ и $K = 0,04$ постоянные прибора, которые получают из исследования теплопроводности эталонной жидкости с обеспечением постоянства мощности нагревателя.

Поскольку в расчетную формулу введены постоянные измерительной ячейки, появилась возможность исключить потери тепловых потоков. С целью установления достоверности и работоспособности устройства с помощью эталонных образцов (вода, н-гексан, толуол и др.) были проведены тестовые измерения.

2.1.3. Экспериментальная установка для комплексного определения теплофизических свойств при различных температурах и давлениях (Малый патент Республики Таджикистан №ТJ 100, 2007, 5с)

Измерение теплофизических свойств (теплопроводность, теплоемкость и температуропроводность) требует применения отдельных устройств. Теплопроводность чаще всего измеряется при помощи цилиндрического бикалориметра, основанного на принципе регулярного теплового режима (первый род). При высоких параметрах состояния теплопроводность образцов была исследована с помощью цилиндрического *a*-калориметра, также основанной на принципе регулярного теплового режима.

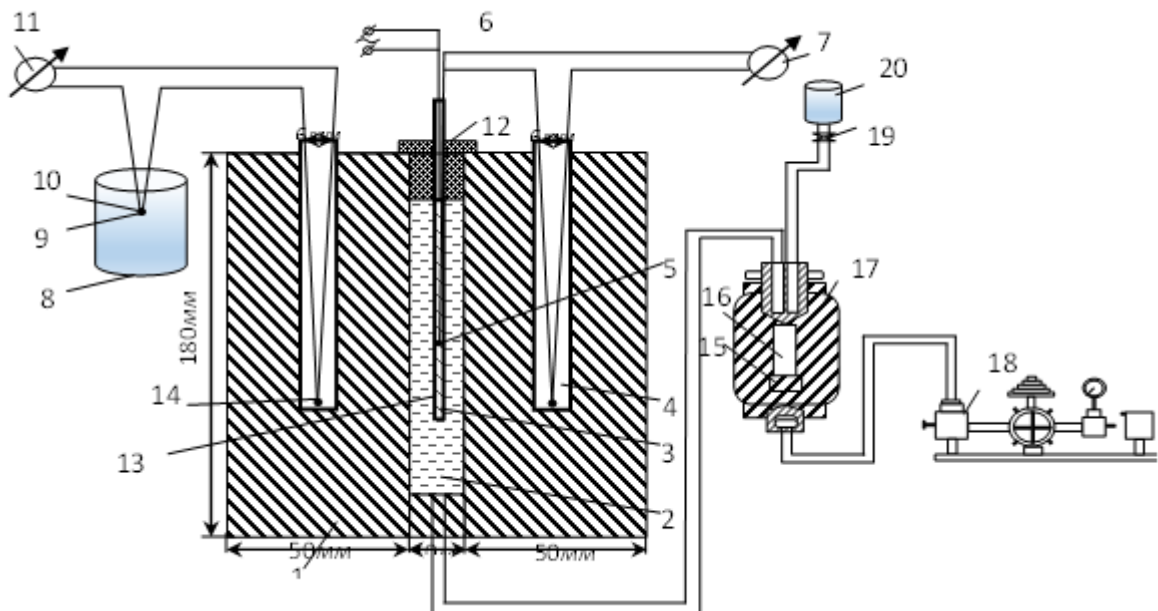


Рисунок 2.3. Схема установки для комплексного определения теплофизических свойств растворов: 1-*a*-калориметр, 2-измерительный цилиндр, 3-тонкостенная металлическая трубка, 4, 14-дифференциальная термопара, 5-горячий спай термопары, 6, 13-маломощный нагреватель, 7, 11-гальванометр, 8-сосуд Дьюара, 9-водоледная смесь, 10-холодный спай термопары, 12-металлическая пробка, 15-глицерин, 16-полиэтиленовый мешочек, 17-пережимной сосуд, 18-грузопоршневый манометр, 19-вентиль, 20-металлический стакан для заполнения исследуемых объектов.

Главными элементами, из которых состоит установка, являются (рисунок 2.3): бикалориметр, пережимной сосуд высокого давления (17), грузопоршневой манометр МП-2500 (18) и электроизмерительные приборы. Для

учета температурных изменений применена термопара (хромель-алюмель ($\varnothing=0,15$ мм)) с потенциометром (Р 37-1 классом точности 0,001). Для создания необходимой разности для размещения холодного спая термопары был применен сосуд Дьюара со льдом. Изменение температуры опыта также измерялась хромель-алюмелевой термопарой (не более 0,02 К) и гальванометром марки М 17/4.

Для измерения разности температуры на границах слоя изучаемого вещества тоже использовалась хромель-алюмелевая термопара концами соединенной к гальванометру марки М 17/2. Для этого ее горячий спай помещают в измерительный цилиндр (2), а холодный – в наружный цилиндр (4, 14). Внутренний нагреватель из нихрома ($\varnothing=0,15$ мм), служащий для создания разности температур (1,31-0,65К) и горячий спай термопары изолированы от исследуемой среды стеклотканью с клеевой пропиткой (клей БФ-2), при этом они находились при атмосферном давлении. Питание нагревателя обеспечивается от электросети понижающим трансформатором.

Погрешность измерения теплопроводности составила: относительная при $\alpha = 0,95 - 1,9\%$, методическая – 0,2%, инструментальная – 1,1%, общая относительная – до 3,2%.

2.1.4. Измеритель теплопроводности типа ИТ- λ -400

Назначением данного устройства, является измерение теплопроводности твердых тел, поддающихся механической обработке. Устройство позволяет задавать необходимую температуру опыта в диапазоне от температуры жидкого азота до 400⁰ С путем монотонного разогрева.

Монотонный тепловой режим заключается в решении нелинейного уравнения теплопроводности и представляет собой режим, в котором производится постепенный нагрев либо охлаждение испытуемого материала при указанном выше диапазоне температур при том, что переменное поле скоростей внутри образца практически незначительно [75, 76, 79]. Данный способ широко применяется для измерения таких физических величин как

теплопроводность, теплоемкость и температуропроводность жидкостей, растворов, твердых и сыпучих материалов и т. д. [62, 64, 79, 86, 87, 117, 118, 137].

Элементы устройства после включения нагревателя (образец 4 и медную ячейку, пластину контактную 3, стержень 5) начинают постепенно нагреваться до заданной температуры, для чего к ним подводится тепловой поток $Q(\tau)$. Медь, из которой выполнены основные элементы устройства, способствует избежать большие температурные перепады на них.

Тепловой поток $Q_m(\tau)$, который подается от нагревателя к основанию, после частичного поглощения пластиной 2 последовательно нагревает пластину 3 и затем подводится к ячейке с образцом исследования. Необходимо размеры ячейки подобрать так, чтобы теплоаккумулирующая способность стержня превышала эту способность ячейки вместе с образцом в 5–10 раз.

Благодаря этому температурные поля данных элементов устройства становятся близкими к линейному стационарному и их скорость нагрева происходит с незначительной разностью. Величины $Q_o(\tau)$ и $Q_m(\tau)$ при любой температуре можно вычислить [79, 86, 87, 117, 118, 137]:

$$Q_o(\tau) = \frac{\Delta T_o S}{P} = \left(\frac{1}{2} C_o + C_c \right) \cdot v_o, \quad (2.13)$$

где: $Q_o(\tau)$ – тепловой поток, поглощенный стержнем, Вт; ΔT_o – разность температуры в образце, К; P – тепловое сопротивление стержня с контактной пластиной, $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$; C_o – общая теплоемкость образца, Дж/К; C_c – общая теплоемкость стержня, Дж/К; v_o – скорость нагрева ячейки, К/с и S – площадь ее поперечного сечения, м^2 [79, 86, 87, 117, 118, 137]:

$$Q_T(\tau) = K_m^* \cdot v_T = \left(\frac{1}{2} C_T + C_n + C_o + C_c \right) \cdot v_o, \quad (2.14)$$

где: $Q_T(\tau)$ – тепловой поток, прошедший через пластину 2, Вт и K_m^* – коэффициент пропорциональности, характеризующий эффективную теплопроводность этой пластины, $\text{Вт}/\text{К}$;

Тепловое сопротивление определяется [75, 76, 79, 118]:

$$P = P_o + P_K, \quad (2.15)$$

где: P_o – тепловое сопротивление образца, $(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$; P_K – поправка на тепловое сопротивление контакта, возникающее в следствие неидентичности контакта установленных термопар, $(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$.

P_o рассчитывают следующим образом [79, 86, 87, 117, 118, 137]:

$$P_o = \frac{h}{\lambda}, \quad (2.16)$$

где: h – высота образца (высота ячейки), м, а λ – его теплопроводность, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; v_T – перепад температуры на пластине (2), К; C_T – общая теплоемкость пластины (2), Дж/К; C_n – общая теплоемкость пластины контактной (3), Дж/К.

Учитывая (2.16) – (2.19) тепловое сопротивление образца рассчитывают с помощью:

$$P_o = \frac{\Delta T_o S (1 + \sigma_c)}{\Delta T_t \cdot K_m} - P_K, \quad (2.17)$$

где: σ_c – поправка на теплоемкость медной ячейки вместе с образцом, определяемая в виде:

$$\sigma_c = \frac{C_o}{2(C_o + C_c)}, \quad (2.18)$$

где: C_o – общая теплоемкость образца, Дж/К; C_c – общая теплоемкость стержня, Дж/К [13, 16, 18, 20, 78].

$$C_o = C_o(t) \cdot m_o, \quad (2.19)$$

где: $C_o(t)$ – удельная теплоемкость ячейки вместе с образцом, Дж/(кг·К); m_o – масса исследуемого объекта, кг.

$$C_c = C_M(t) \cdot m_c, \quad (2.20)$$

где: $C_M(t)$ – удельная теплоемкость меди, Дж/(кг·К); m_c – масса стержня, кг.

Влияние величины σ_c является незначительным, порядка 5 – 10%, поэтому в расчетах его зачастую принимают ориентировочно.

Теплопроводность пластины соответствует:

$$K_m = K_m^* \frac{C_c}{\frac{1}{2} C_T + C_n + C_c}. \quad (2.21)$$

Применив (2.16) получим [75, 76, 79]:

$$\lambda = \frac{h}{P_o}, \text{ Вт/(м·К)} \quad (2.22)$$

Теплопроводность образца при расчетах соответствует усредненной температуре, определяемой как:

$$\bar{t} = t_c + 0,5A_t \cdot n_o, \quad (2.23)$$

где, \bar{t} – средняя температура образца, °С; t_c – температура опыта, °С; A_t – чувствительность термопары хромель – алюмель, °С/мВ; n_o – перепад температуры на образце, мВ.

Величины K_T и P_K являются градуировочными и приняты в качестве постоянных величин прибора.

Измерение теплопроводности осуществляется путем организации градиента температуры (n_o и n_T), возникающего между образцом ΔT_o и теплотометром ΔT_t , мВ [75, 76, 79].

2.1.5. Экспериментальная установка для измерения коэффициента температуропроводности жидкостей при различных температурах и давлениях

Для исследования температуропроводности пивного сусла за основу нами был принят регулярный тепловой режим с изменением давления и температуры опыта [137-140], для чего в использованное устройство в силу специфических характеристик сусла, были введены некоторые изменения. Был заменен грузопоршневой манометр МП-2500 на МП-10, а сам α -калориметр и другие контактирующие с веществом детали изготовлены из химически нейтрального материала марки НС-3.

Устройство (рисунок 2.4) состоит из цилиндрического и внешнего сосудов (1) и (3) соответственно. Сосуд выполняет роль термостата, который заполнен термостатирующей жидкостью (9), в которую непосредственно размещали α -калориметр с пивным суслом (13). Сосуды отделены посред-

ством изолятора (2). Термостат также оснащен нагревательным элементом (6), змеевиком (5), термометром (10), шнековой мешалкой (11). Для слива термостатирующей жидкости в устройстве предусмотрен ventиль (8), для защиты от перегрева предусмотрено термореле (7). Применение мешалки в устройстве позволяет равномерно распределить температуру во всем объеме термостатирующей жидкости. Для приведения ее в действие она оснащена электродвигателем (12), питающегося от электросети (4). Контактным термометром (14) производится контроль над температурой опыта. Давление опыта регулируется и контролируется грузопоршневым манометром (21) и пережимным сосудом высокого давления (18), имеющие трубчатое соединение (17) с *a*-калориметром.

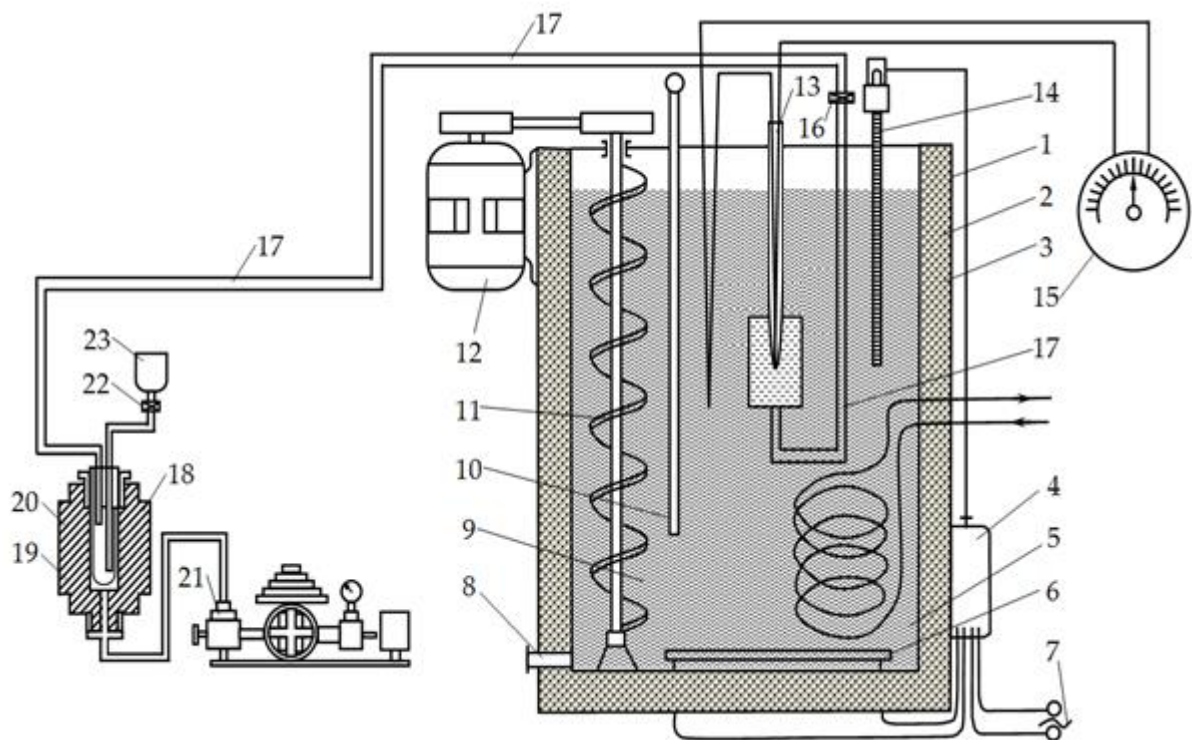


Рисунок 2.4. Схема установки для определения коэффициента температуропроводности при различных температурах и давлениях: 1–цилиндрический сосуд; 2–изоляция; 3–внешний сосуд; 4–электрическая сеть; 5–змеевик для охлаждения; 6–нагреватель; 7–термореле; 9–термостатирующая жидкость; 10–термометр; 11–шнековая мешалка; 12–электродвигатель; 13–*a*-калориметр; 14–контактный термометр; 15–гальванометр; 8, 16, 22–вентили; 17–трубка из химически нейтрального материала; 18,19–пережимной сосуд; 20–полиэтиленовый мешочек; 21–грузопоршневой манометр МП-10; 23–стакан из химически нейтрального стекла марки НС-3 для заполнения исследуемого объекта.

Время опыта отслеживается секундомером. В a -калориметре также установлен горячий спай термопары (хромель-алюмель), которая соединена с гальванометром (15). Холодный спай этой термопары устанавливается в термостатирующей жидкости прибора.

Опыт выполняется так:

a -калориметр соединен со стаканом (23), с помощью которого непосредственно он заполняется образцом. Сперва при закрытых вентилях (15) и (22) необходимо наполнить стакан, затем, чтобы заполнить a -калориметр их открывают и после того, как образец перетекает из стакана в a -калориметр их вновь перекрывают. Перед началом эксперимента устройство предварительно нагревают, чтобы достичь стационарное тепловое состояние. Затем с помощью вышеназванных приборов в системе создается требуемое давление и разогретый до температуры опыта a -калориметр вместе с образцом и термопарой размещают в термостате. После этого до достижения системой регулярности производится измерение температуры. Если тело достигает температурного равновесия в среде с постоянной температурой с превосходящей теплоотдачей, то для периода регулярного режима график охлаждения тела (в полулогарифмических координатах: $\ln(\Delta T) = f(\Delta \tau)$) представляет собой прямую, применив которую можно найти показатель (темп) охлаждения m по соотношению [141]:

$$m = \frac{\ln \theta_2 - \ln \theta_1}{\tau_2 - \tau_1} \quad (2.24)$$

где, θ_1 и θ_2 – температурный перепад между жидкостью термостата и изучаемым веществом; при времени от τ_1 до τ_2 .

Исходная версия установки принадлежит Калорову К.М. (рисунок 2.4) который применил ее для измерения температуропроводности пищевых продуктов с возможностью изменения лишь температуры опыта [142]. Предложенный же нами вариант установки позволяет изменять и давление опыта. Для создания подобных условий мы воспользовались добавлением дополни-

тельных устройств, т. е. мы снабдили устройство еще и грузопоршневым манометром и пережимным сосудом высокого давления.

Так, методом двух точек температуропроводность рассчитывается следующим образом [137-140]:

$$a = \Phi m \quad (2.25)$$

где, m – темп охлаждения, $1/c$ – определяется аналогично теплопроводности; Φ – величина, с помощью которой выполняют учет размера и формы a -калориметра [137-140].

$$\Phi = \frac{1}{\left(\frac{2,405}{R}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{l}\right)^2} = 0,21 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 \quad (2.26)$$

где: R и l – соответственно радиус цилиндра и его высота.

Регулярный тепловой режим удобен тем, что позволяет относительно точно установить связь темпа нагрева (охлаждения) изучаемого вещества от его физико-химических свойств, геометрических форм и условий, в которых наблюдается теплообмен с окружающей средой [137].

Преимущества метода:

- 1) не требуется применение эталонов;
- 2) относительно точные показания;
- 3) значительно сокращенное время выполнения опыта и простота расчетного выражения.

Недостатки метода:

- 1) возможно измерение только жидких веществ;
- 2) теория справедлива только при условии неизменности температуры окружающей среды t_c ;
- 3) для исключения смачивания образца требуется герметично закрытый стакан;
- 4) требуется создать большой коэффициент теплоотдачи.

2.2. Определение погрешности измерения теплофизических свойств веществ

Методика расчета погрешностей, допущенных в опытах, подробно описана в [24, 26-29, 36, 52, 57, 71, 82, 90, 97-100, 105, 137-139], которую мы также использовали и в своих расчетах при исследовании теплопроводности и теплоёмкости пивного сусла.

Среднее арифметическое значение y определяется по итогам нескольких экспериментов и рассчитывается как:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i, \quad (2.27)$$

где: n – общее число выполненных опытов; y_i – результат i -го по численности опыта.

Далее необходимо рассчитать абсолютную S и относительную $S_{\text{отн}}$ величины для любой из среднеквадратичной погрешностей

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (2.28)$$

$$S_{\text{отн}} = \frac{S}{\bar{y}} \cdot 100\% \quad (2.29)$$

Абсолютная $S_{\bar{y}}$ и относительная $S_{\bar{y}_{\text{отн}}}$ для среднеквадратичных погрешностей ряда экспериментов:

$$S_{\bar{y}} = \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (2.30)$$

$$S_{\bar{y}_{\text{отн}}} = \frac{S}{\bar{y}} 100\% \quad (2.31)$$

Тогда случайная погрешность:

$$\Delta_{\text{сл}} = S_{\bar{y}} \cdot t_{n-1, 1-\varepsilon/\alpha} \quad (2.32)$$

а систематическая:

$$\theta = \kappa \sqrt{\sum_{i=1}^m \theta_j^2}, \quad (2.33)$$

где: k –коэффициент, зависящий от $\alpha = 0,95$ численно равный 1,1: θ_j - граница i -й соответствующей погрешности.

Доверительная погрешность соответственно:

$$\Delta = t_{\Sigma} \cdot S_{\Sigma} \quad (2.34)$$

Среднеквадратичная погрешность с учетом случайной и неисключенной:

$$S_{\Sigma} = \sqrt{S_y^2 + S_v^2} \quad (2.35)$$

где: $S_v^2 = \frac{1}{3} \sum \theta_j^2$ - среднеквадратичная погрешность, определяемая как результат отношения t_{Σ} рассчитывают:

$$t_{\Sigma} = \frac{\theta + S_{\bar{y}} \cdot t_x}{S_v + S_{\bar{y}}}, \quad (2.36)$$

где: t_x коэффициент Стьюдента, зависящий от α .

При косвенных измерениях тоже допускаются погрешности, и как $y = F(y_1, y_2, \dots, y_n)$ при $\alpha = 0,95$ их определяют:

$$\Delta y = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial y_1}\right)^2 (\Delta y_1)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial y_2}\right)^2 (\Delta y_2)^2 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial y_n}\right)^2 (\Delta y_n)^2}, \quad (2.37)$$

где: $\Delta y_1, \Delta y_2, \dots, \Delta y_n$ - доверительная границы погрешности измерения величин y_1, y_2, \dots, y_n .

Отсюда, формула для расчета относительной погрешности приобретает следующий вид:

$$\sigma = \frac{\Delta y}{\bar{y}} 100\%, \quad (2.38)$$

По выше представленной аналогии нами выполнен соответствующий расчет погрешности по измерению теплоемкости и теплопроводности опытных образцов:

$$\Delta C_p = \sqrt{\left(\frac{\partial C_p}{\partial Q}\right)^2 (\Delta Q)^2 + \left(\frac{\partial C_p}{\partial h}\right)^2 (\Delta h)^2 + \left(\frac{\partial C_p}{\partial \rho}\right)^2 (\Delta \rho)^2 + \left(\frac{\partial C_p}{\partial T_m}\right)^2 (\Delta T_m)^2} \quad (2.39)$$

$$\Delta \lambda = \sqrt{\left(\frac{\partial \lambda}{\partial h}\right)^2 (\Delta h)^2 + \left(\frac{\partial \lambda}{\partial P_0}\right)^2 (\Delta P_0)^2}, \quad (2.40)$$

где согласно с (2.39) и (2.40):

-для λ :

$$\frac{\partial \lambda}{\partial h} = \frac{1}{P_0}$$

$$\frac{\partial \lambda}{\partial P_0} = -\frac{h}{P_0^2}$$

-для C_p :

$$\frac{\partial C_p}{\partial K_T} = \frac{\tau_2 - \tau_1}{m}$$

$$\frac{\partial C_p}{\partial m} = -\frac{K_T}{m} (\tau_2 - \tau_1)$$

$$\frac{\partial C_p}{\partial \tau_1} = \frac{K_T \tau_2}{m}$$

С помощью (2.39) и (2.40) нами произведен расчет относительной погрешности измерения C_p и λ при $a = 0,95$.

Методическая погрешность рассчитана в соответствии с рекомендациями [27, 29, 90, 137-140], а инструментальная при измерении ЭДС термопары согласно таблицам 2.5 и 2.6. Расчетами было установлено, что погрешность измерения теплопроводности составила до 3,8 %, теплоёмкости до 4,2 %, а температуропроводности до 2,94 %.

Таблица 2.5. - Исходные данные для количественной оценки доверительной границы погрешности измерения теплопроводности и теплоёмкости

№	Наименование	Величина
1	Высота образца h, м	$(5-5,01) \cdot 10^{-3}$
2	Погрешность определения высоты образца Δh , м	$5 \cdot 10^{-5}$
3	Время нагрева исследуемых веществ t, мин.	15
4	Погрешность измерения времени нагрева t, сек.	0,0001
5	Количество теплоты подаваемое нагревателем Q, Дж/м ²	$10^4 \div 10^6$
6	Погрешность определения количества теплоты ΔQ , Дж/м ²	10
7	Плотность контрольного образца (медь) ρ , кг / м ³	9500
8	Погрешность измерения плотности контрольного образца $\Delta \rho$, кг / м ³	9,5
9	Измерение температуры опыта T, К	$293 \div 673$
10	Погрешность определения температуры опыта ΔT , К	0,01
11	Доверительная граница погрешности измерений теплопроводности в относительной форме при $\alpha=0,95$, %	2,4
12	Доверительная граница погрешности измерений теплоемкости в относительной форме при $\alpha=0,95$, %	2,8
13	Методическая погрешность для теплопроводности, %	0,44
14	Методическая погрешность для теплоемкости, %	1,14
15	Инструментальная погрешность, %	0,36
16	Общая относительная погрешность измерения теплопроводности по методу монотонного разогрева, %	3,2
17	Общая относительная погрешность измерения теплоемкости по методу монотонного разогрева, %	4,3

$$\Delta a = \sqrt{\left(\frac{\partial a}{\partial m}\right)^2 (\Delta m)^2 + \left(\frac{\partial a}{\partial R}\right)^2 (\Delta R)^2 + \left(\frac{\partial a}{\partial l}\right)^2 (\Delta l)^2},$$

$$\sigma = \frac{\Delta \alpha}{\alpha} \cdot 100\% = 1,91\%$$

Таблица 2.6. - Исходные данные для количественной оценки доверительной границы погрешности результатов измерений температуропроводности по методу регулярного теплового режима первого рода:

№	Наименование	Величина
1.	Высота полости измерительной ячейки, l , м	$15 \cdot 10^{-2}$
2.	Погрешность измерения толщины измерительной ячейки (нутромером), Δl , м	$3 \cdot 10^{-5}$
3.	R - радиус цилиндра, м	$8,5 \cdot 10^{-2}$
4.	Погрешность измерения радиуса цилиндра (штангенциркулем), Δr , м.	0,01
5.	Доверительная граница погрешности измерений температуропроводности в относительной форме при $\alpha=0,95$, %	1,22
6.	Методическая погрешность, %	0,24
7.	Инструментальная погрешность, %	0,45
8.	Общая относительная погрешность измерения температуропроводности по методу монотонного разогрева, %	1,91

2.3. Расчет термодинамических свойств продуктов пива

2.3.1. Расчет энергии Гиббса

В основу положений Гиббса заложен принцип равновесия, который описывается ростом энтропии в изолированных системах. Суть принципа заключается в том, что при достижении системой максимума энтропии, она достигнет равновесия. Математически это условие можно выразить [67, 77, 78, 137-140]:

$$(\delta\eta)\varepsilon \leq 0, \quad (2.41)$$

где η - энтропия, ε - энергия.

2.3.2. Закон Гесса

Тепловым эффектом реакции принято считать энтальпию, которая представляет собой то количество тепла, при котором образуется 1 моль вещества, состоящего из нескольких простых. Закон Гесса представляет собой термохимический метод расчета энтальпии. Его применяют при отсутствии

возможности ее экспериментального изучения. Согласно предположениям Гесса энтальпия зависит от природы и физического состояния, входящих в реакцию веществ и конечного продукта. То есть энтальпия является функцией состояния системы и не зависит от пути прохождения реакции. В соответствии с данным законом сумма теплоты образования веществ после реакции соответствует ее тепловому эффекту за вычетом суммы теплоты образования исходных веществ.

2.3.3. Энтропия

Энтропия является логарифмической формой вероятности наличия веществ либо их состояний:

$$S = R \ln W, \quad (2.42)$$

где R – газовая постоянная; W – вероятность состояния.

Энтропия относится к категории термодинамических параметров, не имеющих возможность практического исследования. Поэтому энтропию определяют расчетно-теоретическим способом. С точки зрения кинетической теории газов энтропия считается мерой неупорядоченности системы, т.е. характеризуется любым движением частиц рассматриваемой системы (молекулы). Таким образом, можно утверждать о том, что ее возрастание напрямую зависит от того насколько они являются подвижными и зависит от любых, провоцирующих это движение, факторов (нагрев, плавление, испарение, разрыв связей между атомами, колебание кристаллической решетки и т.д.). И наоборот, обратные этим процессам (упрочнение связей, охлаждение, конденсация, кристаллизация, полимеризация) становятся следствием упорядочение системы, и как следствие уменьшения энтропии. Таким образом, энтропия тоже является функцией состояния системы и не характеризуется путями прохождения процессов. Эта величина пропорциональна величине массы вещества и относится к одному моль вещества, Дж/(моль·К). Стандартными ее значения приняты при температуре 25°C (298К) и давлении 1 атм.

Согласно третьему закону термодинамики при $T=0$ энтропия системы также будет стремиться к нулю. В реакции при $T=\text{const}$ и $P=\text{const}$ основополагающей движущей силой является энергия Гиббса (G) (изобарно – изотермический или изобарный потенциал), которую также принято называть свободной энтальпией. Возможность прохождения реакции описывается Энергией Гиббса, которая имеет следующий вид:

$$G = H - TS. \quad (2.43)$$

Это уравнение используют для определения направления химической реакции. В условиях, когда температура и давление являются постоянными, реакция будет протекать самопроизвольно с уменьшением энергии Гиббса. Если энергия Гиббса больше нуля, то согласно второму закону термодинамики самопроизвольность течения реакции невозможна.

Из уравнения $G = H - TS$ видно, что самопроизвольно химическая реакция проходит при соотношении энтальпии, и произведения температуры с энтропией. Если $H < 0$, $S > 0$, то энергия Гиббса приобретет отрицательное значение ($G < 0$), что способствует самопроизвольному прохождению реакции, невзирая на изменения температуры.

Если $H > 0$, $S < 0$, то всегда $G > 0$ и реакция соответственно невозможна при любых температурах. Если $H > 0$, $S > 0$, то реакция способна протекать при повышенных температурах. Если $H < 0$, $S < 0$, то реакция способна протекать лишь при низких температурах. Энергию Гиббса сложных веществ из простых выражают в кДж/моль. Энергия Гиббса также как и энтропия представляет собой функцию состояния системы, завися от природы веществ и начального и конечного состояний системы, а промежуточные стадии реакции не учитываются.

2.3.4. Энтальпия. Тепловой эффект реакции

Тепловой эффект реакции это теплота, которая либо поглощается либо отводится из системы в процессе химической реакции (эндотермическая, экзотермическая). А в связи с тем, что теплота не представляет функцию состо-

яния системы, т.е. изменение состояний системы напрямую зависит от промежуточных явлений, то тепловой эффект не способен характеризовать реакцию. Только в двух ситуациях бесконечно малое количество тепла (элементарная теплота) ΔQ способно совпадать с полным дифференциалом функции состояния: во-первых при постоянном объеме $\Delta Q = dU$ (U – внутренняя энергия системы), а во-вторых при постоянном $\Delta Q = dH$ (H – энтальпия системы).

Наибольший интерес в прикладном плане представляют два типа тепловых эффектов реакции: изотермо-изобарный (при $T = \text{const}$, $P = \text{const}$) и изотермо-изохорный (при $T = \text{const}$ и $V = \text{const}$). Существуют дифференциальный и интегральный тепловые эффекты реакции:

$$u_{T,V} = \left(\frac{\partial U}{\partial \xi}\right)_{T,V} = \sum_i \nu_i u_i,$$

$$h_{T,P} = \left(\frac{\partial H}{\partial \xi}\right)_{T,P} = \sum_i \nu_i h_i,$$

где u_i , h_i – соответственно парциальная внутренняя энергия и молярная энтальпия; ν_i – стехиометрический коэффициент ($\nu_i > 0$ для продуктов, $\nu_i < 0$ для реагентов); $\Delta = (n_i - n_{i0})/\nu_i$ – химическая переменная, которая для различных систем отличительна в зависимости от состава изучаемой системы в любом промежутке времени реакции (n_i и n_{i0} – числа молей i -го компонента во время изучения до химического превращения). Единицей измерения дифференциального теплового эффекта реакции принято считать кДж/моль. Если $u_{T,V}$, $h_{T,P} > 0$, в реакции наблюдается поглощение тепла (эндотермическая), при обратном знаке наблюдается тепловыделение (экзотермическая). Два типа эффектов связаны между собой:

$$h_{T,P} = u_{T,V} + \left[p + \left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_{T,\xi} \right] \left(\frac{\partial V}{\partial \xi}\right)_{T,P}$$

Для идеального газа $(\partial U / \partial V)_{T,\Delta} = 0$, а если учесть, что уравнение состояния $pV = RT$ то:

$$h_{T,P} = u_{T,V} + RT \sum_i \nu_i$$

где R – газовая постоянная.

Таким образом, с учетом того, что газо-фазная реакция сопровождается изменением числа молей и соответственно $h_{T,p}$, $u_{T,v}$, при изучении конденсированной фазы за счет малого значения производной $(\partial V/\partial V)_{T,p}$ разность $h_{T,p} - u_{T,v}$ также получается незначительной, что влечет за собой незначительные изменения, которыми можно пренебречь. На практике в большинстве случаев сталкиваются с тем, что $p = \text{const}$, т.е. с тепловым эффектом реакции изменяется и энтальпия системы. Тепловые эффекты $h_{T,p}$, $u_{T,v}$ главным образом зависят от состава системы, поскольку u_i , h_i изменяются с истечением реакции. Интегральный тепловой эффект реакции измеряется в кДж и рассчитывается соответственно следующим образом:

$$\Delta H_{T,p} = \int_0^1 \left(\frac{\partial H}{\partial \xi} \right)_{T,p} d\xi,$$

$$\Delta U_{T,v} = \int_0^1 \left(\frac{\partial U}{\partial \xi} \right)_{T,v} d\xi.$$

Если h_i согласно требованиям осуществления реакции не зависят от состава (реакции в неплотных газах, в разбавленных растворах), то дифференциальный и интегральный тепловые эффекты данной реакции численно будут совпадать друг с другом. И наоборот, отнесение измеренного теплового эффекта реакции $\Delta H_{T,p}$ к изменению количества молей реагента или продукта, ведет к достижению среднего показателя теплового эффекта реакции (кДж/моль).

Кирхгоф предложил уравнение, характеризующее температурную зависимость теплового эффекта реакции, для применения которого необходимо знать парциальную молярную теплоемкость компонентов реакции, зачастую являющиеся неизвестными.

Одной из самых главных задач термохимии принято считать исследование тепловых эффектов реакции, которое опирается на эксперимент, именуемый калориметрией. Благодаря развитию техники и технологии тепловой эффект реакции можно исследовать как в газовой, так в жидкой и твердой фазах, а также на границе раздела фаз, даже в сложных биосистемах. Знание

тепловых эффектов способствует определению тепловых балансов названных процессов. Так, например, в практической термодинамике этот показатель применяют для численного определения температурной зависимости постоянных равновесия, а также энтропийных эффектов. С применением тепловых эффектов реакций устанавливают такие показатели как энергия химических связей, вычисляют термодинамические функции организацию молекул и ионов в определенных состояниях. Эти эффекты также достаточно широко используют в корреляционных соотношениях.

2.4. Способ и устройства для исследования кинетики термического разложения смесей исследуемых объектов

Для установления термограммы (температуры разложения) мы воспользовались опытным устройством (рисунок 2.5), в который входят сосуд Дьюара (1), термометр (2), секундомер (3), аналитические весы (4), магнитная сажа (5), перекись водорода (6), ложка (8), вода (8) и чашка (9),

Опыт проводится следующим образом. В сосуд Дьюара наливают фиксированное количество жидкости – воды, антифриза (при $m = \text{constant}$), после чего вводится определенное количество по массе пероксида водорода, порошка, нанокompозита или сула. Наряду с тем в сосуд Дьюара устанавливается термометр или спай дифференциальной хромель - алюмелевой термопары. Согласно полученным результатам с помощью термометра или дифференциальной хромель - алюмелевой термопары и секундомера устанавливается временная зависимость разложения от температуры [39, 42, 50, 53] (рисунок 2.5).

Зависимость $\alpha = f(\tau)$ изложена в работах [3, 58, 87].

Кроме данных работ математическому описанию формы отдельных участков кинетических кривых, их физической интерпретации, возникновению (отсутствию) периодов индукции и ускорению посвящены множества работ [3, 62].

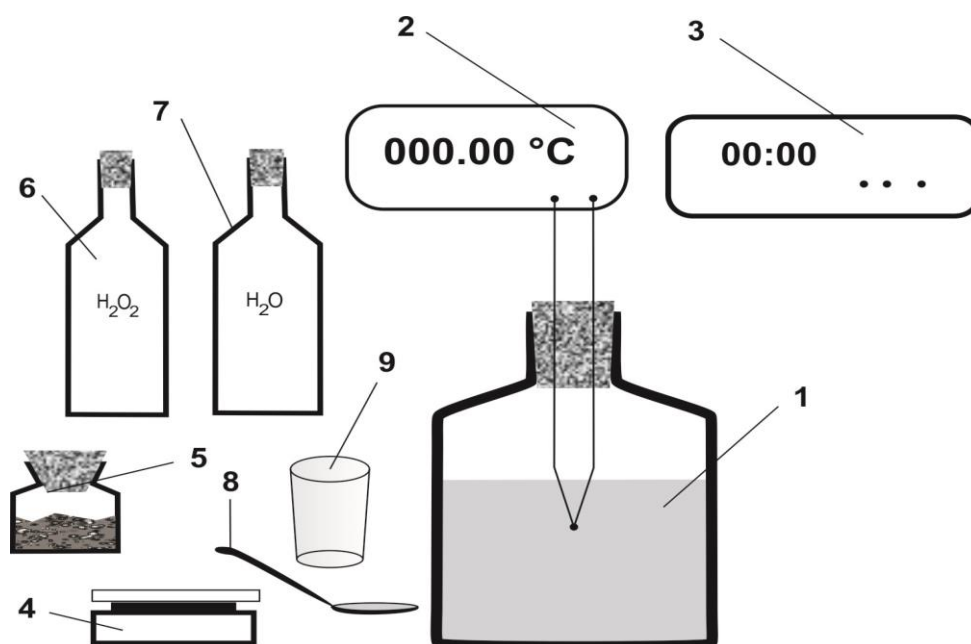


Рисунок 2.5. Экспериментальная установка для определения термограммы электролитов

Заключение ко второй главе

Настоящая глава посвящена описанию опытных установок, с помощью которых были произведены измерения теплоемкости, теплопроводности, температуропроводности растворов при комнатной температуре и при атмосферном давлении, а также при их значительном изменении. Приведены методики их измерения.

Подробно представлены результаты погрешности измерения теплофизических и термодинамических свойств продукты пива.

Приведены способ и устройства для исследования кинетики термического разложения смесей исследуемых объектов. Приведены экспериментальные значения физико-химических свойств продуктов пива (сусло + вода). На экспериментальной установке, разработанной профессором Платуновым Е.С. и его учениками, измерена удельная изобарная теплоёмкость, температуропроводность, теплопроводность, плотность и коэффициент поверхност-

ного натяжения продуктов пива в зависимости от давления с учетом поля аэрации и без него.

В связи с этим, актуальными становятся исследования свойств суспензии и воды, в частности, образование анизотропной структуры и связанные с этими процессами особенности физико-химических и термодинамических свойств таких систем. Подобные исследования могут быть полезны и при теоретическом описании жидких многофазных сред.

Глава 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ, ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ И КИНЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОДУКТОВ ПИВА

3.1. Исследование теплофизических свойств системы вода + сусло

3.1.1. Плотность, коэффициент поверхностного натяжения системы (вода + сусло) в зависимости от температуры при атмосферном давлении

Для правильной организации процесса теплопереноса необходимо выявить характер изменения теплофизических, термодинамических свойств теплоносителей. Физико-химические, термодинамические характеристики исследуемых продуктов пива являются функциями состояния, на величину которых влияют значительное количество факторов, например, их химический состав и структура.

Таблица 3.1. - Основные физические характеристики системы (вода+сусло)

Образец	n-показатель преломления света	$\rho \cdot 10^3, \text{кг/м}^3$	$\sigma \cdot 10^{-2}, \text{Н/м}$	$\Gamma \cdot 10^{-6}, \text{моль/см}^2$
100%H ₂ O	1,3325	1,000	7,30	-
90%H ₂ O+10%сусла	1,3335	1,010	7,28	0,79
80%H ₂ O+20%сусла	1,3345	1,015	6,89	1,70
70%H ₂ O+30%сусла	1,3360	1,020	6,55	2,66
60%H ₂ O+40%сусла	1,3380	1,025	6,36	3,43
50%H ₂ O+50%сусла	1,3410	1,028	6,30	3,95
40%H ₂ O+60%сусла	1,3420	1,033	6,23	4,65
30%H ₂ O+70%сусла	1,3435	1,036	6,02	5,35
20%H ₂ O+80%сусла	1,3450	1,040	5,80	5,91
10%H ₂ O+90%сусла	1,3460	1,044	5,62	6,43
100% сусла	1,3480	1,048	5,53	7,05

3.1.2. Исследование кинетики разложения в системах вода+сусло

Согласно методу, предложенному Аррениусом, кроме распространенного формально - кинетического описания процесса, зависящего от формы кривых разложения, также признания получили способы изучения механизмов разложения в элементарных процессах твердого вещества, которые в свою очередь зависят от перестройки кристаллической решетки. Основоположниками данных исследований являются Френкель, Вангер, Шоттки, в которых применяются закономерности физической химии твердого тела (теории переноса и разупорядоченности). Связь отмеченных теорий с реакционной способностью кристаллов привлекла внимание ряда научных коллективов [10-12, 17, 55, 66, 68, 72, 91, 98, 109, 115]. По их мнению, на тот момент (50-е и 60-е годы прошлого века) составляющие кристаллическую решетку частицы (ионы, протоны, электроны) при перемещении становятся причиной разрыва либо создания связей, что приводит к разложению реагирующего вещества. Поскольку дефекты различной природы оказывают значительное влияние на лимитирующую стадию реакции, соответственно и способы их изучения основываются на влиянии разупорядочивания решетки допированием, механической либо радиационной обработкой реагирующего вещества, которые влияют на его теплопроводность, температуропроводность, термодинамические свойства, а также и на скорость его разложения. Термическое разложение веществ как в твердом, так и в жидком состоянии представляет собой процесс, который закладывает основу подавляющего числа физических и химических явлений, происходящих в природе и промышленных технологиях. К числу их особенностей можно отнести стадии индукции, которые возникают на момент разложения веществ и приобретения ускорения на кинетических кривых $\alpha = f(\tau)$, а также его локализации на отдельных участках поверхности рассматриваемого реагента.

3.2. Модель теплового баланса

Коэффициент полезного действия теплообменных устройств в большей степени зависит от интенсивности теплоотдачи, которая зависит от физико-химических и термодинамических особенностей рабочего вещества. Теплоносители (жидкости) кроме высоких показателей теплофизических параметров (теплопроводность), способствующие интенсификации тепловых потоков в процессе теплоотдачи, под влиянием внешнего поля они еще способны изменять свои характеристики, что является не маловажным в процессах регулирования теплообмена. Водный раствор мелкодисперсного порошка (сухого вещества) способствует повышению эффективности теплообменников, однако существует обратная сторона, связанная с разложением сухих веществ под воздействием температуры, снижающее его тепловые свойства.

С целью определения основных параметров кинетики термического разложения водного раствора с добавлением и без добавления в него сухого вещества, был выполнен ряд экспериментальных исследований для установления основных показателей этих параметров, позволяющих установить эффективное время применения предложенной системы продуктов пива. Эксперименты были реализованы в сосуде Дьюара. Главным образом, была изучена временная зависимость динамики изменения температуры образца в сосуде (фиксировались термограммы процесса), а определение констант формальной кинетики была выполнена по уравнению теплового баланса [1-4, 8, 48].

В соответствии с законом Гесса тепловой эффект реакции (q_d , Дж/моль) зависит лишь от начального и конечного состояний, т.е. является функцией состояния системы и не зависит от пути ее прохождения. Полагается, что изучаемая система является коллоидным раствором воды и сухого вещества (мелкодисперсного нанопорошка) массой $m_{мп}$, обладающей текучей массой $m_{H_2O_2}$, текучей массой кислорода m_{O_2} , характеризующейся текучей массой m_{H_2O} . Удельные теплоемкости составных компонентов $c_{H_2O_2}$, c_{O_2} , c_{H_2O} и $c_{мп}$,

которые представляют собой функцию температуры. Выделяющееся тепло при разложении сухого вещества ($Q = -q_r \frac{dm_{\text{H}_2\text{O}_2}}{d\tau}$), расходуется на приращение внутренней энергии U , которая пропорционально изменяется ее теплоемкости и скорости производной температуры в объеме по времени [1-4, 8, 48]:

$$\frac{dU}{d\tau} = \left(c_{\text{H}_2\text{O}_2} m_{\text{H}_2\text{O}_2} + c_{\text{O}_2} m_{\text{O}_2} + c_{\text{H}_2\text{O}} m_{\text{H}_2\text{O}} + c_{\text{мп}} m_{\text{мп}} \right) \frac{dT}{d\tau}.$$

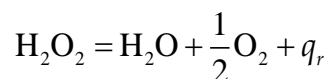
Отрицательный знак в соотношении для Q является свидетельством того, что в рассматриваемом объеме вещества осуществляется за счет уменьшения массы реагирующих веществ. Применение сосуда Дьюара в опытах позволяет полагать, что теплопотери в окружающую среду отсутствуют. При указанных условиях уравнение теплового баланса примет соответствующий вид [1-4, 8, 48]:

$$\left(c_{\text{H}_2\text{O}_2} m_{\text{H}_2\text{O}_2} + c_{\text{O}_2} m_{\text{O}_2} + c_{\text{H}_2\text{O}} m_{\text{H}_2\text{O}} + c_{\text{мп}} m_{\text{мп}} \right) \frac{dT}{d\tau} = -q_r \frac{dm_{\text{H}_2\text{O}_2}}{d\tau}. \quad (3.1)$$

Массу системы, считая постоянной получим:

$$m = m_{\text{H}_2\text{O}_2} + m_{\text{O}_2} + m_{\text{H}_2\text{O}} + m_{\text{мп}}.$$

Согласно реакции, описывающей разложение пероксида водорода, в качестве примера:



уравнение баланса массы формируется путем сложения массы отдельных компонентов [1-4, 8, 48]:

$$-\frac{dm_{\text{H}_2\text{O}_2}}{d\tau} = \frac{dm_{\text{H}_2\text{O}}}{d\tau} + \frac{dm_{\text{O}_2}}{d\tau}.$$

Согласно теории Аррениуса, скорость реакции разложения (убыли) под влиянием температуры для изучаемых образцов можно определить [1-4, 8, 48]:

$$\frac{dc}{d\tau} = -c^n A \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right), \quad (3.2)$$

где c – концентрация сухого вещества, $[c] = \frac{\text{кмоль}}{\text{м}^3}$; n – порядок реакции, E_a – энергия активации $[E_a] = \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль}}$; R – универсальная газовая постоянная $R = 8314 \frac{\text{Дж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}}$. Объем сосуда Дьюара V , а, следовательно, и рабочего тела представляются постоянными. Таким образом, скорость химической реакции в концентрационной зависимости массы сухого вещества можно записать [1-4, 8, 48]:

$$\frac{dc}{d\tau} = \frac{1}{V \cdot M_{\text{H}_2\text{O}_2}} \frac{dm_{\text{H}_2\text{O}_2}}{d\tau} \Rightarrow \frac{dm_{\text{H}_2\text{O}_2}}{d\tau} = V \cdot M_{\text{H}_2\text{O}_2} \frac{dc}{d\tau}. \quad (3.3)$$

Применив (3.1) с учетом (3.2) и (3.3) можно определить взаимосвязь изменения температуры в сосуде с кинетическими соотношениями скорости химической реакции [1-4, 8, 48]:

$$\frac{dT}{d\tau} = \frac{q_r (V \cdot M_{\text{H}_2\text{O}_2})^{1-n}}{c_{\text{H}_2\text{O}_2} m_{\text{H}_2\text{O}_2} + c_{\text{O}_2} m_{\text{O}_2} + c_{\text{H}_2\text{O}} m_{\text{H}_2\text{O}} + c_{\text{мп}} m_{\text{мп}}} m_{\text{H}_2\text{O}_2}^n A \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right). \quad (3.4)$$

Уравнение (3.4) зависит от текущих значений масс компонентов:

$$\begin{aligned} m_{\text{H}_2\text{O}_2} &= m_{\text{H}_2\text{O}_2} \Big|_{\tau=0} + \int_0^{\tau} \frac{dm_{\text{H}_2\text{O}_2}}{d\tau} d\tau \\ m_{\text{H}_2\text{O}} &= m_{\text{H}_2\text{O}} \Big|_{\tau=0} - \frac{M_{\text{H}_2\text{O}}}{M_{\text{H}_2\text{O}_2}} \int_0^{\tau} \frac{dm_{\text{H}_2\text{O}_2}}{d\tau} d\tau, \\ m_{\text{O}_2} &= -\frac{0,5M_{\text{O}_2}}{M_{\text{H}_2\text{O}_2}} \int_0^{\tau} \frac{dm_{\text{H}_2\text{O}_2}}{d\tau} d\tau \end{aligned} \quad (3.5)$$

где $M_{\text{H}_2\text{O}}$, $M_{\text{H}_2\text{O}_2}$ и M_{O_2} , соответственно, молекулярные массы воды, сухого вещества и кислорода.

Тепловой эффект реакции термического разложения по данным различных источников колеблется в достаточно широких пределах. Однако, большинство авторов склоняется к значению $q_r = 98 \frac{\text{МДж}}{\text{кмоль}}$. Это значение является ми-

нимальным из имеющихся в литературе и в наших оценках, что позволяет оценить верхний предел скорости реакции термического разложения.

Обработка результатов эксперимента, численное решение уравнения (3.4) и использование результатов решения уравнения (3.5) для определения констант формальной кинетики исследуемой реакции проводилась средствами MSEXEL 2010. В рамках этой программной среды результаты экспериментов сглаживались, для чего определялись линии тренда, полученные линии использовались для определения динамики изменения производных от температуры в сосуде Дьюара по времени, значения которых на выбранном временном интервале служили входными параметрами для регрессионного анализа, с помощью которого определялись искомые данные по константам формальной кинетики.

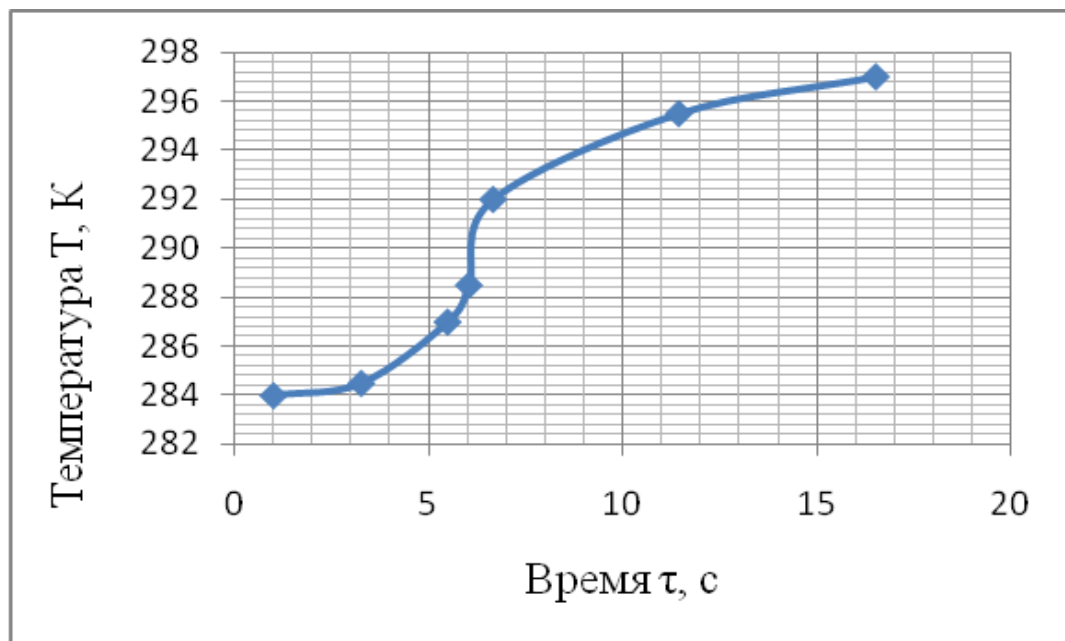


Рисунок 3.1. Пример экспериментальной термограммы

Это отмечают и другие авторы [60-63]. В результате обработки данных экспериментов численными способами значительно приближеннее оказалось применение полиномы третьей степени (рис. 3.1-3.3). Погрешность эмпирического выражения составила не более $1,8 \div 2,0\%$.

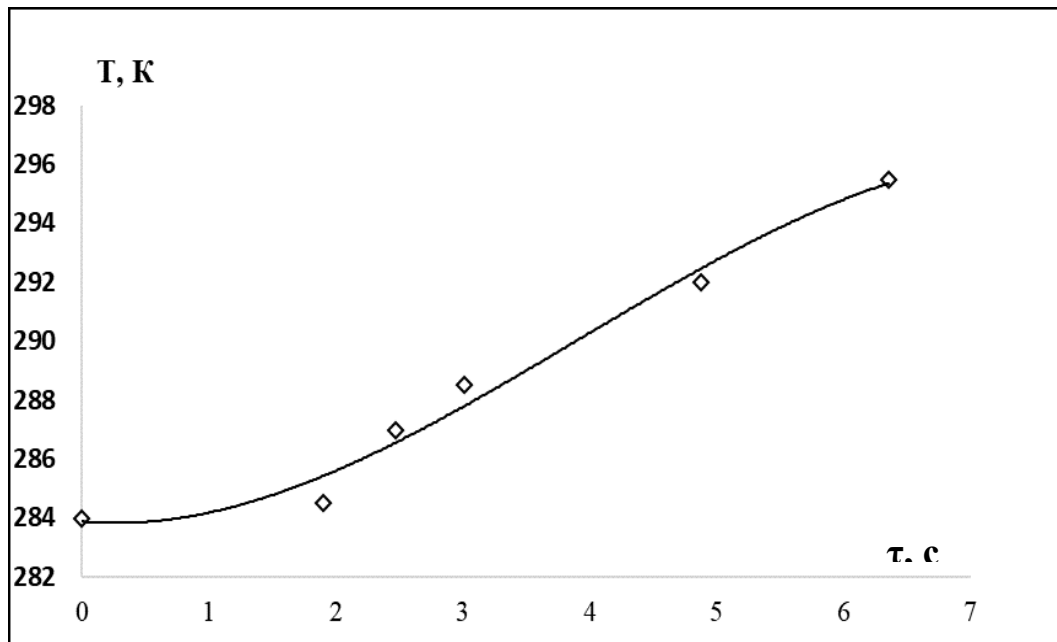


Рисунок 3.2. Пример начального участка экспериментальной термограммы с нанесенной линией тренда

Для полученных термограмм наилучше всего подошла степенная функция. Погрешность аппроксимации составила не более $6,5 \div 7,0\%$ (рисунок 3.3).

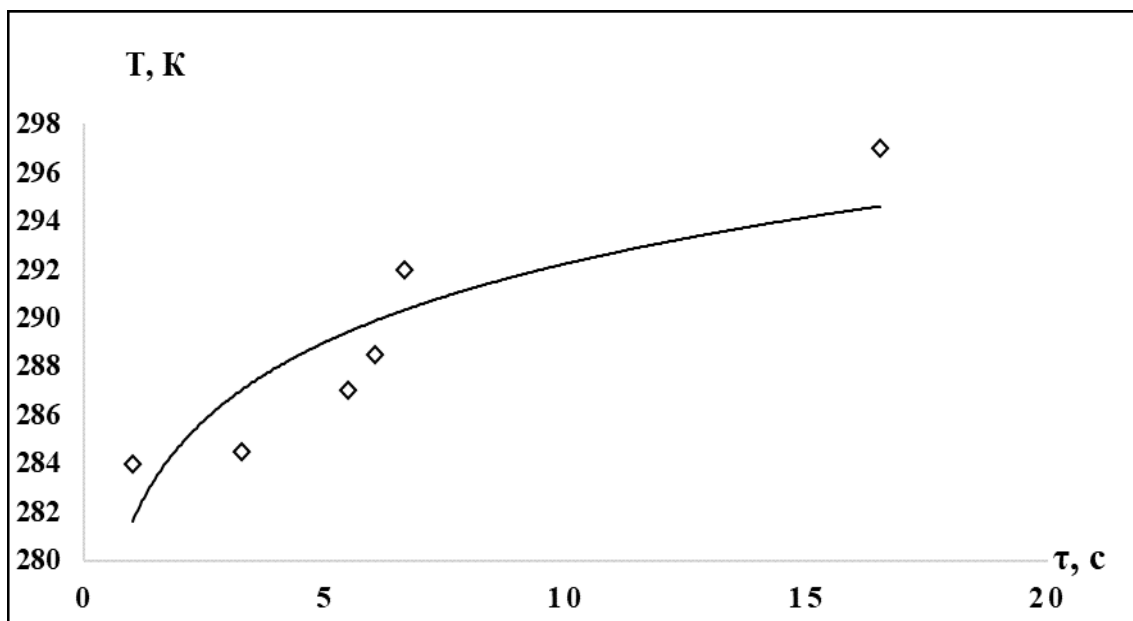


Рисунок 3.3. Пример экспериментальной термограммы с нанесенной линией тренда

3.3. Расчет кинетики исследуемых образцов

Для решения системы (3.3) и (3.4) в качестве исходных данных были использованы значения температуры и масс составных компонентов в начальный момент времени ($\tau = 0$).

Для получения результатов кинетики разложения мы воспользовались опытным устройством, представленном на рисунке 2.5.

В качестве дисперсной фазы нами использован ячменный порошок (2г, 4г, 8г) [2,32],[143-А,147-А,149-А,152-А,152-А,153-А,154-А,160-А]. Растворителем послужила вода при ($T=280$ К, 287 К и 288 К).

Результаты исследования на рисунках 3.4 – 3.6 представлены графически.

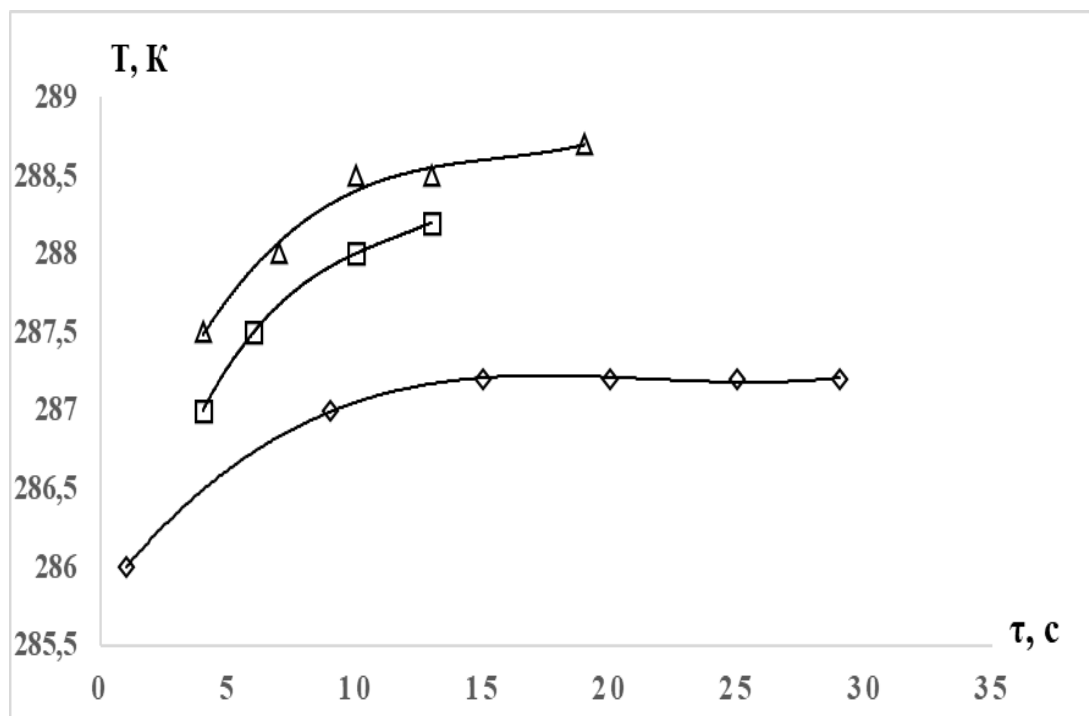


Рисунок 3.4. Температурная зависимость адиабатического изменения температуры разложения сухого вещества и H_2O от времени.

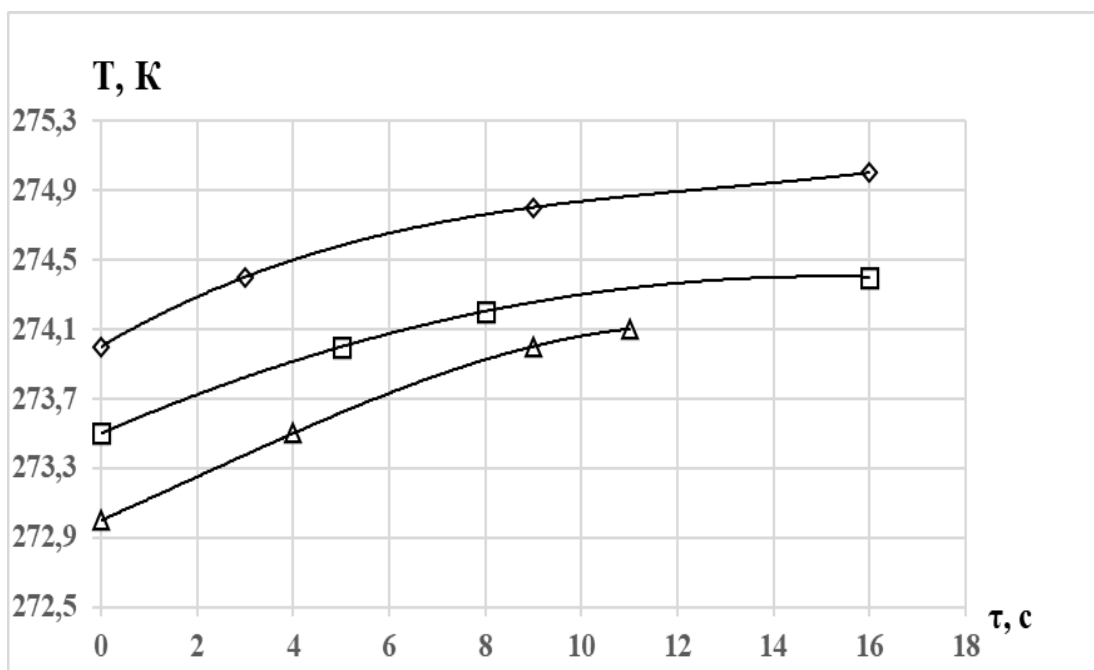


Рисунок 3.5. Температурная зависимость адиабатического изменения температуры разложения воды и сухого вещества от времени

Для определения кинетики разложения H_2O и доли массы порошка от времени разработана экспериментальная установка (рисунок 2.5).

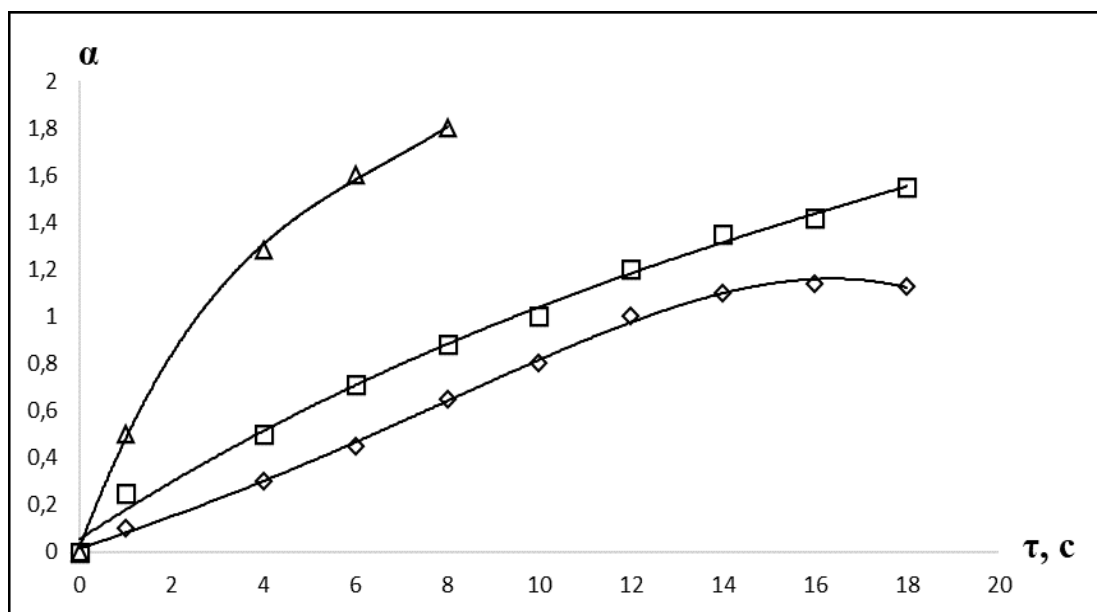


Рисунок 3.6. Кинетические кривые разложения сухого вещества в воде при различных температурах: (1-279, 7; 2-280,0; 3-280,7; 4-281,5; 5-282,0; 6-282,2; 7-282,5; 8-283,0 К)

Как видно из рисунков 3.5. и 3.6 при маленьких концентрациях сухого вещества процесс разложения происходит быстрее, чем при больших концентрациях. Эти кинетические кривые, которые исследовались для чистого сухого вещества, удовлетворительно описываются уравнением первого порядка Ерофеева - Колмогорова [91,143-А,147-А,149-А,152-А,152-А,153-А,154-А,160-А]:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial \tau} = k(1 - \alpha) \quad (3.6)$$

где α – степень разложения, τ – время, сек, k – константа скорости.

После соответственного математического преобразования можно представить это уравнение в виде [91]:

$$\lg(1 - \alpha) = \frac{K_{\tau}}{2.303} \quad (3.7)$$

Методы расчета результатов вычисления по уравнению (3.7) приведены в приложение П.3.

Функциональные зависимости $\lg\left(\frac{1}{1-\alpha}\right)$ от τ приведены на рисунке 3.7.

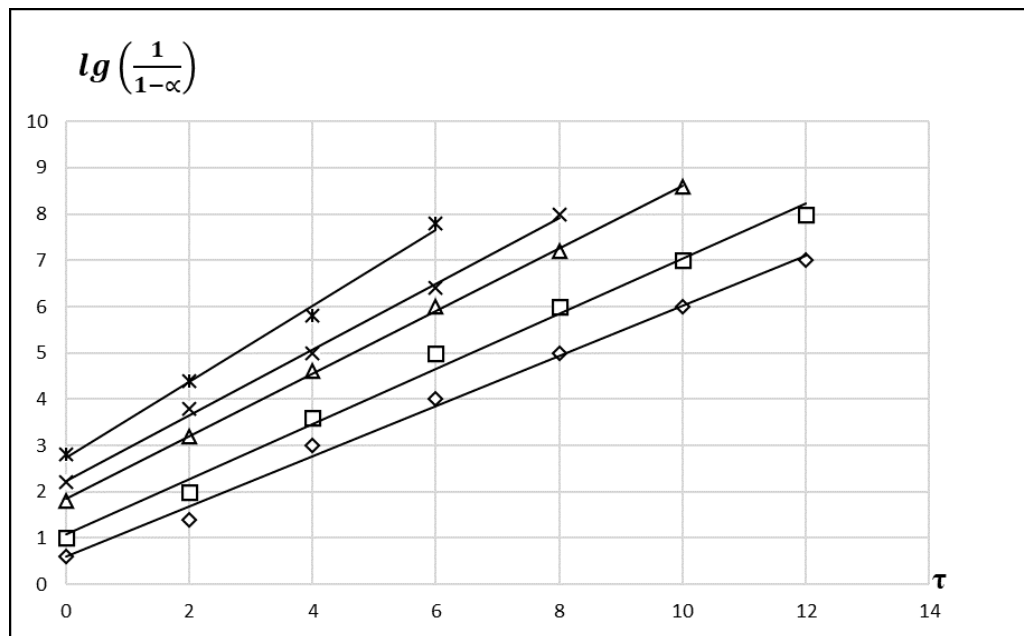


Рисунок 3.7. Зависимость $\lg\left(\frac{1}{1-\alpha}\right)$ от времени τ

Из графика, представленного на рисунке 3.7 были определены значения констант скоростей.

Температурную зависимость константы скорости прохождения химической реакции можно описать согласно Аррениуса [8], в виде [142-А,143-А,144-А,150-А,151-А,152-А,153-А,154-А,155-А,156-А,157-А,158-А,159-А,160-А]:

$$\lg K = \lg K_0 - \frac{E}{2.303RT} \quad (3.8)$$

где, R – универсальная газовая постоянная, кДж/(моль·град.), T – абсолютная температура, К.

Согласно графику экспериментальные значения температурной зависимости константы скорости в соответствующих координатах $\lg K - 1/T$ (рисунок 3.8) укладываются вдоль прямой.

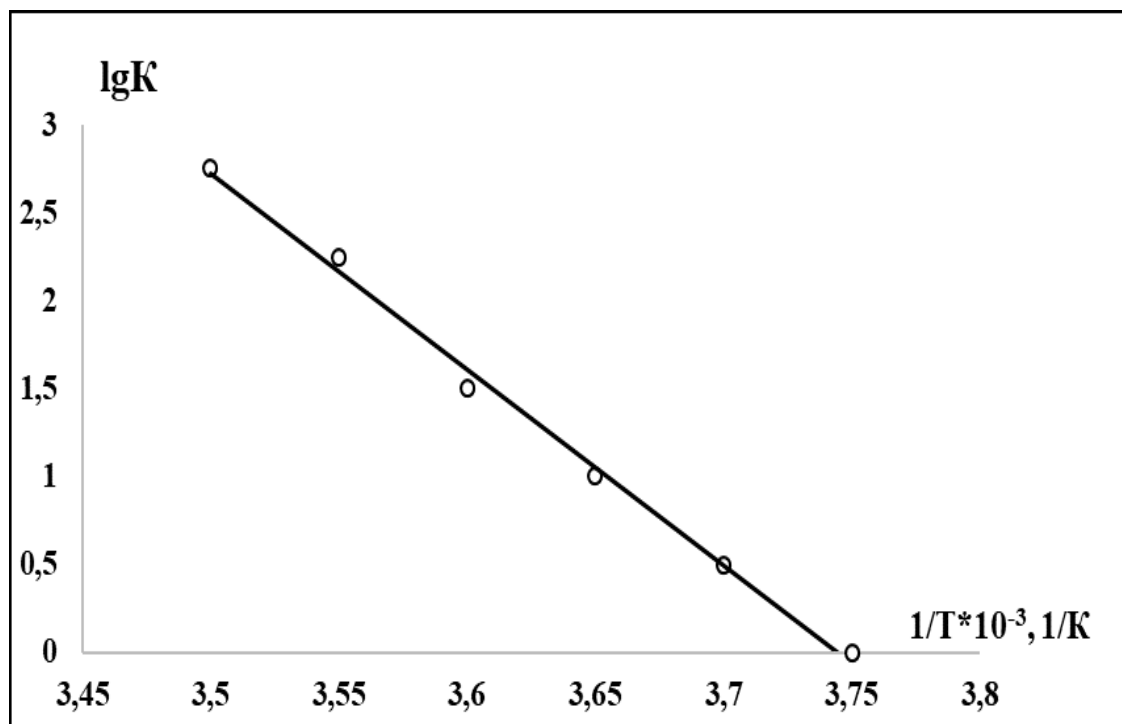


Рисунок 3.8. Зависимость $\lg K$ от обратной абсолютной температуры
 Величины энергии активации устанавливаются согласно тангенсу угла наклона прямой и по нижеследующему выражению [8], [142-А,143-А,144-А,145-А,146-А,147-А,148-А,149-А,150-А,151-А,152-А,153-А,154-А,155-А,156-А,157-А,158-А,159-А,160-А]:

$$E = \frac{2.3RT_2T_1}{T_2 - T_1} \lg \frac{K_2}{K_1} \quad (3.9)$$

Расчетные данные (формула 3.9) энергии активации в зависимости от времени разложения дисперсной фазы (таблица 3.2).

Таблица 3.2. - Вычисленные значения энергии активации от времени разложения сухого вещества

τ, С	1	3	5	8	11	14
Е, Дж/моль	$6.11 \cdot 10^6$	$0.32 \cdot 10^6$	$0.12 \cdot 10^6$	$0.11 \cdot 10^6$	$0.084 \cdot 10^6$	$0.069 \cdot 10^6$
Е, кДж/моль	6110	320	120	110	84	69

Используя наклон кривой, была установлена величина кажущейся энергии активации. С помощью соответствующих выражений был произведен расчет энергии активации Е, которая соответствует значениям, полученным графическим способом. Расчетные данные по энергии активации и температурная зависимость скорости разложения сухих компонентов раствора подтверждают ее прохождение в диффузионно - кинетической области. Кинетика химических реакций позволяет устанавливать различные химические, термодинамические и переносные свойства веществ, полученных в ходе реакции, которые экспериментальным способом определить сложно. Одним из спасений физхимиков являются теоретические предпосылки или определения параметров расчета химических реакций. Надо отметить, что, используя теорию Аррениуса, или другие теории также можно изучить механизм происхождения химических реакций многокомпонентных систем и комплексов веществ.

Например, процесс разложения продуктов сопровождается влиянием соответствующей температуры, которая выходит за границы термической стабильности сырья, а это в свою очередь становится следствием высокомолекулярных органических веществ на простые с твердым остатком.

В этом процессе различают три фазы:

1. Фаза сушки, которая представляет собой эндотермический процесс и сопровождается поглощением тепла.
2. Фаза дистилляции, в ходе которой предусмотрен процесс нагрева сырья до температуры отщепления белковой цепочки, в результате чего образуются более простые вещества (газ, жидкость) и твердый остаток из углерода. Рабочий температурный интервал данной фазы составляет от 200 до 500° С.
3. Фаза разложения, в результате которой полученные во второй фазе вещества претерпевают дальнейший процесс разложения и трансформации. Температурный интервал данной фазы составляет от 500 до 1200° С, при котором из углерода и жидких органических веществ образуются стабильные газы (H₂, CH₄, CO и т.д.). Также в данной фазе рассматривается применение соответствующих катализаторов.

Так, в работах [42, 53], представлено разложение пероксида водорода при открытой системе (колбообразный сосуд), которая предусматривает выполнение опыта в открытой атмосфере.

3.4. Влияние температуры на изменение скорости химической реакции согласно теории Арениуса-Эйринга

Применив опытные данные по зависимости времени старения веществ от влияния температуры (электролитов и воды) и теорию Арениуса-Эйринга нами была вычислена скорость реакции [8, 10, 11, 53, 55, 69, 70, 81 и 91]. С этой же целью на плоскости (x, y) был построен график зависимости $\tau = f(1/T)$, (рисунок 3.9 и 3.10) [142-А,143-А,144-А,145-А,146-А,147-А,148-А,149-А,150-А,151-А,152-А,153-А,154-А,155-А,156-А,157-А,158-А,159-А, 160-А,212-А].

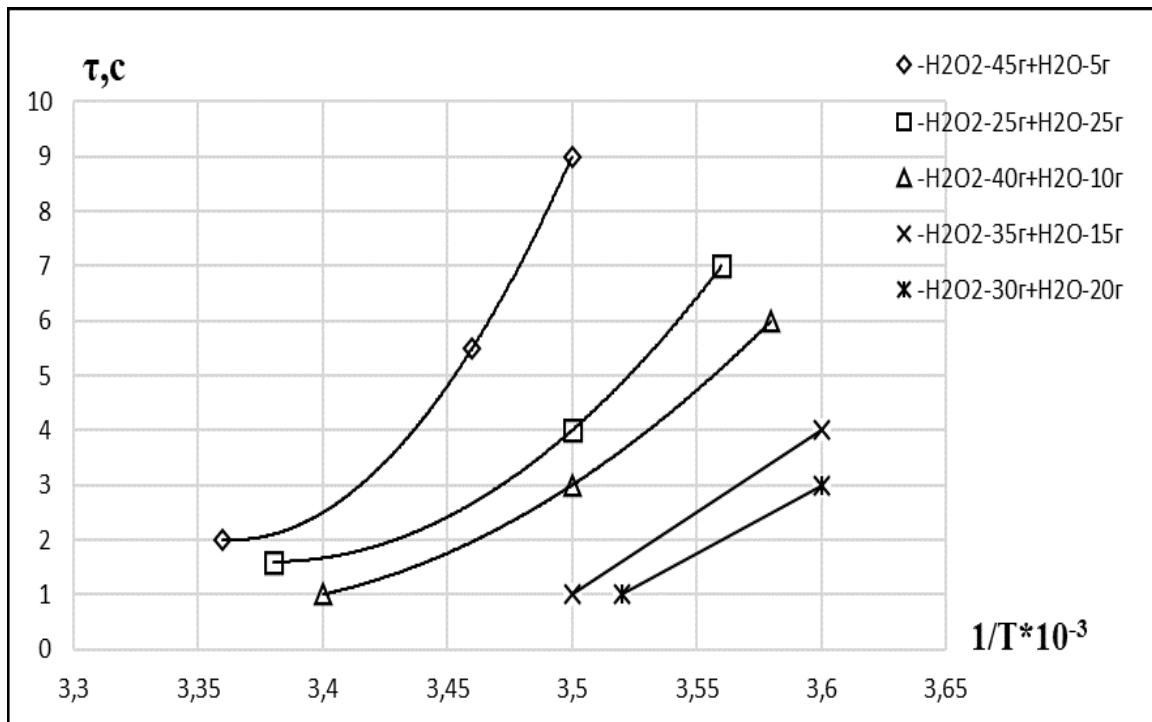


Рисунок 3.9. Зависимость продолжительности старения электролита от обратной температуры

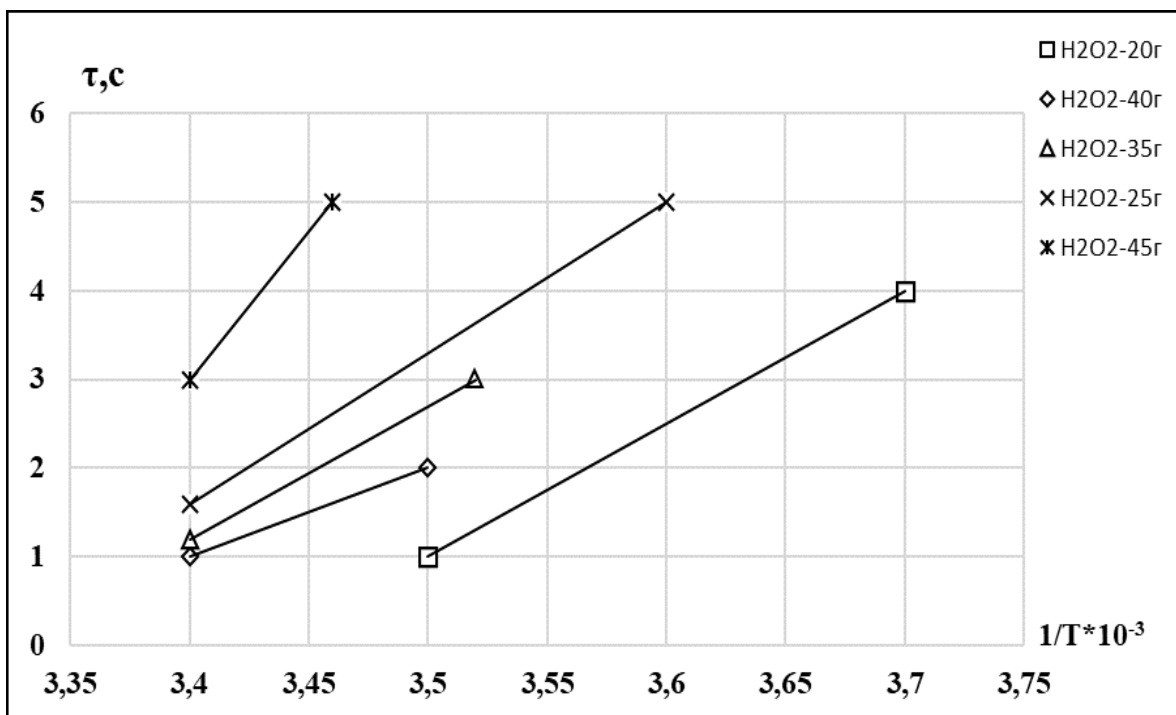


Рисунок 3.10. Зависимость продолжительности старения электролита (сухого вещества и воды) от обратной температуры старения

Было установлено, что длительность процесса старения напрямую зависит от температуры следующим образом [16, 42, 53, 55], [142-А,143-А,144-А,145-А,146-А,147-А,148-А,149-А,150-А,151-А,152-А,153-А,154-А,155-А,156-А, 157-А, 158-А,159-А,160-А].

$$\ln \tau = \frac{A}{T} + B, \quad (3.10)$$

где A и B – постоянные изучаемого материала из условий теплового старения, анализ которых показал, что данные величины ничто иное как функция массы второго компонента (уравнение 3.11 и 3.12):

$$A = -323 \cdot 10^7 m^2 + 902569,1 \cdot m + 2880,01 \quad (3.11)$$

$$B = 80285,4 \cdot m^2 - 2346,6 \cdot m - 11,461 \quad (3.12)$$

Уравнение (3.10) с учетом (3.11) и (3.12) принимает вид:

$$\ln \tau = \frac{(-323 \cdot 10^7 m^2 + 902569,1 m + 2880,014)}{T} + (80285,359 m^2 - 2346,56 m - 11,460) \quad (3.13)$$

Решая уравнение (3.13), можно установить соответствующее время старения теплоносителей, для чего следует располагать соответствующими значениями массы второго компонента и температуры. Было показано, что логарифмическая зависимость τ от величины, которая является противоположной температуре старения вещества и обратной температуре старения, должна будет соответствовать закону прямой. В подавляющем количестве случаев наклон прямых подходит двойному уменьшению времени старения τ и росту температуры процесса старения по средним показателям на 10 К.

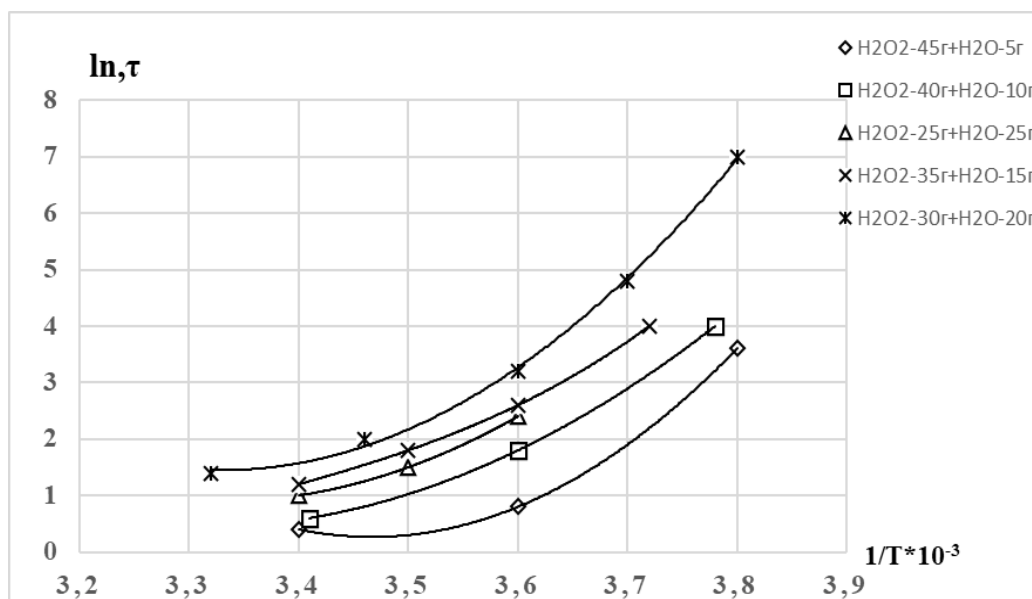


Рисунок 3.11. Зависимость логарифма времени старения от обратной температуры старения

Подобного рода зависимости используются и для установления длительности применения изоляции и жидкостей (растворов) в разных конструкциях. Выполнимость (3.13) графически показана на рисунке 3.11. Скорость реакции может зависеть и от влияния давления воздуха, превосходящее количество кислорода, наличие озона и др. Ультрафиолет, электрическое поле, механическая обработка ускоряют тепловое старение.

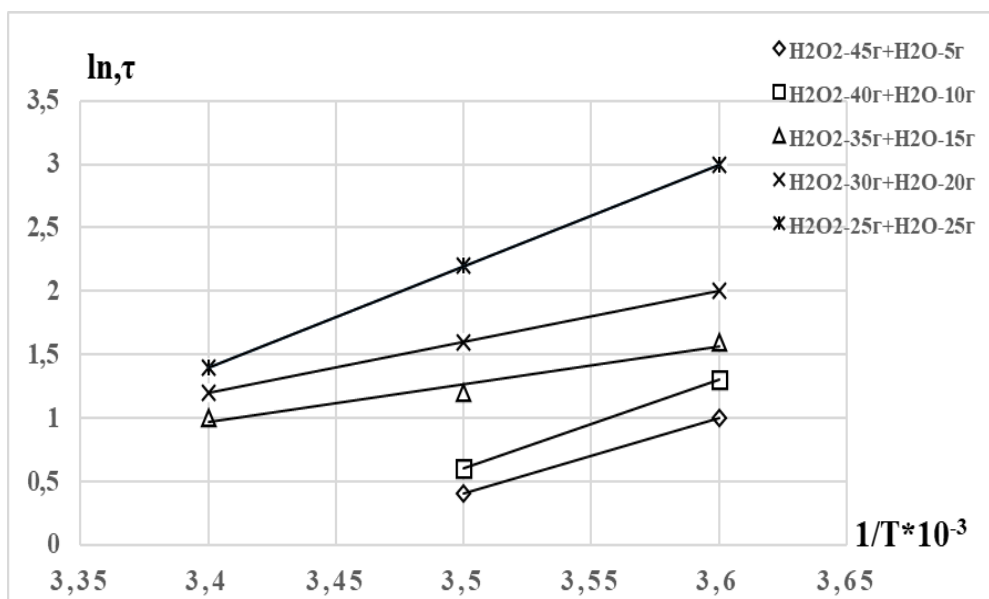


Рисунок 3.12. Зависимость логарифма времени старения от обратной абсолютной температуры

Согласно графику 3.12 начало процесса старения приходится к 278 К [42, 53, 55, 68 и 72].

Далее, в координатах $(\ln \tau - 1/T)$ выделяем прямые участки (рисунок 3.12), на основе которых строим другие (рисунки 3.13 и 3.14).

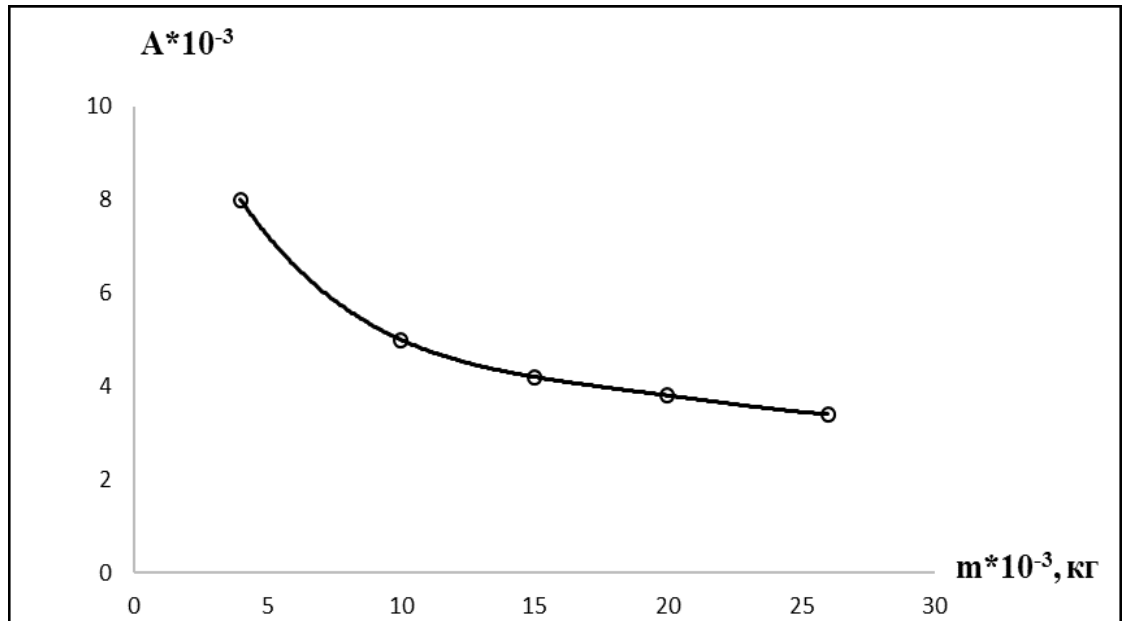


Рисунок 3.13. Зависимость A от массы порошков при температуре 278 К

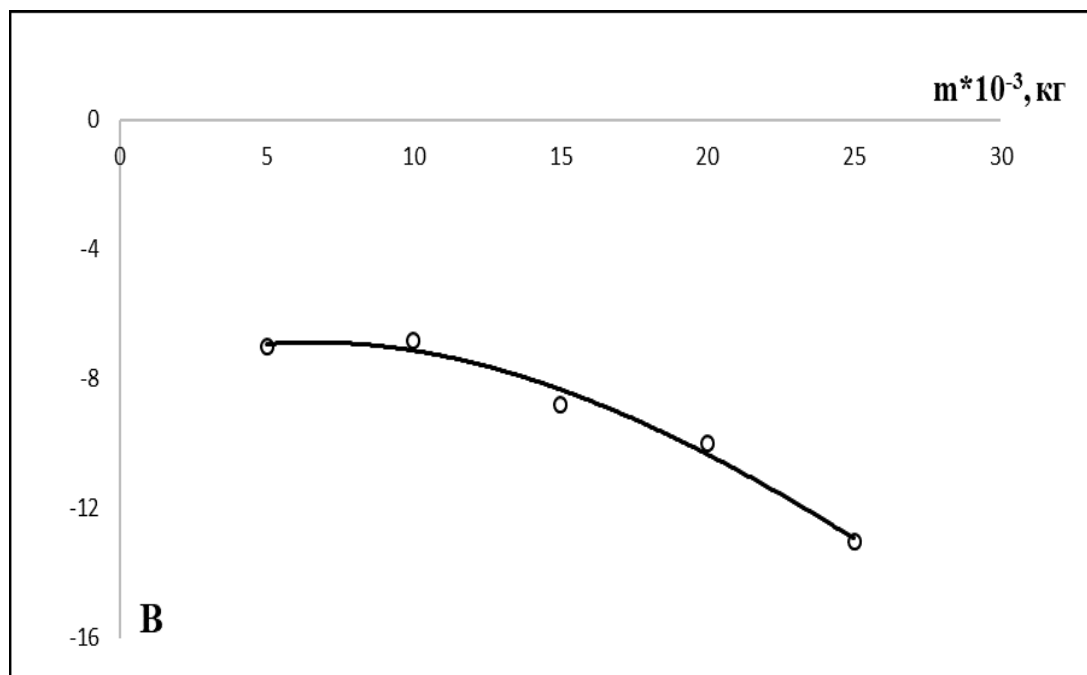


Рисунок 3.14. Зависимость B от массы порошков при температуре 278 К

3.5. Расчет гиббсовской адсорбции из изотермы поверхностного натяжения методом графического дифференцирования

Адсорбция (Γ) растворенного вещества в зависимости от изменения его поверхностного натяжения описывается уравнением Гиббса. Для разбавленных неэлектролитных растворов оно имеет следующий вид:

$$\Gamma = -\frac{C}{RT} \left(\frac{\partial \sigma}{\partial c} \right), \quad (3.14)$$

согласно которому направление процесса (концентрирование вещества на поверхности, либо в объемной фазе) определяется установлением знака $\frac{d\sigma}{dC}$:

- I. Если $\frac{d\sigma}{dC} < 0$, то $\Gamma > 0$, тогда концентрация вещества в поверхностном слое больше, чем в объеме ($C_s > C_v$), данное вещество ПАВ.
- II. Если $\frac{d\sigma}{dC} > 0$, то $\Gamma < 0$, тогда концентрация вещества в поверхностном слое меньше, чем в объеме ($C_s < C_v$), данное вещество ПАВ.
- III. Если $\frac{d\sigma}{dC} = 0$, то $\Gamma = 0$, следовательно концентрация вещества в поверхностном слое равна концентрации вещества в объеме раствора ($C_s = C_v$), данное вещество ПИВ и ПНВ.

Если располагать значениями зависимости поверхностного натяжения раствора от концентрации растворенного в нем вещества, то путем графического дифференцирования можно вычислить изотерму адсорбции ПАВ, т.е. $\sigma = f(C)$, для чего в нескольких точках кривой $\sigma = f(C)$ проводят касательные и уточняют тангенсы угла их наклона, отвечающие значениям производных $\partial \sigma / \partial C$ в данных точках (рисунок 3.15). Зная их значения с помощью уравнения адсорбции Гиббса можно вычислить значения Γ , по которой строится изотерма адсорбции $\Gamma = f(C)$ (рисунок 3.16).

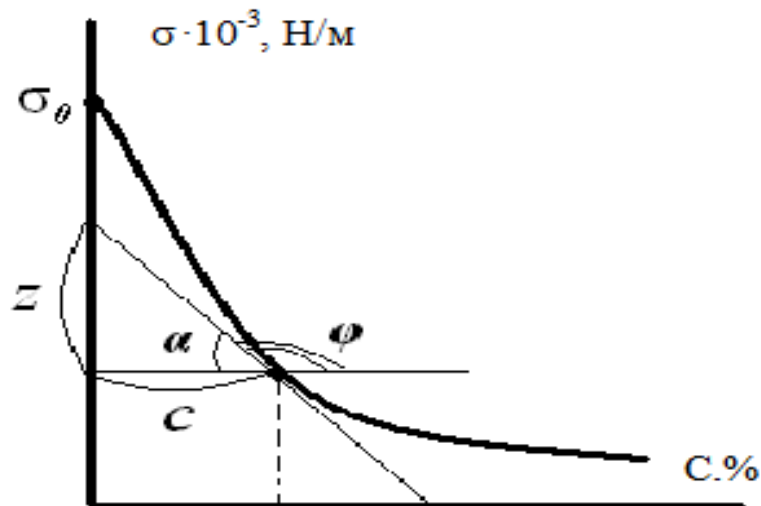


Рисунок 3.15. Графическое определение величины адсорбции по изотерме поверхностного натяжения

Из рисунка 3.15 видно, что:

$$\frac{d\sigma}{dC} = \operatorname{tg}\varphi = -\operatorname{tg}\alpha = -\frac{Z}{C}$$

Подставим полученное значение в уравнение Гиббса (3.30)

$$\Gamma = -\frac{C}{RT} \left(\frac{\partial \sigma}{\partial C} \right) = -\frac{C}{RT} \operatorname{tg}\Psi = -\frac{C}{RT} \left(-\frac{z}{C} \right) = \frac{z}{RT} \quad (3.15)$$

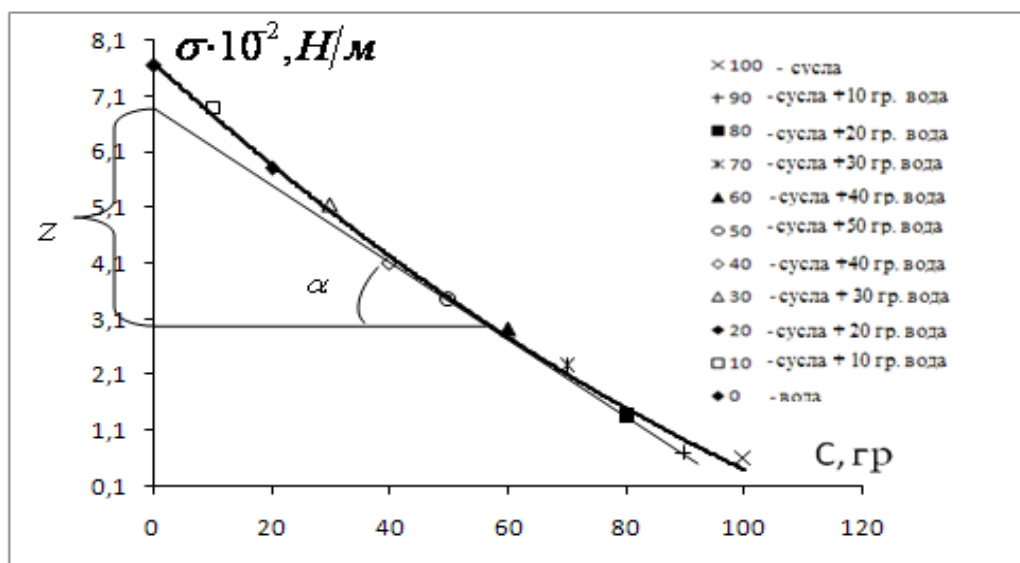


Рисунок 3.16. Зависимость коэффициента поверхностного натяжения от концентрации

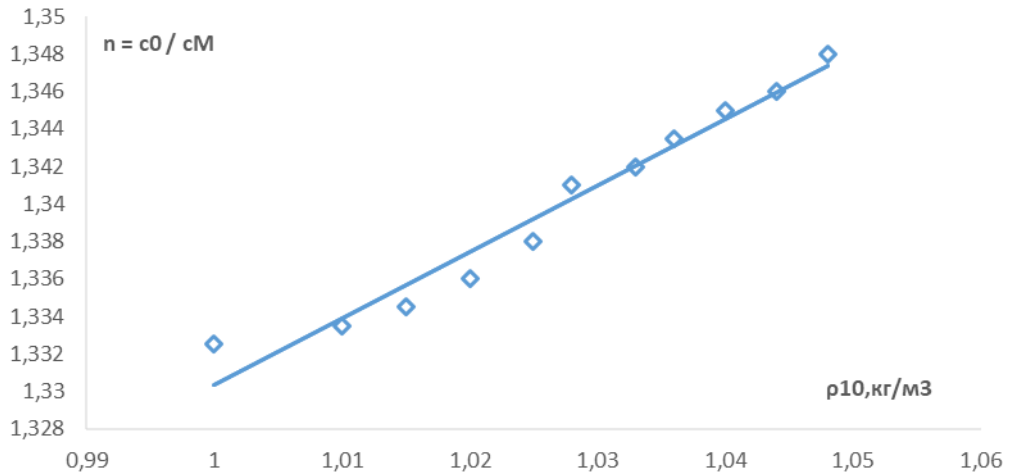


Рисунок 3.17. Зависимость коэффициента преломления света от плотности сула [143-А,147-А,149-А,151-А,152-А,153-А,154-А,157-А,158-А,160-А,212-А]

$$\rho = (2,671n - 2,552)10^{-3}, \text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$$

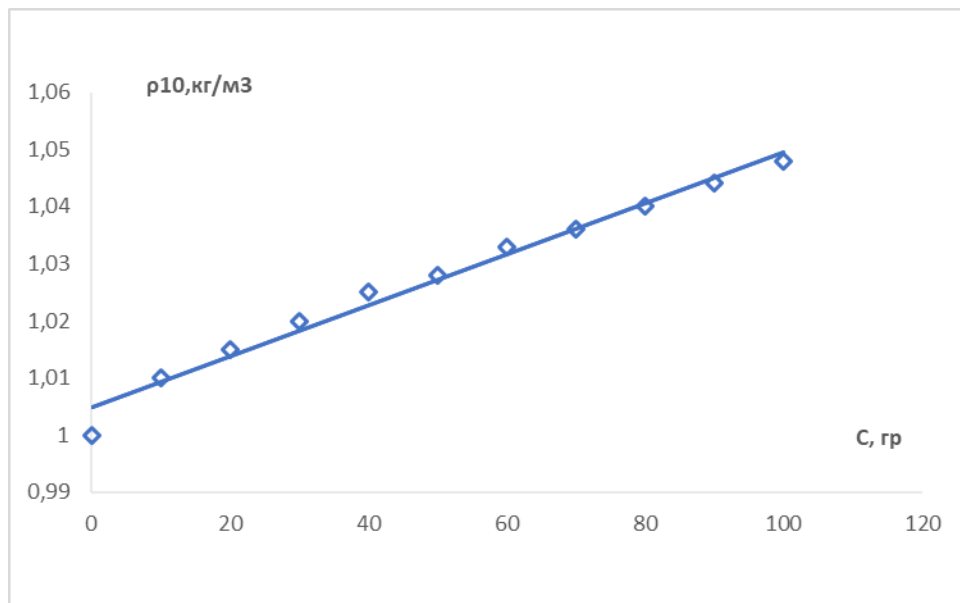


Рисунок 3.18. Зависимость плотности сула от массовой концентрации сухих веществ в суле [143-А,147-А,149-А,151-А,152-А,153-А,154-А,157-А,158-А,160-А,212А]

$$\rho = (-0,0001C + 1,049)10^{-3}, \text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$$

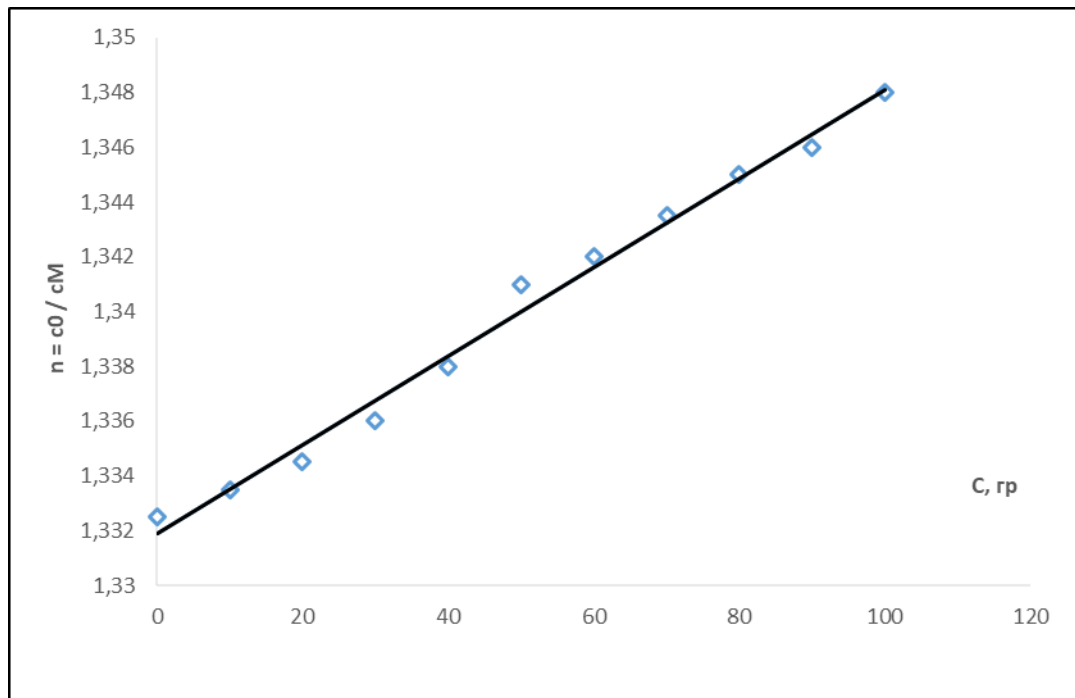


Рисунок 3.19. Зависимость коэффициента преломления света от массовой концентрации сула

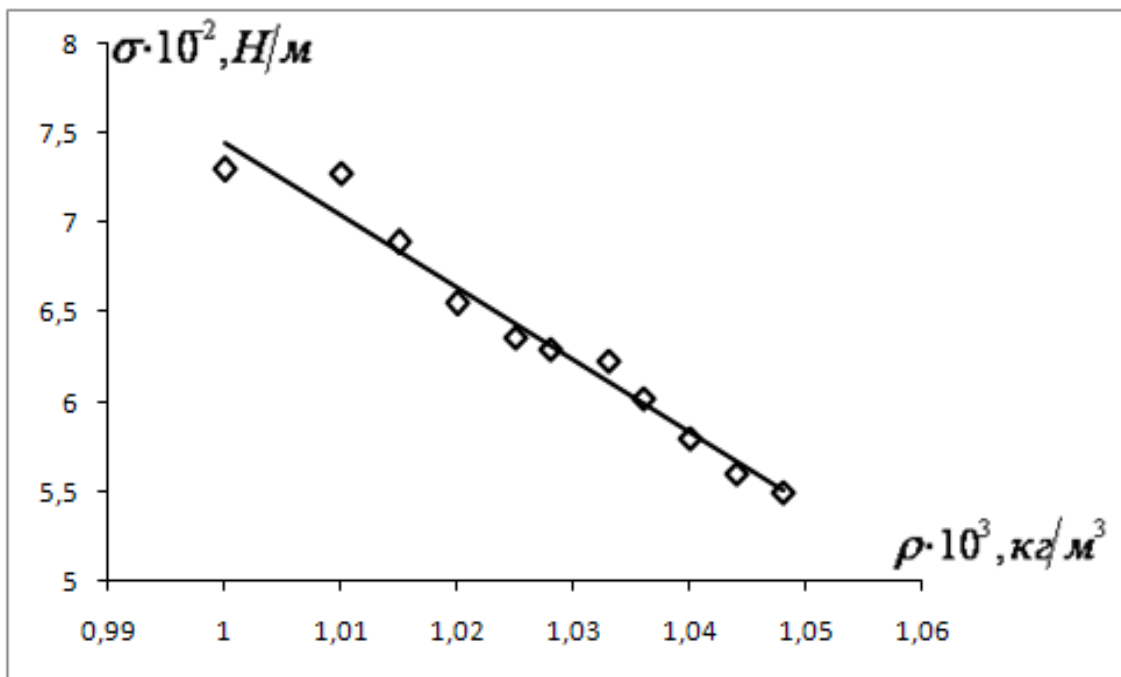


Рисунок 3.20. Зависимость коэффициента поверхностного натяжения от плотности сула [143-А,147-А,149-А,151-А,152-А,153-А,154-А,157-А,158-А,160-А, 212-А]

$$\sigma = (-40,67\rho + 48,12)10^{-3}, \text{Н} \cdot \text{м}$$

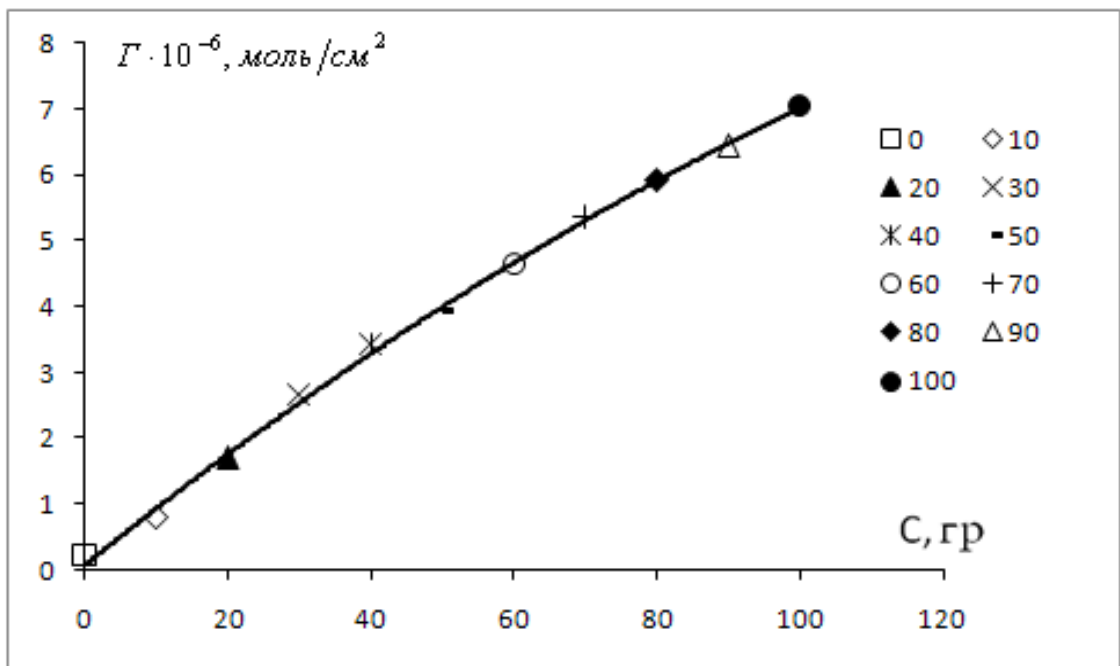


Рисунок 3.21. Зависимость коэффициента адсорбции от массовой концентрации сула

Заключение к третьей главе

В третьей главе настоящей диссертации представлены результаты ряда экспериментальных опытов по определению коэффициента поверхностного натяжения, плотности, коэффициента преломления света, коэффициента адсорбции системы вода и суло, а также способы и методы обобщения этих результатов при атмосферном давлении и комнатной температуре. Также в главе приведены результаты численного определения кинетики разложения изучаемых образцов (теория Ленгмюра – Аррениуса-Эйринга) и итоги экспериментального исследования физико-химических, термодинамических свойств с учетом изменения температуры и давления опыта в поле аэрации.

Глава 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ ПО ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИМ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИМ СВОЙСТВАМ ИССЛЕДУЕМЫХ СИСТЕМ И ИХ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

4.1. Плотность пивного сусла в зависимости от температуры в режиме аэрации и без аэрации

Приготовление пивного сусла представляет собой одну из самых сложных и важных этапов в пивоваренной промышленности, от качества которого напрямую зависит и качество конечного продукта. К тому же по энергоемкости он является лидером в отношении других стадий приготовления пива и требует больших площадок. Исключение из технологического процесса стадию его приготовления, возможно лишь путем использования его концентратов, а поскольку это термолабильный продукт, то и концентрирование соответственно должно выполняться при более низких температурах и минимальном времени ее воздействия. К таковым аппаратам, в которых выполняется процесс концентрирования пивного сусла, относят роторно - пленочный аппарат (РПА), представляющий собой теплообменное устройство.

Критериальное уравнение, служащее для описания теплообменных процессов в рассматриваемом роторно - пленочном аппарате (РПА) записывается в виде [1-4, 137-139, 162] [142-А,143-А,144-А,145-А,146-А,147-А,148-А,149-А,150-А,151-А,152-А,153-А,154-А,155-А,156-А,157-А,158-А,159-А,160-А, 212-А]:

$$Nu = f\left(\text{Pr}; \text{Re}; \text{Re}_{nl}; K_Q, \frac{\delta}{D_A}, \frac{H}{D_A}, \frac{\omega_0}{\omega_z}\right) \quad (4.1)$$

Теплопроводность, объемную теплоемкость, температуропроводность устанавливают путем использования метода двух температурных точек [1-4].

В реальных условиях данное выражение в процессе концентрирования пивного сусла в РПА может быть установлено только опытным путем и соответствующей математической обработкой, а его критерии уточняются за

счет ТФС при разных условиях течения процесса. Для этого было разработано опытное устройство, с помощью которого можно определить искомые величины. Для измерения плотности концентрированного пивного сусла использован метод гидростатического взвешивания [5, 6, 90, 137, 162]. Основные части экспериментальной установки следующие: аналитические весы ВЛА-200ГМ, кварцевый поплавок, с манганиновой проволокой и термостат. Достоверность работы установок устанавливалась их тестированием с контрольными жидкостями (толуол, н-гексан и вода). Общая относительная погрешность, допущенная при измерении плотности при $\alpha = 0,95$ составила 0,1%.

Значения по плотности продуктов пива, полученные в ходе соответствующих экспериментов в зависимости от температуры и концентрации сухого вещества (сусла) при аэрации и без нее показаны в таблицах 4.1 и 4.2. [39, 45, 49, 137-139, 154, 167 и 168] [143-А, 147-А, 148-А, 151-А, 152-А, 153-А, 154-А, 157-А, 158-А, 159-А, 160-А, 212-А].

Таблица 4.1. - Плотность (ρ , кг/м³) концентрированного пивного сусла при различных температурах и атмосферном давлении на линии насыщения, без режима аэрации

T, К x, %	293	303	313	323	333
5	1017,2	1014,3	1011,4	1008,5	1005,6
6	1021,7	1018,8	1015,9	1012,9	1010,1
7	1025,9	1022,9	1020,0	1017,1	1014,1
8	1030,8	1027,8	1024,9	1021,9	1019,0
9	1035,4	1032,5	1029,5	1026,5	1023,6
10	1039,9	1036,9	1034,0	1031,0	1028,0

Таблица 4.2. - Плотность (ρ , кг/м³) пивного сусла в зависимости от температуры на линии насыщения с учетом режима аэрации

T, К \ x, %	293	303	313	323	333
5	988,7	984,5	981,6	978,0	975,4
6	991,1	987,6	985,0	982,1	979,8
7	995,2	992,0	988,0	985,0	983,7
8	999,9	996,7	993,5	995,4	992,9
9	1004,7	105,8	1002,4	995,4	992,9
10	1008,7	1005,8	1002,4	999,3	997,2

Согласно таблицам 4.1 и 4.2 плотность концентрированного продукта пива с увеличением температуры (без режима аэрации и с учетом режима аэрации) уменьшается, а с добавкой количества сусла плотность растет. Например, для образца имеющего 8 % сусла с учетом аэрации изменение температуры в интервале 293-333 К, плотность уменьшается на 12 %. При температуре T=313 К и росте количества сухого вещества $x = 5 \div 10$ %, плотность образцов без режима аэрации растет на 2,2 %. Как видно из таблиц 4.1 и 4.2 плотность образцов с учетом аэрации меньше, чем плотность образцов без режима аэрации. Это обусловлено, тем что при аэрации продуктов пива объем увеличивается, соответственно и уменьшается плотность образцов. Например, при T=293 К у образца №1 (95% H₂O + 5 % сусла) плотность уменьшается на 2,9%, а при T=333 К плотность этого же образца уменьшается на 3,1 % [143-А,147-А,148-А,151-А,152-А,153-А,154-А,157-А,158-А,159-А,160-А,212-А].

Результаты экспериментального исследования показали, что режим аэрации приведет к увеличению объема сусла, из-за чего соответственно будет уменьшатся плотность и вязкость продуктов пива. Эксперимент показал, что плотность продуктов пива с увеличением температуры, как в режиме аэрации, так и без режима аэрации уменьшается по линейному закону, при уве-

личении количества сула, плотность объектов также растет по линейному закону (таблицы 4.1 и 4.2).

Для обобщения и обработки экспериментальных данных по плотности образцов нами использован закон соответственных состояний в следующем виде [39, 45, 90, 49, 137-139, 150, 154, 167 и 168], [143-А,147-А,148-А,151-А,152-А,153-А,154-А,157-А,158-А,159-А, 160-А,212-А]:

$$\frac{\rho}{\rho_1} = f\left(\frac{T}{T_1}\right), \quad (4.2)$$

где ρ и ρ_1 – плотность образцов в режиме аэрации при различных температурах T и при T_1 ($T_1 = 313\text{K}$).

Выполнимость функциональной зависимости (4.2) показана на рисунке 4.1.

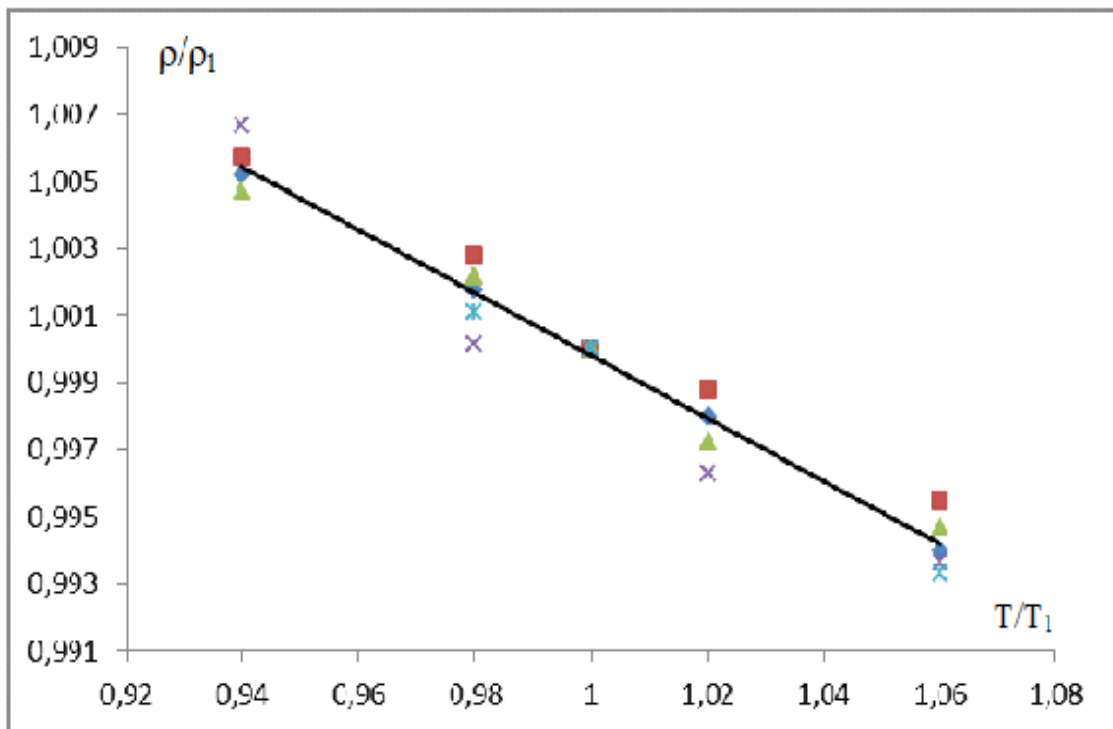


Рисунок 4.1. Зависимость относительной плотности ($\frac{\rho}{\rho_1}$) от относительной температуры (T/T_1) в режиме аэрации при различных температурах и концентрации сула

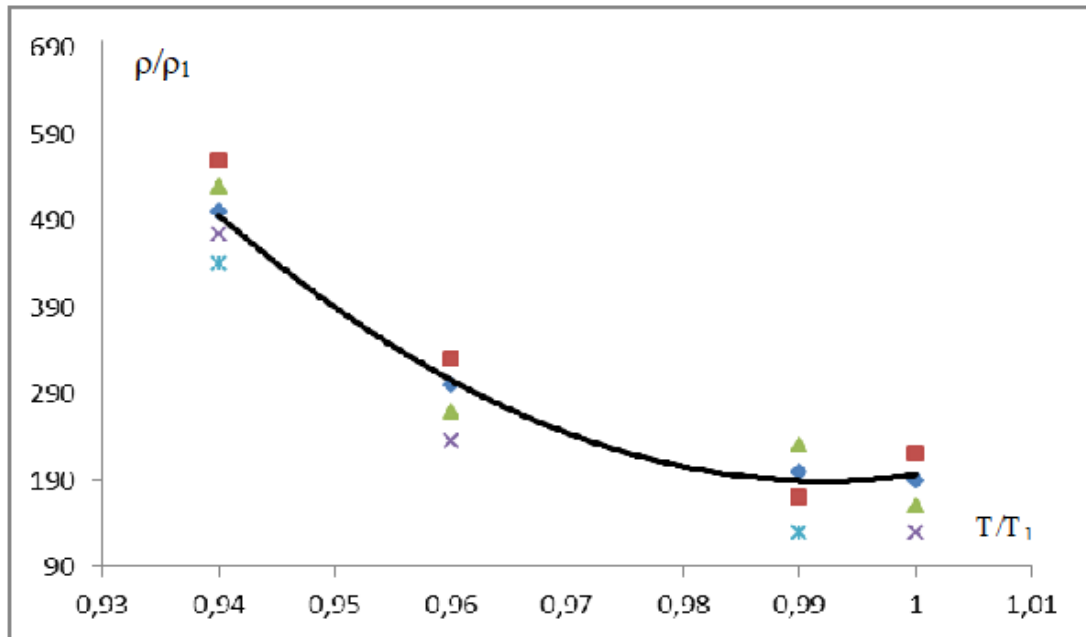


Рисунок 4.2. Зависимость относительной плотности ($\frac{\rho}{\rho_1}$) от относительной температуры ($\frac{T}{T_1}$) в режиме аэрации при различных температурах и концентрации суслу

Как видно из рисунков 4.1 и 4.2, относительная плотность образцов от относительной температуры в условиях, не предусматривающих аэрацию и с учётом режима аэрации, подчиняются линейному и квадратичному законам соответственно, уравнения которых имеют следующий вид:

-для образцов без условия аэрации [39, 41, 43, 45, 46, 49, 90, 137-140, 150, 154, 158, 159, 167 и 168], [143-А,147-А,148-А,151-А,152-А,153-А,154-А,157-А,158-А,159-А,160-А,212-А]:

$$\frac{\rho}{\rho_1} = 1,09 - 0,09 \left(\frac{T}{T_1} \right), \quad (4.3)$$

-для образцов с учётом аэрации:

$$\frac{\rho}{\rho_1} = \left[-0,233 \left(\frac{T}{T_1} \right)^2 + 0,36 \left(\frac{T}{T_1} \right) + 0,873 \right], \quad (4.4)$$

Анализ значений ρ_1 показал, что они представляются в качестве функции концентрации дисперсной фазы (суслу).

Для образцов при различных условиях без и с аэрацией выражения представляются в виде (рисунки 4.2 и 4.3):

- без аэрации:

$$\rho_1 = 4,52x + 988,8, \text{ кг/м}^3, \quad (4.5)$$

- с учётом аэрации

$$\rho_1 = 4,08x + 961,2, \text{ кг/м}^3 \quad (4.6)$$

Из уравнений (4.3) и (4.4) с учётом (4.5) и (4.6) получим:

$$\rho = \left[1,09 - 0,09 \left(\frac{T}{T_1} \right) \right] (4,52x + 988,8), \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \quad (4.7)$$

$$\rho = \left[0,233 \left(\frac{T}{T_1} \right)^2 + 0,36 \left(\frac{T}{T_1} \right) + 0,873 \right] (4,08x + 961,2), \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \quad (4.8)$$

Кислород, как уже это было отмечено, воздействует на качество пива, но точных указаний о степени его влияния до сих пор нет. Однако в процессах брожения аэрация представляет собой один из важных этапов в обеспечении размножения пивных дрожжевых клеток, являющихся основополагающим среди процессов брожения.

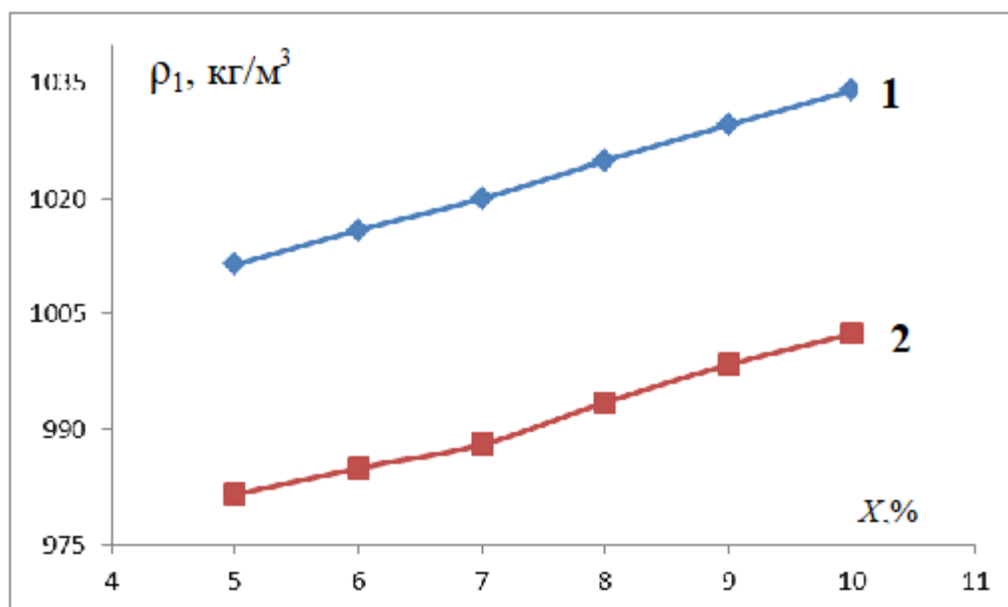


Рисунок 4.3 Зависимость ρ_1 от концентрации сухого вещества сусле при температуре $T_1 = 313 \text{ К}$ для образцов в режиме аэрации и без режима аэрации: 1 – без режима аэрации; 2 – в условиях аэрации

Однако и этот процесс остается исследованным не до конца. Согласно лабораторным исследованиям и исследованиям в производственных условиях, этот процесс тоже зависит от большого числа факторов:

Во-первых, на мини пивзаводах технология не предусматривает применение ферментов, поскольку в них не используется чистая культура и семенные дрожжи. Также на мини пивзаводах используют маленькие бродильные емкости относительно больших производств, что исключает влияние гидростатического давления на клетки.

Во-вторые, без наличия точного математического описания явлений на биоуровне весьма сложно дать точную оценку касательно сути протекающих процессов.

Исходя из вышеизложенного, данная работа по существу считается актуальной и с прикладной, и с научной точки зрения [143-А, 147-А,148-А, 151-А,152-А,153-А,154-А,157-А,158-А,159-А,160-А,212-А].

Исходя из сказанного, **основной целью данной** главы является изучение влияния аэрации в процессе главного сбраживания на основные физико-химические, химико-биологические параметры и на вкусовые качества нефильтрованного пива.

Данную цель можно достичь, решив следующие вопросы:

- определить влияние аэрации и температуры на плотность изучаемых веществ (продуктов пива), а также на скорость поглощения пивными дрожжами кислорода при сбраживании (основное);
- разработать эмпирическое уравнение, способное связать плотность продуктов пива с температурой, давлением и концентрацией сухого вещества;
- определить степень влияния процесса аэрации на изменение концентрации сула в процессе сбраживания (основное);
- разработать технологию производства пива светлых сортов с включением стадии аэрации в процесс его приготовления.

В работе [162] подробно представлена степень влияния процесса аэрации на качество готовой продукции. Автором также установлена S-образная

зависимость изменения концентрации сухих веществ в процессе сбраживания, согласно которому определяется скорость процесса брожения [162].

Ответные точки описываются уравнением вида [143]:

$$S = \frac{1}{1 + (\gamma\tau)^n}, \quad (4.9)$$

где $S = \frac{S}{S_n}$ - безразмерная величина для концентрации сухих веществ, S и S_n - соответственно текущая и начальная их концентрация, γ и n - параметры, получаемые из опыта, первый из которых характеризует скорость изменения концентрации субстрата, а второй из них скорость процесса (таблица 4.3) [162].

Таблица 4.3. - Численные значения γ [162]

$t, ^\circ C$	<i>Без аэрации</i>	<i>Аэрация суслу</i>	<i>Аэрация дрожжей</i>
	Γ	Γ	Γ
11	0,193	0,281	0,475
16	0,27	0,329	0,608
20	0,323	0,568	0,964

Обработка данных экспериментов показала, что температурную зависимость γ и n можно описать степенными выражениями [162]:

$$\gamma = 0,383 + 1,6 \cdot 10^{-5} t^{3,5} \quad (4.10)$$

$$n = 3,012 - 0,00254 t^{2,243}$$

Величиной обратной γ ($1/\gamma$) описывают время снижения концентрации вдвое, т. е. $S = 0.5$. Произведение $(\gamma \cdot n)$ является величиной безразмерной и считается своего рода критерием подобия биопроцессов.

Согласно мнению авторов дрожжи при их добавлении в суслу в течение 1,5 – 2-х часов начинают стремительно потреблять кислород, тем самым

в своих клетках аккумулируют значительное количество энергии. На стадии поглощения кислорода наблюдается небольшое потребление субстрата, из-за чего рост взвешенных клеток также замедляется. Дрожжи начинают проявлять высокую активность с того момента, как только повышается степень его потребления субстрата, интенсивность которому придает аэрация пивных дрожжей. Их активность продолжается 3 – 4 суток, затем выпадают в осадок, вследствие чего их концентрация в растворе начинает снижаться, а при $\tau \rightarrow \infty$, согласно Гаусса (4.10):

$$D = ae^{-P}, \quad (4.11)$$

где
$$P = \frac{(e-r)^2}{2c^2}$$

В рамках заданного диапазона выражение (4.10) будет стремиться к нулю. Происходит это вследствие того, что концентрация дрожжей при $\tau \rightarrow \infty$ также будет стремиться к какому-то постоянному значению и это свидетельствует о том, что выражение не способно описать реальные процессы. Однако эта неточность не имеет большой значимости, потому что процесс брожения завершается по происшествию нескольких суток. Экспериментально было доказано, что в процессе производства пива изменяется и объем продуктов, и их плотность.

Анализ результатов исследования плотности, вязкости и теплофизических характеристик (теплопроводность, теплоёмкость, температуропроводность) показал, что при изменении температуры опыта и концентрации сухих веществ в растворе их величина изменяется незначительно. В связи с этим, для получения критериальной зависимости процессов теплового обмена, следует применять средние значения вышеприведенных таблиц путем интерполяции.

4.2. Влияние температуры, количества сухого вещества на изменение теплопроводности продуктов пива, без режима аэрации

В работе показаны итоги опытного изучения теплопроводности компонентов пива в зависимости от температуры (293-333) К и концентрации сухого вещества (0-10) %. На основе экспериментальных данных получено эмпирическое уравнение. Теплопроводность образцов исследования была определена с помощью метода регулярного теплового режима с общей относительной погрешностью при $a = 0,95 \pm 3,5\%$ [143-А,144-А,150-А,155-А].

Хорошо известно, что биосистемы являются саморегулируемыми веществами, т. е. у них есть свойство перестраиваться в зависимости от внешних воздействий так, чтобы сохранился наиболее оптимальный уровень их функционирования.

Восприятие динамических и термодинамических характеристик этих явлений и механизмов можно путем изучения поведения каждого из элементов, входящих в систему, как результат его взаимного влияния с другими элементами. Среди подобных способов наиболее распространено математическое моделирование [143-А,144-А,150-А,155-А].

Основу процессов обмена клеток со средой и внутреннего метаболизма составляет ряд сложных химических реакций во времени и пространстве, которые организованы в сложном порядке. По итогам этих реакций и, связанных с ними процессов, изменяется концентрация составных веществ, численность клеток, биомасса, трансмембранный потенциал клеток и многое другое, что в свою очередь может влиять на процессы тепло- и массообмена. Изменение перечисленных переменных во времени описывает кинетику биологических процессов, основные исходные предпосылки которой практически схожи с химической кинетикой.

В работе [163] рассмотрен простейший пример замкнутой популяции клеток, где одновременно они разлагаются и гибнут и в избытке наблюдается наличие питательных веществ. Таким образом, установление стационарного

состояния в подобной системе может быть определена путем решения кинематической задачи с помощью дифференциальных уравнений, которыми рассчитывают и процесс тепломассообмена в химических реакциях [143-А,144-А,150-А,155-А].

В работе [163] рассмотрена простейшая модель открытой системы. В открытой системе происходит обмен веществами “а”, “в”, “с” с окружающей средой и, кроме того, обратимая реакция первого порядка превращения $a \Leftrightarrow b$. Значения констант скоростей носят обобщенный феноменологический характер и к какой-то определенной стадии биохимического состояния вещества не могут быть соотнесены. Уравнения кинетики для подобной системы имеют вид [143-А,144-А,150-А,155-А].

$$\frac{d_a}{d_t} = K_1(A - a) + K_{-2}b - K_{+2}a = f_1(a, b) \quad (4.12)$$

$$\frac{d_b}{d_t} = K_{+2}a - K_{-2}b - K_3(b - B) = f_2(a, b)$$

Поскольку в стационарном состоянии переменные (a , b) приобретают неизменное состояние, то правые части выражений (4.12) приравняв к нулю получим:

$$\frac{d_a}{d_t} = f_1(a, b) = 0, \quad \frac{d_b}{d_t} = f_2(a, b) = 0 \quad (4.13)$$

найдем стационарные значения a , b .

Понятно, что, если нам будет необходимо учесть все переменные концентрации промежуточных веществ, участвующих даже в самых незначительных биохимических превращениях, количество выражений в модели соответственно увеличится. В связи с этим для успешного исхода анализа следует ввести такое количество уравнений в исходную модель и свести ее к модели, которая состояла бы из минимального количества выражений, способных описать наиболее значимые динамические и термодинамические

свойства системы. Самопроизвольное уменьшение численности выражений недопустимо, поскольку это действие должно укладываться в рамках установленных правил и закономерностей. Иначе можно лишиться наиболее значимых и существенных характеристик изучаемых систем, сделав модель неадекватной.

По итогам опытных исследований продуктов пива автор [85] выполнил комплекс исследований касательно температурной зависимости теплофизических свойств пивного сусла (вязкость, плотность, поверхностное натяжение, коэффициенты тепло- и теплопроводности, теплоемкости), которыми мы воспользовались для получения соответствующих выражений, описывающие и концентрационную зависимость этих характеристик. Исследование концентрационной зависимости выполнялась в пределах от 10 до 70 % с интервалом в 10 % в температурном диапазоне от 293 до 314 К. Соответствующие исследования автором были выполнены при атмосферном давлении, для чего он воспользовался пикнометрическим методом, вискозиметром Гепплера.

Поверхностное натяжение, возникающее на границе между пивным суслом со смесью его паров и воздухом, производилось методом наибольшего давления пузырьков (метод Ребиндера).

Теплопроводность образцов исследовалась с помощью цилиндрического бикалориметра, позволяющий проводить измерения при изменении температуры и давления опыта, [90, 137-139, 156, 159, 164-166, 169 и 170], [143-А, 144-А, 150-А, 155-А] с погрешностью, не превышающей значения 3,2 %.

Предварительно на данной установке были проведены соответствующие контрольные измерения с принятыми эталонными веществами, результаты которых были сопоставлены с литературными [141, 165 и 166]. Сравнение показало хорошее совпадение, что позволило провести необходимые замеры на данной установке.

Автором были исследованы следующие образцы: образец №1–(H₂O + 5 % сусла); образец №2–(H₂O + 6 % сусла); образец №3–(H₂O + 7 % сусла); об-

разец №4 – (H₂O+ 8 % сусла); образец №5 – (H₂O + 9 % сусла); образец №6– (H₂O +10 % сусла).

Таблица 4.4. - Плотность (ρ , кг/м³) концентрированных продуктов пива при различных концентрациях сухого вещества при T=293 К без режима аэрации

x, %	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0
ρ, кг/м³	1017,2	1021,7	1025,9	1030,8	1035,4	1039,9

Согласно таблице 4.4 рост концентрации сухого вещества способствует повышению плотности пивного сусла по линейному закону. Изменение концентрации сухого вещества от 5 – 10 %, увеличивает плотность образцов порядка 2,23 %.

Как видно, из таблиц 4.5 при увеличении температуры от 293 – 333 К увеличивается теплопроводность образца №1 на ~10,3 %, а для образца №6 рост теплопроводности составил ~ 10,2 %. При температуре T = 293 К происходит увеличение концентрации сухого вещества от 5–10 %, теплопроводность уменьшается на 3,97 %, а при T = 333 К это разница будет равна 4,0 %.

Таблица 4.5. - Экспериментальные данные теплопроводности пивного сусла ($\lambda \cdot 10^3$, Вт/(м·К)) при различных температурах и концентрациях сухого вещества без режима аэрации [143-А,144-А,150-А,155-А].

Концентрация, x, %	T, К				
	293	303	313	323	333
5,0	461,1	473,3	485,0	496,7	508,5
6,0	458,1	470,1	481,7	493,4	505,0
7,0	454,5	466,4	477,9	489,5	501,0
8,0	450,9	462,8	474,2	485,8	497,1
9,0	446,9	458,7	470,0	481,4	492,7
10,0	443,5	455,2	466,1	477,7	488,9

Обработка и соответствующее обобщение результатов экспериментов была проведена согласно закону соответственных состояний [90, 137-140, 146, 156, 159, 163, 164-166, 169-171] [143-А,144-А,150-А,155-А]:

$$\frac{\lambda}{\lambda_1} = f\left(\frac{T}{T_1}\right), \quad (4.14)$$

где: λ и λ_1 – теплопроводность образцов при атмосферном давлении без режима аэрации при T и T_1 ; $T_1 = 313$ К.

Выполнимость (4.14) представлена на рисунке 4.4.

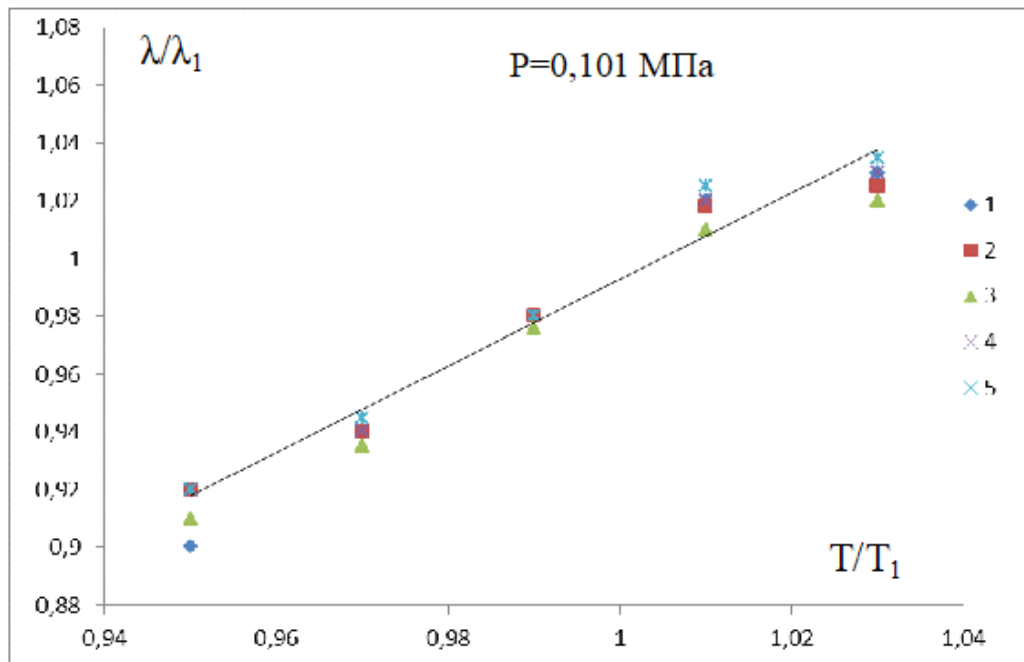


Рисунок 4.4. Зависимость относительной теплопроводности образцов $\left(\frac{\lambda}{\lambda_1}\right)$ от относительной температуры $\left(\frac{T}{T_1}\right)$: 1 – образец №1; 2 – образец №2; 3 – образец №3; 4 – образец №4; 5 – образец №5

Согласно рисунку 4.4 все значения экспериментальных точек на графике соответствуют их прямой, уравнение которой можно записать в виде [90, 137-140,144,145-А,147-А,159-А,165,169-171],[143-А,144-А,150-А,155-А]:

$$\frac{\lambda}{\lambda_1} = \left[0,754 \left(\frac{T}{T_1} \right) + 0,286 \right] \quad (4.15)$$

Анализ значений λ_1 показал, что они представляются в виде функциональной зависимости концентрации сухого вещества (рисунок 4.5).

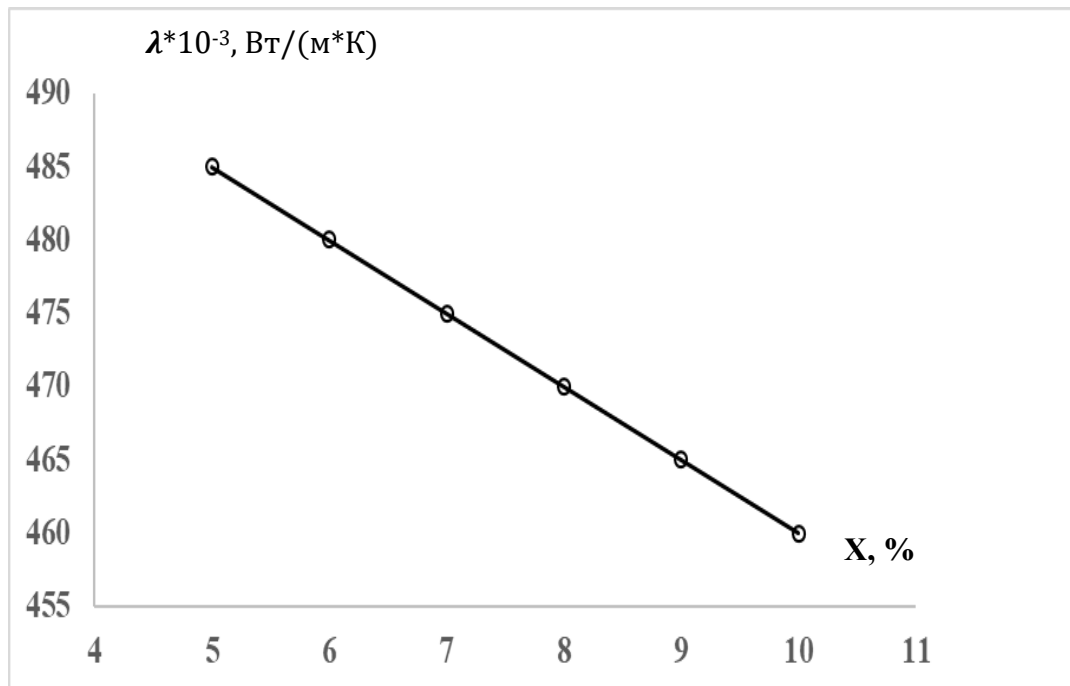


Рисунок 4.5. Зависимость λ_1 от концентрации сухого вещества при температуре 313 К без режима аэрации

Линия графика, изображенная на рисунке 4.5, выглядит следующим образом:

$$\lambda_1 = 0,508 - 0,00376 x, \frac{Вт}{(м \cdot К)} \quad (4.16)$$

Уравнение (4.15) с учетом (4.16) примет вид [90, 137-140, 144, 145-148, 156, 159, 165, 169-171]:

$$\lambda = \left[0,714 \left(\frac{T}{T_1} \right) + 0,286 \right] (0,5038 - 0,00376x), \frac{Вт}{(м \cdot К)} \quad (4.17)$$

Воспользовавшись (4.17) теплопроводность неисследованных продуктов пива, исключая процесс аэрации, можно вычислить с погрешностью до 2,3 %, для чего достаточно располагать значениями концентрации сухого вещества в сусле [143-А, 144-А, 150-А, 155-А].

4.3. Взаимосвязь между теплоемкостью и кинетикой продуктов пива при различной концентрациях сусла без режима аэрации

На качественные показатели пива влияют множество факторов, среди которых процесс аэрации занимает одно из основных мест. Однако, несмотря на степень значимости данного процесса, вопрос о его влиянии до настоящего времени остается открытым.

Цель данной задачи заключается в установлении влияния температуры на кинетику и теплоемкость сырья, не подвергая его предварительной аэрации [142-А,143-А,145-А,146-А,147-А,149-А,156-А,157-А,212-А].

Объекты исследования: солод 1 класса, пивное сусло, пиво, пивные дрожжи штампа РН. Норма дрожжевых клеток, добавляемых в раствор 15 и 25 млн. клеток/мл (из них 3 % мертвых). Исходная экстрактивность сусла соответствовала 11,8 %. Продолжительность сбраживания составляла 7 суток при $t = 11,16$ и 20°C без выполнения режима аэрации семенных дрожжей.

Эксперименты выполнены на базе мини пивзавода ООО “Санет”. Основные качественные показатели исходного сырья и готовой отпускаемой потребителю продукции выполнялось в соответствии с методами установленными государственным стандартом и методиками, с помощью которых выполняется соответствующий контроль в производстве пива. Целью исследования являлось изучение процесса биосинтеза вторичных метаболитов дрожжей. Концентрация высших спиртов была установлена хроматографом Shimadzu GC – 2010, а дрожжевых клеток в камере Горяева с помощью микроскопа, мертвые клетки выявлялись их окраской препаратами раствором метиленовым синим [162, 167 и 168], [142-А,143-А,145-А,146-А,147-А,149-А,156-А,157-А,212-А].

Теплоемкость исследуемых образцов была экспериментально и теоретически изучена, путем использования установок, приведенных в работах [169, 170]. Физические и теплофизические свойства в значительной мере определяют область применения того или иного материала. Их значение осо-

бенно возросло за последнее время в связи с условиями тенденции перехода к высокофорсированным процессам во всех областях техники. Кроме того, все большее значение приобретают различные варианты неиспользования теплофизических, термодинамических и физических свойств материалов для создания новых технологических процессов и аппаратов. В связи с этим получают все более широкое развитие работы в области изыскания новых материалов с заданным комплексом физических и термодинамических свойств [142-А,143-А,145-А,146-А,147-А,149-А,156-А,157-А,212-А].

Экспериментальные установки, которые приведены в работах [150 и 151] успешно использовали для измерения теплоемкости различных материалов, в том числе растворов, смеси газов, чистых органических жидкостей при различных температурах и давлениях. Например, для измерения теплоемкости сыпучих материалов авторами Маджидовым Х., Богдановым А.И., Сафаровым М.М. [170] предложены экспериментальные установки, основанные на методе цилиндрического бикалориметра и α -калориметра [173,174]. Некоторые вышеперечисленные установки или аппаратуры, разработанные аспирантами профессора Сафарова М.М. (как Зарипова М.А., Гуломов М.М., Тагоев С.А., Раджабов Ф.С., Пирмадова М.Д., Анакулов М.М., Зоиров Х.А., Аминов Ш.А., Зарипов Дж. А., Тиллоева Т.Р., Хушвахтов А.А., Содыков Х.С., Шарифов Д.А. и др.) использованы для измерения теплоемкости образцов (наноразмерные частицы + теплоносители или топлива и др.).

Докторами и кандидатами наук Зариповой М.А., Анакуловым М.М., Зоировым Х.А., Зариповым Дж.А., Хушвахтовым А.А., Содыковым Х.С., Едалиевой З.Н., Тиллоевой Т.Р., Гуломовым М.М., Мирзомамадовым А.Г., Мирзоевой К., Абдужалилзода Ф., Назруллоевым А.С. и др. полученные экспериментальные данные были оформлены в виде докторских и кандидатских диссертаций и представлены в Диссертационный совет г. Казань и Томска. Д.т.н. Юсупов Ш.Т., Зарипова М.А. и Гуломов М.М., Давлатов Н.Б., Тиллоева Т.Р. и др., используя экспериментальные установки при выполнении докторских диссертаций, успешно защитились с 2002 г. по 2023г. в ДС КАИ им.

А.Н. Туполева (председатель д.т.н., профессор Гортышов Ю.Ф.). Надо отметить, что в теплофизической школе, которую организовал в республике профессор Сафаров М.М., в настоящее время под его руководством защитили докторские диссертации одиннадцать соискателей (Кобулиев З.В., Юсупов Ш.Т., Зарипова М.А., Собиров Дж.Ф., Гуломов М.М. и др.) и более 50 кандидатские диссертации. Автор данной работы под руководством Сафарова М.М. подключился к изучению физических, теплофизических и термодинамических свойств продуктов пива в зависимости от температуры (298,3 – 378,5 К) при атмосферном давлении, а также автором проведены экспериментальные работы теплоемкости продуктов пива (вода + сусло) при различных температурах и давлениях, которые будут предметом обсуждения очередной статьи. В данной работе представлены результаты измерения теплоемкости продуктов пива (вода + разные концентрации сусла) при атмосферном давлении и связь с кинетикой разложения сусла при брожении без режима аэрации. Удельную изобарную теплоемкость материалов обычно определяют экспериментальными методами (адиабатический, монотонный разогрев, регулярный тепловой режим), их значение получают косвенным методом или аддитивным принципом. Для косвенных определений теплоемкости объектов обычно разрабатывают или используют две или три экспериментальные установки для измерения теплоемкости, теплопроводности и температуропроводности при различных параметрах состояния, а затем рассчитывают теплоемкость C_p образцов следующим выражением [90, 137-140, 143, 146-148, 150, 152, 157, 158, 159-161]:

$$C_p = \frac{\lambda}{a\rho} \cdot \frac{Dж}{(кг \cdot К)} \quad (4.18)$$

где: λ – теплопроводность, Вт/ (м.К); a – температуропроводность, м²/с; ρ – плотность, кг/м³ при различных температурах и давлениях. Теплоемкость образцов изучена на установке, которая была разработана профессором Сафаровым М.М. и его учениками [185], основными элементами которой являют-

ся цилиндрический бикалориметр (из меди), пережимной сосуд высокого давления, манометр грузопоршневой типа МП – 2500 классом точности 0,01. Ширина заполняемого образцом пространства, находящегося между металлической трубкой соответствует 3,5 мм. Погрешность измерения на данной установке при $\alpha = 0,95$ оценивается в 2,8 %.

Для измерения перепада температур и температуры опыта была использована дифференциальная хромель – алюмелевая термопара. После успешного тестирования опытного устройства эталонными веществами (толуол, вода, Н-гексан и др.) нами были проведены опыты с исследуемыми образцами. Результаты контрольных измерений совпадают с литературными данными в пределах погрешности опыта. Результаты экспериментального исследования представлены в таблице 4.6.

Таблица 4.6. - Теплоемкость (C_p , Дж/(кг·К)) продуктов пива (вода+сусло) в зависимости от температуры концентрации сусла при атмосферном давлении, без режима аэрации

Об- разцы Т,К	H ₂ O	H ₂ O+5 % сусло	H ₂ O+6 % сусло	H ₂ O+7 % сусло	H ₂ O+8 % сусло	H ₂ O+9 % сусло	H ₂ O+10 % Сусло
298,3	3993	3554	3450	3340	3290	3160	3090
308,6	3961	3740	3610	3500	3406	3263	3200
318,9	4130	3934	3800	3682	3584	3334	3270
328,4	4370	4192	4050	3900	3800	3650	3443
337,6	4630	4440	4300	4132	4040	3860	3690
348,0	4960	4820	4630	4410	4300	4150	3948
358,4	5350	5200	5030	4840	4680	4510	4330
368,2	5780	5600	5460	5244	5080	4936	4760
378,5	6240	6030	5875	5700	5558	5360	5240

Как видно, из таблицы 4.6. с ростом температуры теплоемкость увеличивается, а с увеличением концентрации сула – уменьшается по линейному закону. Например, при температуре $T = 298,3$ К теплоемкость при добавке 10 % сула воды уменьшается на $\sim 22,6$ %, а при температуре $T = 378,5$ К это изменение доходит до $\sim 16,0$ %.

Надо отметить, что экспериментальные работы проведены в равновесных условиях, имеется ввиду тепловое, механическое равновесие. Изменение шага температуры в экспериментах равнялось $\sim (8-10$ К). Для инженерных расчетов, т.е. расчета отдельных конструкций пивоваренных аппаратур, необходимо рассчитать процесс тепломассообмена. Для расчета технологических процессов обычно используют дифференциальное уравнение первого и второго порядка (уравнение теплопроводности). Для выравнивания уравнения теплопроводности необходимо знать константы теплофизических характеристик материалов, из которых изготовлены технологические конструкции. Пивоваренные аппаратуры изготавливаются из нержавеющей стали, титана, меди или алюминия.

Теплофизические характеристики вышеперечисленных материалов при различных температурах изучены достаточно хорошо [186-190]. Если технологические конструкции (т.е. аппаратуры) изготавливались из сплавов или оксидов, то их теплофизические характеристики можно найти в работах [188, 191-196]. Так как расчет конструкции проводится однородным материалом, но внутри ячейки имеются продукты пива. Поэтому для расчета процесса тепломассопереноса необходимо знать теплофизические и термодинамические свойства этих продуктов. В связи с этим автор перед собой ставил задачу экспериментальными методами провести измерения теплоемкости и на его основе рассчитать все термодинамические характеристики (т.е. энтропию, энтальпию, энергию Гиббса, энергию Гельмгольца и др.).

Обработка результатов экспериментов по теплоемкости нами выполнена с помощью [90, 137-140, 143, 146-148, 150, 157, 158, 159]:

$$\frac{C_p}{C_p^*} = f\left(\frac{T}{T_1}\right), \quad (4.19)$$

где C_p и C_p^* - удельная изобарная теплоемкость растворов без режима аэрации при температуре T и T_1 : $T_1 = 337$ К.

Данные изменения показаны в графическом виде на рисунке 4.6.

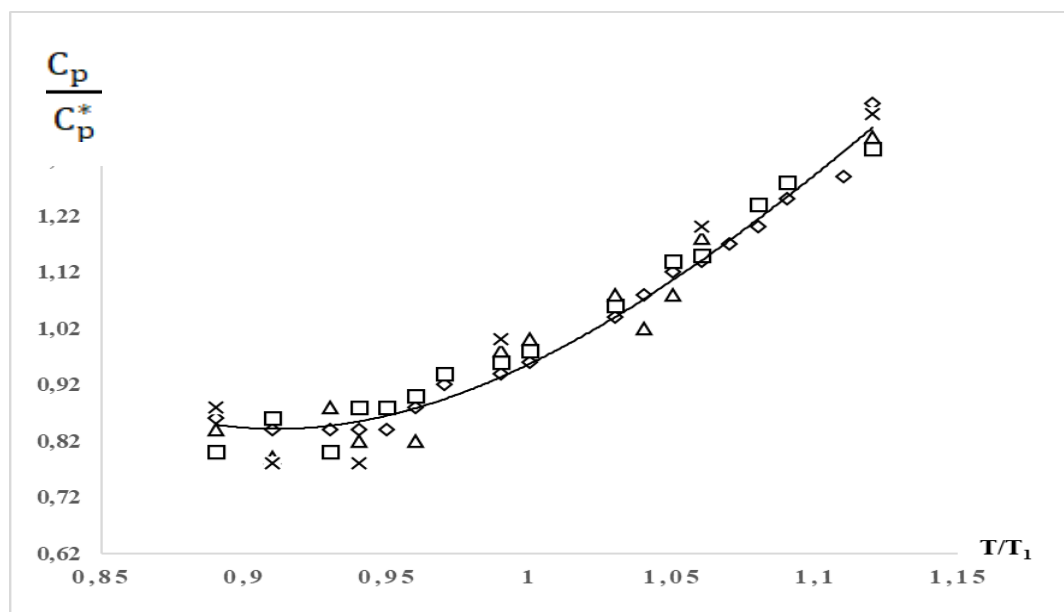


Рисунок 4.6. Зависимость относительной теплоемкости пивного сусла $\left(\frac{C_p}{C_p^*}\right)$ от относительной температуры $\left(\frac{T}{T_1}\right)$: 1 – H_2O ; 2 – $H_2O+5\%$ сусла; 3 – $H_2O+6\%$ сусла; 4 – $H_2O+7\%$ сусла; 5 – $H_2O+8\%$ сусла; 6 – $H_2O+9\%$ сусла; 7 – $H_2O+10\%$ сусла

В соответствии с графиком (рисунок 4.6), все экспериментальные данные хорошо повторяют ее кривую, которая имеет уравнение второго порядка [90, 137-140, 143, 146-148, 150, 157, 158, 159]:

$$\frac{C_p}{C_p^*} = 8,7\left(\frac{T}{T_1}\right)^2 - 15,1\left(\frac{T}{T_1}\right) + 7,38 \quad (4.20)$$

Анализ значения C_p^* позволил установить, что оно представляет собой концентрацию сусла ($n_{сус}$) (рисунок 4.7).

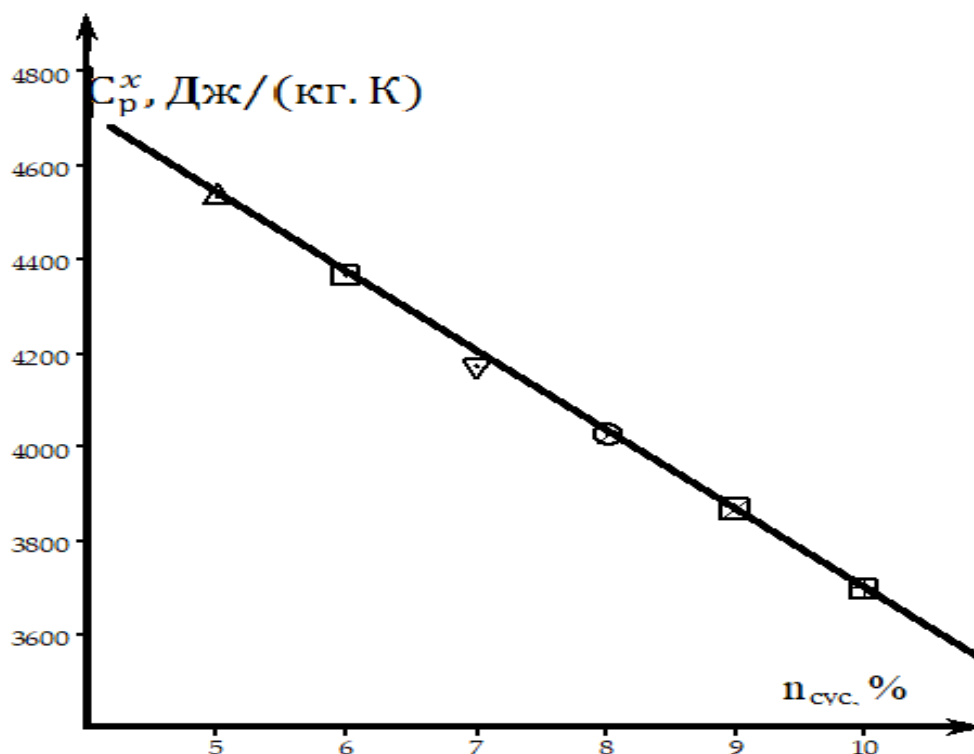


Рисунок 4.7. Зависимость C_p^* от концентрации сусла (n_{cyc}). Значение n_{cyc} берется в %

Прямая линия приведенная на рисунке 4.7 описывается уравнением:

$$C_p^* = 5400 - 172 n_{cyc}. \quad (4.21)$$

Из уравнения (4.20) и (4.21) получим [90, 137-140, 143, 146-148, 150, 157, 158, 159]:

$$C_p = \left[8,7 \left(\frac{T}{T_1} \right)^2 - 15,1 \left(\frac{T}{T_1} \right) + 7,38 \right] (5400 - 172 n_{cyc}) 0 \frac{\text{Дж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}, \quad (4.22)$$

Эмпирическое выражение (4.22) можно использовать для расчета температурной зависимости теплоемкости неизученных продуктов пива с погрешностью до 3 %. Для чего достаточно обладать значениями концентрации сусла (n_{cyc}) и температуры.

4.4. Теплоемкость и энтальпия системы продуктов пива в зависимости от температуры и давления без режима аэрации

В литературе приведена информация о степени влияния кислорода на отдельных этапах приготовления пива. На основании их анализа можно заключить, что исследование в рамках изучения термодинамических свойств продуктов пива, является актуальным.

Автором [148] представлены результаты экспериментального исследования по кинетике потребления кислорода со стороны клеток при аэрации в условиях 11° С. Согласно автору интенсивность кислородопотребления клетками фиксируется в первые 1,5 – 2 часа, скорость которого с ростом температуры также растет. Численное значение параметра γ приведено в таблице 3.3. [148].

Условия аэрации оказывают влияние на результаты опытов по теплоемкости и энтальпии.

Теплоемкость была исследована при концентрации сусле до 10 %, для чего была применена установка профессора Сафарова М.М., а с изменением температуры и давления опыта этот параметр был изучен на измерителе комплекса ТФС, в основе работы которого лежит метод цилиндрического *a*-калориметра регулярного теплового режима 1-го рода [19-21, 90, 137-140].

В отличие от МСТ – 64 (международные скелетные таблицы), диапазон давлений которых составлял от 0 до 50 МПа и температур от 0 до 700° С, в новом стандарте эти параметры были увеличены до 100 МПа и до 800° С [203,211]. Относительная погрешность метода измерения теплоемкости согласно рекомендациям [204] соответствует 3,6 %.

В новейшей технологии соответственно стали применяться новые способы экспериментальных исследований ТФС веществ, среди которых особое место занимают методы периодического нагрева (МГУ) [205] и неразрушающего теплового контроля (НТК) [205-208, 212]. Также существуют и комплексные экспресс методы, которые использованы Г. Кименовым, Г. Раичко-

вым и др. [209,210]. Важным моментом является тот факт, что метод дает возможность определять характеристики веществ с заранее заданной точностью. Подобной тематике, т.е. методикам исследования ТФС различных веществ, посвящены ряд научных трудов, конференций и научных журналов.

Согласно сказанному теплоемкость компонентов пива ($H_2O + \text{сусла}$) экспериментально была исследована методом a -калориметра при тепловом и механическом равновесии (таблица 4.7). Шаг, с которым изменялась температура опыта, составлял $8 - 10^\circ C$, а по давлению $10 - 50 \text{ МПа}$, с образцами не подверженных аэрации. Образцы исследования были приготовлены механическим способом. Образец №1 – ($H_2O + 5 \%$ сусла); образец №2 – ($H_2O + 6 \%$ сусла); образец №3 – ($H_2O + 7 \%$ сусла); образец №4 – ($H_2O + 8 \%$ сусла); образец №5 – ($H_2O + 9 \%$ сусла); образец №6 – ($H_2O + 10 \%$ сусла).

Таблица 4.7. - Теплоемкость $\left(C_p, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right)$ продуктов пива в зависимости от температуры и давления без режима аэрации

Образец №1 – ($H_2O + 5 \%$ сусла)

$p, \text{ МПа}$ $T, \text{ К}$	0,101	1,96	2,94	3,92	4,91	5,88	9,81
298,3	3554	3490	3380	3300	3220	3140	3060
308,6	3740	3610	3506	3402	3300	3240	3103
318,9	3934	3750	3708	3624	3509	3410	3300
328,4	4192	4075	3970	3880	3760	3680	3530
338,6	4440	4342	4254	4164	4032	3912	3832
348,0	4820	4700	4582	4500	4403	4300	4180
358,4	5200	5100	5000	4900	4800	4660	4550
368,2	5600	5500	5400	5300	5200	5100	4940
378,5	6030	5930	5800	5700	5560	5500	5350

Образец №2 – ($H_2O + 6 \%$ сусла)

$p, \text{ МПа}$ $T, \text{ К}$	0,101	1,96	2,94	3,92	4,91	5,88	9,81
298,3	3450	3382	3260	3160	3040	2930	2840
308,6	3610	3520	3420	3300	3207	3100	3000
318,9	3800	3700	3600	3490	3350	3220	3102
328,4	4050	3900	3806	3700	3600	3430	3310
338,6	4300	4200	4100	3980	3830	3700	3520
348,0	4630	4500	4400	4300	4108	3990	3880
358,4	5030	4900	4806	4630	4500	4400	4250

368,2	5460	5330	5200	5100	5080	4830	4700
378,5	5875	5740	5638	5500	5400	5260	5130

Образец №3 – (H₂O + 7 % суслу)

p, МПа T, К	0,101	1,96	2,94	3,92	4,91	5,88	9,81
298,3	3340	3280	3160	3075	2940	2830	2710
308,4	3500	3400	3300	3275	3030	2936	2790
318,7	3682	3566	3450	3330	3210	3080	2918
328,5	3900	3801	3620	3525	3406	3204	3140
338,7	4132	4006	3870	3760	3620	3466	3340
348,3	4410	4270	4140	4006	3880	3758	3600
358,6	4840	4630	4480	4308	4176	4030	3885
368,2	5244	5060	4900	4710	4580	4400	4260
378,6	5700	5520	5380	5220	5050	4900	4720

Образец №4 – (H₂O + 8 % суслу)

p, МПа T, К	0,101	1,96	2,94	3,92	4,91	5,88	9,81
298,3	3290	3200	3100	3000	2880	2760	2550
308,7	3406	3270	3160	3040	2930	2800	2710
318,6	3584	3430	3320	3200	3080	2960	2840
328,5	3800	3660	3560	3470	3330	3220	3100
338,7	4040	3910	3805	3720	3600	3510	3400
348,6	4300	4180	4080	4000	3890	3760	3630
358,7	4680	4539	4400	4300	4200	4104	3980
368,4	5080	4940	4800	4715	4610	4506	4400
378,6	5558	5400	5300	5160	5050	4930	4800

Образец №5 – (H₂O + 9 % суслу)

p, МПа T, К	0,101	1,96	2,94	3,92	4,91	5,88	9,81
298,4	3160	3050	2960	2880	2765	2680	2460
308,7	3263	3130	3056	2940	2810	2700	2620
318,8	3404	3270	3160	3060	2930	2840	2700
328,5	3650	3500	3370	3300	3160	3016	2900
338,6	3860	3730	3630	3540	3410	3260	3170
348,7	4150	4020	3925	3728	3674	3530	3440
358,8	4510	4400	4300	4200	4110	3885	3720
368,9	4936	4800	4680	4575	4400	4250	4110
378,7	5360	5280	5106	5000	4850	4700	4509

Образец №6 – (H₂O + 10 % сусла)

p, МПа T, К	0,101	1,96	2,94	3,92	4,91	5,88	9,81
298,3	3090	3000	2900	2820	2700	2590	2400
308,6	3200	3080	2950	2840	2720	2614	2450
318,7	3270	3182	3085	2960	2808	2700	2570
328,5	3443	3310	3200	3090	2980	2840	2710
337,9	3690	3560	3450	3330	3180	3042	2918
348,5	3948	3863	3748	3600	3484	3330	3180
358,4	4330	4200	4070	3930	3800	3660	3475
368,9	4760	4580	4420	4300	4160	4000	3850
378,4	5240	5000	4850	4700	4574	4410	4230

Согласно тем данным, которые представлены в таблице 4.7, теплоемкость компонентов пива с повышением температуры возрастает, а повышение давления и концентрации сусла в образцах, наоборот, становится причиной ее уменьшения. Например, добавка 10 % сусла в воду при $T = 298,3$ К и $p = 0,101$ МПа, приводит к уменьшению теплоемкости на 24,9 %, а при этом же давлении ($p = 0,101$ МПа) и температуре $T = 378,5$ К эта разница будет равна ~16,0 %. Как выше отмечалось теплоемкость с ростом давления уменьшается. Например, для образца №4 (H₂O + 8 % сусла) при $T = 298,2$ К теплоемкость уменьшается на ~ 22,5%, а при $T = 378,6$ К это изменение доходит до ~13,6 %.

Если повысить температуру от 298,3 до 378,4 К ($p = 0,101$ МПа) для образца №6 (H₂O + 10 % сусла) его теплоемкость повысится на 69,6 %, а при давлении $P = 9,81$ МПа и в том же диапазоне изменения температуры теплоемкость повысится на 76,3 %. Располагая значениями теплоемкости образцов на основе ниже представленной формулы нами произведен расчет разности их энтальпий (таблица 4.8) [211, 212]:

$$\Delta H = \Delta H_0 + \int_{T_0}^T C_p \cdot dT, \text{ Дж/кг}, \quad (4.23)$$

или

$$\Delta H = \int_{T_0}^T C_p \cdot dT, \text{ Дж/кг}, \quad (4.24)$$

где, C_p – удельная изобарная теплоемкость, Дж/(кг·К).

Таблица 4.8. - Разность энтальпии продуктов пива в зависимости от температуры и давления

Образец №1 – (H₂O + 5 % сусла)

p, МПа T, К	0,101	1,96	2,94	3,92	4,91	5,88	9,81
298,3	-	-	-	-	-	-	-
308,6	38,52	37,18	36,11	35,04	33,99	33,37	31,96
318,9	38,52	38,63	38,19	37,33	36,14	35,12	33,99
328,4	37,33	35,63	35,23	34,43	33,34	32,39	31,35
338,6	43,59	42,38	41,29	40,35	39,10	38,27	36,71
348,0	41,74	40,81	40,41	39,14	37,90	36,77	36,02
358,4	50,13	48,88	47,65	46,80	45,79	44,72	43,47
368,2	50,96	49,98	49,00	48,02	47,04	45,67	44,59
378,5	57,68	56,65	55,62	-	-	-	-

Образец №2 – (H₂O + 6 % сусла)

p, МПа T, К	0,101	1,96	2,94	3,92	4,91	5,88	9,81
298,3	-	-	-	-	-	-	-
308,6	31,18	36,26	35,23	33,99	33,03	31,93	30,90
318,9	39,14	38,11	37,08	35,95	34,51	33,17	31,95
328,4	38,48	37,05	34,20	35,15	34,20	32,59	31,45
338,6	41,31	39,78	41,82	40,59	33,07	37,74	35,90
348,0	43,99	42,30	41,36	40,42	38,61	37,51	36,47
358,4	52,31	50,96	49,98	48,15	46,80	45,76	44,20
368,2	53,51	52,23	50,96	49,98	49,78	47,33	46,06
378,5	60,51	59,12	58,07	56,65	55,62	54,18	52,84

Образец №3 – (H₂O + 7 % сусла)

p, МПа T, К	0,101	1,96	2,94	3,92	4,91	5,88	9,81
298,2	-	-	-	-	-	-	-
308,4	35,70	34,68	33,66	33,41	30,91	29,95	28,46
318,7	37,92	36,73	35,54	34,29	33,06	31,72	30,06
328,5	38,22	37,25	35,48	34,54	33,38	31,39	30,77
338,7	39,67	38,46	34,75	33,84	34,75	33,27	32,06
348,3	45,42	43,98	42,64	41,26	39,96	38,71	37,08

358,6	46,46	44,45	43,01	41,36	40,09	38,69	37,29
368,2	50,34	48,58	47,04	45,22	43,97	42,24	40,89
378,6	59,28	57,41	55,95	54,29	52,52	50,96	49,09

Образец №4 – (H₂O + 8 % сусла)

p, МПа T, К	0,101	1,96	2,94	3,92	4,91	5,88	9,81
298,2	-	-	-	-	-	-	-
308,7	35,76	34,34	33,18	31,92	30,77	29,40	28,46
318,6	35,48	33,96	32,87	31,68	30,49	29,30	28,12
328,5	37,62	36,23	35,24	34,35	32,97	31,88	30,69
338,7	39,99	38,71	37,67	36,83	35,64	34,75	33,66
348,6	43,43	42,22	41,21	40,40	39,29	37,98	36,66
358,7	43,21	44,03	42,68	41,74	40,74	39,81	38,61
368,4	49,28	47,92	46,56	45,74	44,72	43,71	42,68
378,6	56,69	55,08	54,06	52,63	51,51	50,29	48,96

Образец №5 – (H₂O + 9 % сусла)

p, МПа T, К	0,101	1,96	2,94	3,92	4,91	5,88	9,81
298,4	-	-	-	-	-	-	-
308,7	33,61	32,24	31,48	30,28	28,94	27,81	26,99
318,8	34,38	33,03	31,91	30,91	29,59	28,68	27,27
328,5	35,41	33,95	32,69	32,01	30,65	29,25	28,13
338,6	38,99	37,67	36,66	35,75	34,44	32,93	32,01
348,7	41,92	40,60	39,64	37,65	37,11	35,65	34,74
358,8	45,55	44,44	43,43	42,42	41,51	39,24	37,57
368,9	49,85	48,48	47,27	46,21	44,44	42,93	41,51
378,7	52,53	51,74	50,04	49,00	47,53	46,06	44,19

Образец №6 – (H₂O + 10 % сусла)

p, МПа T, К	0,101	1,96	2,94	3,92	4,91	5,88	9,81
298,3	-	-	-	-	-	-	-
308,6	32,96	31,72	30,39	29,25	28,02	26,92	25,24
318,7	33,03	32,14	31,16	29,89	28,36	27,27	25,96
328,5	33,74	32,44	31,36	31,21	29,09	27,83	26,56
337,9	34,69	33,46	32,43	31,30	29,89	28,59	27,43
348,5	41,85	40,95	39,73	38,16	36,93	35,29	33,71
358,4	42,87	41,58	40,29	38,91	37,62	37,62	34,40
368,9	49,98	48,09	46,41	45,15	43,68	42,00	40,42
378,4	49,78	47,50	46,08	44,65	43,45	41,89	40,19

По представленным данным в таблице 4.8 можно сказать, что разность энтальпии образцов при повышении температуры также повышается и, наоборот, понижается с ростом давления. Введение до 10 % суслу в воду приводит к снижению энтальпии компонентов пива. Например, для образца №5 ($\text{H}_2\text{O} + 9\%$ суслу) при температуре $T_1 = 308,7\text{ К}$ энтальпия уменьшается до 19,7 %, а при $T_2 = 378,7\text{ К}$, это изменение доходит до 15,9 %. Когда $p=0,101\text{ МПа}$ (образец №1 $\text{H}_2\text{O} + 5\%$ суслу), при увеличении температуры до 378,5 К энтальпия растет до $\sim 49,8\%$, при данном давлении (образец №6 $\text{H}_2\text{O}+10\%$ суслу) в приведенном интервале температур разность энтальпии увеличивается на $\sim 51,0\%$.

Обработка опытных данных по теплоемкости и энтальпии компонентов пива нами осуществлялась при помощи [90, 137-140, 143, 146-148, 150, 157-159]:

$$\frac{C_p}{C_p^*} = f\left(\frac{T}{T_1}\right), \quad (4.25)$$

$$\frac{\Delta H}{\Delta H^*} = f\left(\frac{T}{T_1}\right), \quad (4.26)$$

где, C_p , ΔH , C_p^* , ΔH^* - теплоемкость и разность энтальпии при различных температурах и давлениях и при $T_1 = 337\text{ К}$ соответственно.

Выполнимость функциональной зависимости (4.25) изображено на рисунке 4.8.

Анализом значений C_p^* было установлено, что они являются функциями давления (рисунок 4.9). Рисунок 4.8 иллюстрирует график, который можно записать в виде уравнения второго порядка [90, 137-140, 143, 146-148, 150, 157-159]:

$$\frac{C_p}{C_p^2} \left[8,7\left(\frac{T}{T_1}\right)^2 - 15,1\left(\frac{T}{T_1}\right) + 7,38 \right] \quad (4.27)$$

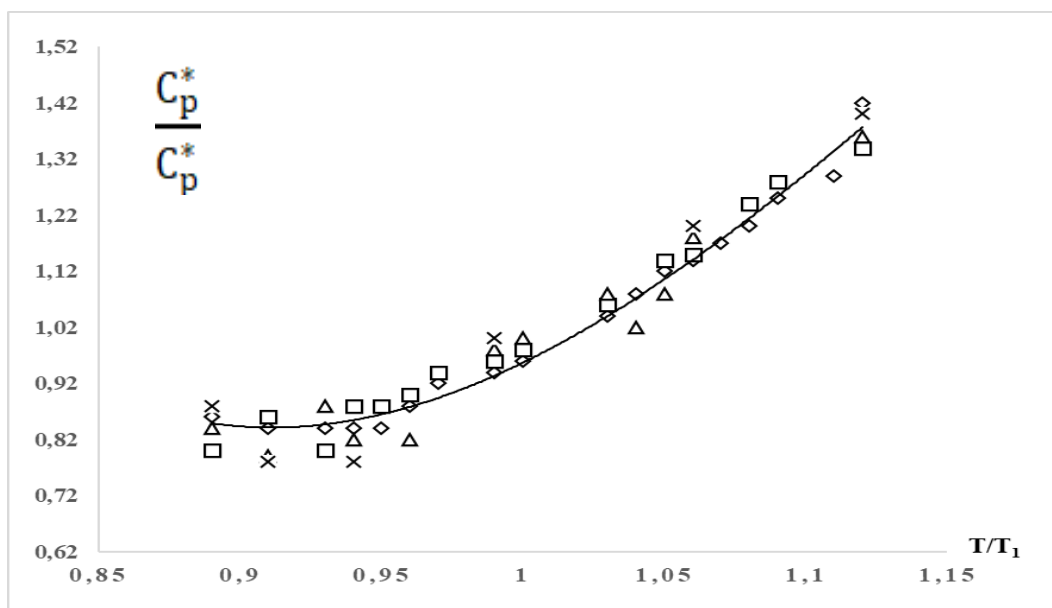


Рисунок 4.8. Зависимость относительной теплоемкости (C_p/C_p^*) от относительной температуры (T/T_1) продуктов пива при различных давлениях без режима аэрации: 1—образец №1; 2 – образец №2; 3 – образец №3; 4 – образец №4; 5 – образец №5; 6 – образец №6

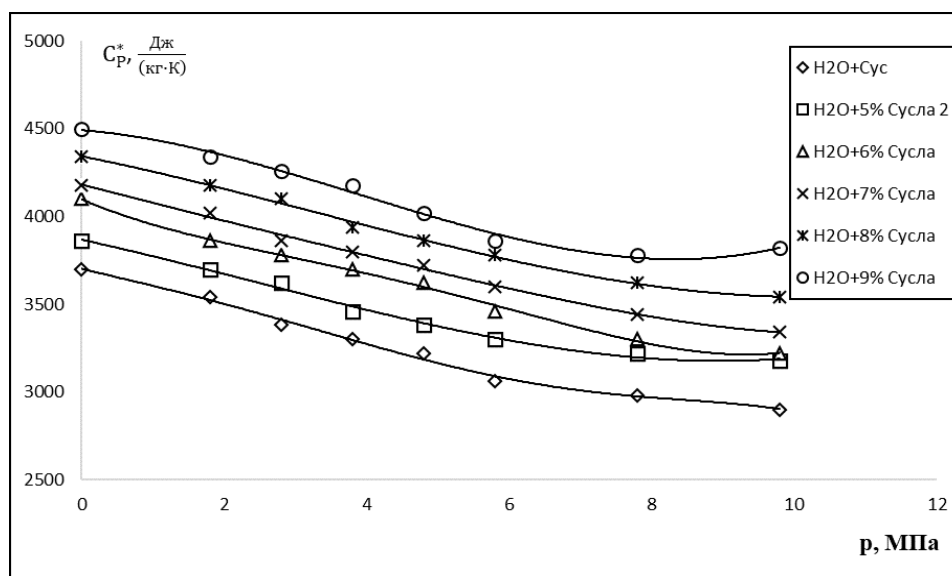


Рисунок 4.9. Зависимость C_p^* от давления (p , МПа) для образца №3: (см. рисунок 4.8)

Согласно вышеизложенному, строится график функциональной зависимости теплоемкости C_p^* (рисунок 4.10) от изменения давления [143, 146-148, 150, 157-159]:

$$\frac{C_p}{C_p^*} = f\left(\frac{P}{P_1}\right) \quad (4.28)$$

Выполнимость (4.27) представлена на рисунке 4.10.

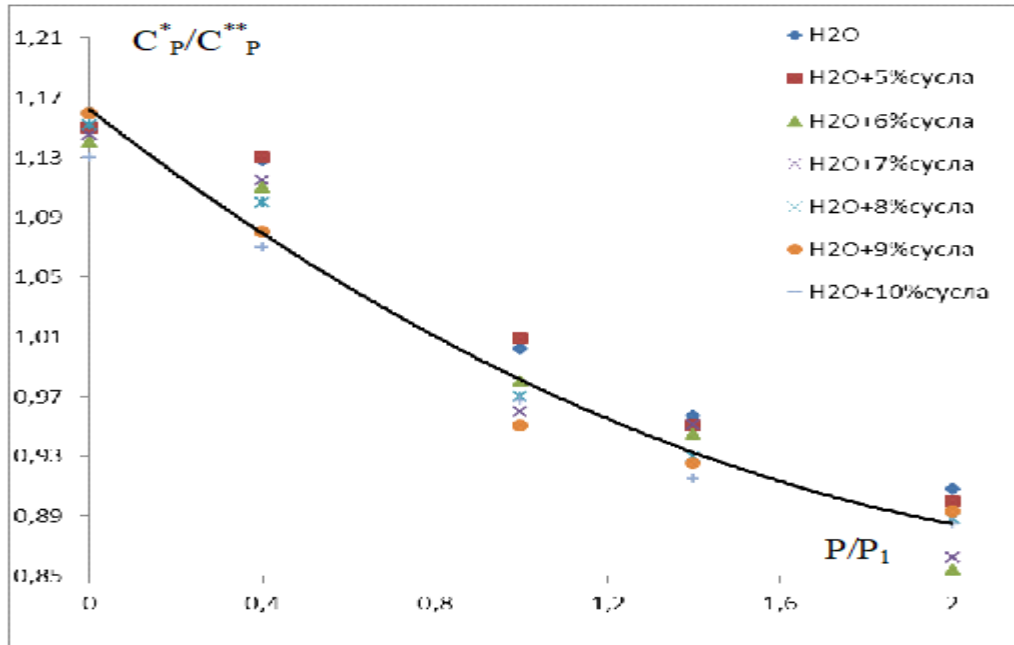


Рисунок 4.10. Зависимость относительной теплоемкости (C_p^*/C_p^{**}) от относительного давления (P/P_1) для образцов продуктов пива без режима аэрации: Обозначение как на рисунке 4.7

Соответствующее уравнение кривой (рисунок 4.10) имеет вид [90, 137-140, 143, 146-148, 150, 157-159]:

$$\frac{C_p}{C_p^{**}} = \left[0,032 \left(\frac{P}{P_1} \right)^2 - 0,19 \left(\frac{P}{P_1} \right) + 1,16 \right], \quad (4.29)$$

Анализ значений C_p^{**} позволил установить, что они представляют собой функцию концентрации $n_{\text{сусла}}$ – (рисунок 4.11).

Уравнение прямой (рисунок 4.11) имеет вид:

$$C_p^{**} = 4920 - 172 n_{\text{сусла}}, \quad (4.30)$$

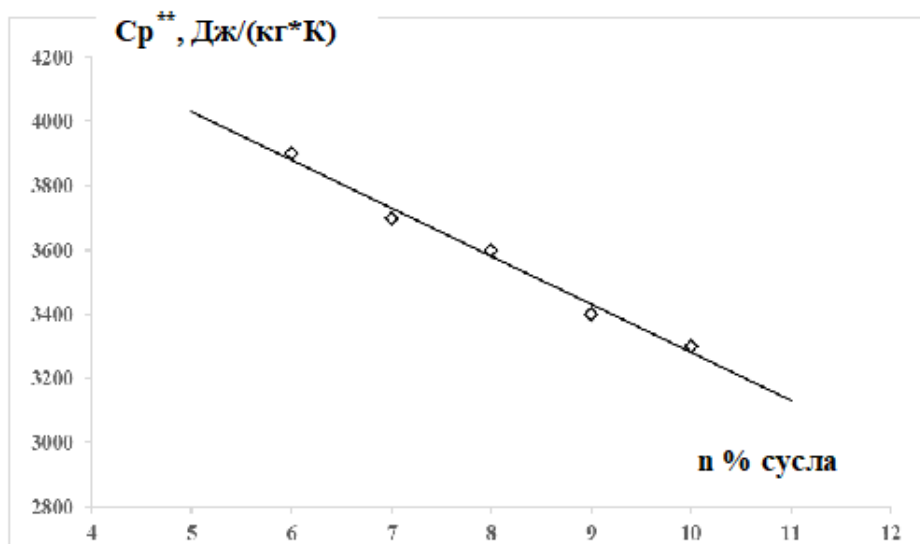


Рисунок 4.11. Зависимость теплоемкости C_p^{} от концентрации суслу, образцов для приготовления пива без режима аэрации: Обозначение как на рисунке 4.9**

С помощью выражения (4.28), (4.29) и (4.30) выражение преобразуется в следующий вид [90, 137-140, 143, 146-148, 150, 157-159]:

$$C_p = \left\{ 8,7 \left(\frac{T}{T_1} \right)^2 - 15,1 \left(\frac{T}{T_1} \right) + 7,38 \right\} \left[0,032 \left(\frac{P}{P_1} \right)^2 - 0,19 \left(\frac{P}{P_1} \right) + 1,16 \right] \cdot (4920 - 172n_{\text{суслу}}) \cdot \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \quad (4.31)$$

Этим выражением можно вычислить теплоемкость компонентов пива, минуя процесс аэрации семенных дрожжей с погрешностью до 2,8 %. Всего лишь необходимо знать концентрацию добавляемого суслу и наполнителя.

4.5. Уравнение состояния исследуемых образцов

Используя данные по плотности изучаемых веществ с изменением температуры и давления в соответствующей плоскости (p/ρ^2 , ρ^6) линии $T = \text{const}$ [32, 39, 45, 48, 64, 90, 98, 101, 108, 137-140, 146, 150, 165, 169, 202, 203] получим:

$$p/\rho^2 = f(\rho^6) \quad (4.32)$$

Выполнимость (4.32) графически представлена на рисунке 4.12, согласно которому при $T = \text{const}$ полученные данные подчиняются закону

прямой линии [32, 39, 45, 48, 64, 90, 98, 101, 108, 137-140, 146, 150, 165, 169, 202, 203]:

$$p = A(p) \rho^2 + B(p) \rho^8 \quad (4.33)$$

где, P – внешнее давление, Па; ρ – плотность, кг/м³; $A(p)$ и $B(p)$ – коэффициенты уравнения.

Коэффициенты $A(p)$ и $B(p)$ для каждой из изобар определяются методом наименьших квадратов и графоаналитическим анализом (погрешность 0,01- 0,14%) на основе полиномы второй степени:

$$A(p) = \sum_0^3 a_i p^i \text{ и } B(p) = \sum_0^3 b_i p^i \quad (4.34)$$

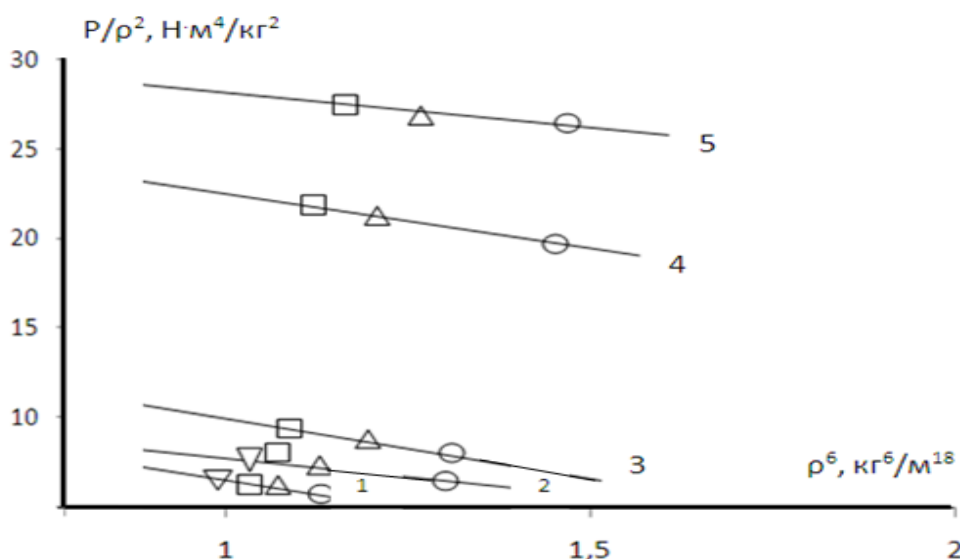


Рисунок 4.12. Зависимость (p/ρ^2) от ρ^6 для продуктов пива, при различных давлениях: 1-0,101; 2-4,91; 3-9,81; 4-19,62; 5-29,43 МПа.

Из (4.34) и (4.33) получим:

$$p = \sum_0^3 a_i T^i \rho^2 + \sum_0^3 b_i T^i \rho^8 \quad (4.35)$$

При сравнении расчетов данным способом и экспериментальных данных проявляется удовлетворительная согласованность между собой с погрешностью до 0,13 %.

4.6. Применение уравнения типа Гейга для расчета плотности продуктов пива

Плотность составных компонентов пива определялась следующим образом [90, 120, 137-140, 153, 157, 187, 188, 206, 207]:

$$\frac{\rho - \rho_0}{\rho} = C \ln \left[\frac{B + P}{B + P_0} \right] \quad (4.36)$$

где ρ_0 – плотность образцов при $p_0 = 4,91$ МПа; ρ – плотность образцов при давлении P ; C и B – коэффициенты.

Данные опытов по плотности жидких составных продуктов пива с изменением температуры и давления обрабатывались в виде:

$$\left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_T = f(P) \quad (4.37)$$

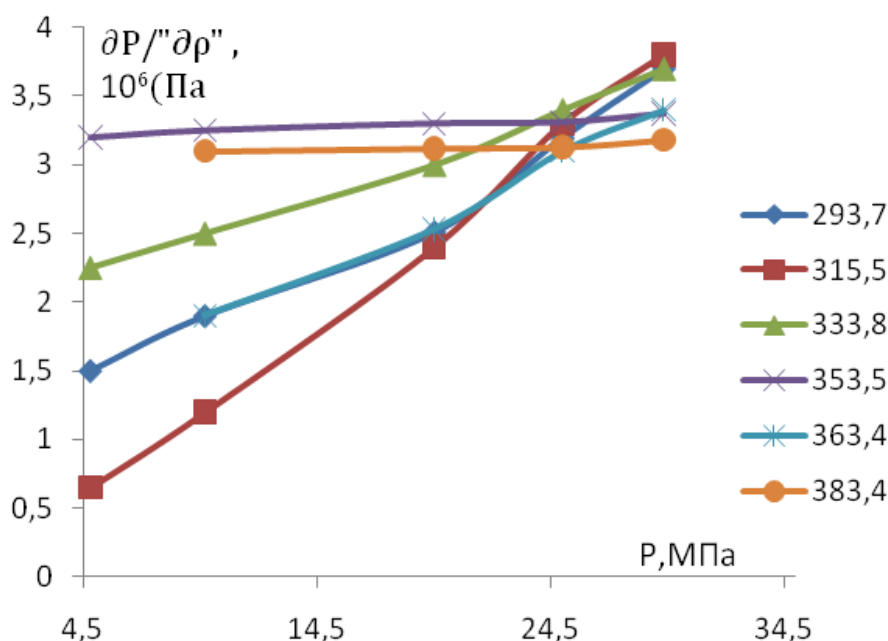


Рисунок 4.13. Зависимость $(\partial P / \partial \rho)_T = f(P)$ для продуктов пива: 1– 293,7К; 2– 315,5К; 3 – 333,8К; 4 -353,5К; 5 – 363,4К; 6 – 383,4К

Выполнимость зависимости (4.37) графически изображена на рисунке 4.13, согласно которому линии $T = \text{const}$ являются прямыми и подчиняются [90, 137-139]:

$$-\left(\frac{\partial P}{\partial \rho}\right)_T = \frac{B}{C} + \frac{P}{C} \quad (4.38)$$

где, p – внешнее давление, МПа; ρ - плотность, кг/м³.

Анализом коэффициентов B и C из (4.37) выявлено, что они есть функция температуры (таблица 4.9), т.е. $B = f_1(T)$; $C = f_2(T)$.

Согласно (4.38) получим:

$$\rho = \frac{\rho_0}{1 - C \ln \left[\frac{B + P}{B + P_0} \right]} \quad (4.39)$$

Таблица 4.9. - Значения коэффициентов C и B уравнения (4.39)

T, К	C	B 10⁶, Па
293,7	0,0069	1,039
315,5	0,0056	1,0467
333,8	0,0061	1,906
353,5	0,0060	2.212
363,4	0,0059	2,52

Выражением (4.39) при помощи таблицы 4.9 нами вычислена плотность образцов при различных параметрах состояния.

Результаты использования уравнения типа Тейта для (4.39) при различных параметрах состояния показаны в таблице 4.10.

Разработанные уравнения для вычисления плотности образцов повторяют экспериментальные в пределах погрешности опыта до 0,16% в пределах измеряемого диапазона температур и давления $T = 293,7 - 363,4\text{К}$ и $P = 9,81 - 29,43\text{ МПа}$ соответственно.

Таблица 4.10. - Сравнение вычисленных и экспериментальных значений плотности ($\rho_{\text{выч.}}$, кг/м³) продуктов пива по уравнению типа Тейта, при различных температурах и давлениях

Т,К	p = 9,81 МПа			p = 29,43 МПа		
	$\rho_{\text{экс.}}$	$\rho_{\text{выч.}}$	$\Delta, \%$	$\rho_{\text{экс.}}$	$\rho_{\text{выч.}}$	$\Delta, \%$
293,7	1043,7	1040,1	0,28	1049,5	1049,3	0,06
315,5	1033,1	1029,7	0,33	1039,7	1037,9	0,17
333,8	1023,4	1021,6	0,18	1029,5	1028,3	0,12
353,5	1013,0	1012,6	0,04	1019,2	1018,4	0,08
363,4	1008,5	1006,8	0,12	1014,5	1012,9	0,16
Среднеквадратичная погрешность плотности по уравнению (4.38)			0,19			0,12

Разработка уравнений состояния для многокомпонентных жидкостей и растворов в реальности возможна лишь применением методов статистической механики, которые позволяют связать изучаемые параметры на уровне молекулярных связей между ними.

4.7. Обработка экспериментальных данных по основным показателям продуктов пива (математические и численные методы)

Основной показатель, согласно которому можно судить о завершении процесса брожения это степень сбраживания V , %, которая характеризуется количеством сброженного экстракта сусле в процентном соотношении относительно сухих веществ исходного сусле:

$$V = \frac{[(E - e) \cdot 100]}{E} \quad (4.40)$$

где E – содержание сухих компонентов в исходном сусле по сахариметру, %: их содержание в молодом пиве по сахариметру, %.

О том, что процесс сбраживания завершен, свидетельствует наличие спирта и выделение диоксида углерода, однако в реальных условиях произ-

водства судят по уменьшению экстрактивных веществ в сбраживаемом сусле (таблица 4.11).

Таблица 4.11. - Изменение основных показателей суслу во время главного брожения

Дни брожения	Видимый экстракт по сахариметру, %	Содержание, %		Степень сбраживания, %	
		Действительного экстракта	алкоголя	видимая	Действительная
Дображивание	11,2	-	-	-	
1	11,0	11,07	0,11	2,2	0,7
2	10,1	10,45	0,47	10,2	7,1
3	8,8	9,41	0,99	21,8	16,4
4	7,1	7,85	1,67	34,9	30,2
5	5,6	6,65	2,27	50,2	40,9
6	4,9	6,08	2,56	58,4	45,9
7	4,6	5,83	2,68	59,1	48,2
8	4,5	5,75	2,72	60,0	48,9

Главное брожение считается законченным только после осветления молодого пива, если в течении суток сброжено 0,15-0,2 % экстракта суслу, а также по сахариметру (определение видимого экстракта). Длительность процесса сбраживания зависть от экстрактивности суслу и температуры. Например, при холодном способе и экстрактивности 11-13 % процесс длиться 7-8 суток, а при 14-20 %, то 9-12 сут.

Дображивание пива. Этот процесс предусматривает полную готовность пива к употреблению, для чего пиво перекачивают в специальные герметично закрывающиеся металлические танки лагерного цеха, изнутри на поверхности которых нанесен специальный лак.

При созревании в напитке протекают различные окислительно-восстановительные процессы, по итогам которых исчезают в нем привкус дрожжей и хмелевая горечь (коагуляция хмелевых смол), после чего вкус пива умягчается и несколько повышается его крепость. По сути, процесс дображивания включает те же самые процессы, которые протекают в момент основного брожения, только разница наблюдается во времени, если первый протекает быстрее, то второй подразумевает наиболее медленный процесс.

Пусть даны экспериментальные данные $y_i (i = \sqrt{n})$ некоторого процесса в точках X_i , т. е. задана серия точек $(X_i, Y_i) (i = \sqrt{n})$ требуется подобрать некоторую функцию $y = y(x_i, a, b, c, \dots)$ наилучшим образом описывающей процесс. Ясно, что приближающих (аппроксимирующих) функций бесчисленное множество. Выбор единственной функции из этого множества осуществляется подбором значений параметров a, b, c , т. е. Сумма квадратов между экспериментальными данными Y_i и значений аппроксимирующей функции $y(x_i; a, b, c, \dots)$, должна быть минимальной:

$$I = \sum_{i=1}^n (y_i - y(x_i, a, b, c, \dots))^2 \rightarrow \min \quad (4.41)$$

Отсюда, подбирая производные по a, b, c, \dots , получим:

$$\frac{\partial I}{\partial a} = 2 \sum_{i=1}^n (y_i - y(x_i, a, b, c, \dots)) \frac{\partial y(x_i; a, b, c, \dots)}{\partial a} = 0 \quad (4.42)$$

$$\frac{\partial I}{\partial b} = 2 \sum_{i=1}^n (y_i - y(x_i, a, b, c, \dots)) \frac{\partial y(x_i; a, b, c, \dots)}{\partial b} = 0 \quad (4.43)$$

$$\frac{\partial I}{\partial c} = 2 \sum_{i=1}^n (y_i - y(x_i, a, b, c, \dots)) \frac{\partial y(x_i; a, b, c, \dots)}{\partial c} = 0 \quad (4.44)$$

Произведя соответствующие вычисления, получим систему линейных уравнений для нахождения параметров a, b, c, \dots . Решив ее и подставив значения параметров a, d, c, \dots в функцию $Y = Y(x_i, b, c, \dots)$ мы, тем самым, строим аппроксимирующую функцию по экспериментальным данным, приведенным в таблице 4.11.

Анализ данных, приведенных в колонках 2 и 5 показывает, что эти данные описываются некоторой прямой

$$Y = ax + b \quad (4.45)$$

Строим функцию $Y = ax + b$ для данных столбцов 1 и 2

$$I = \sum_{i=1}^8 (y_i - y(x_i, a, b))^2 = \sum_{i=1}^8 (y_i - (ax_i + b))^2 \rightarrow \min \quad (4.46)$$

Отсюда:

$$\frac{\partial I}{\partial b} = -2 \sum_{i=1}^8 (y_i - (ax_i + b)) \cdot x_i = 0 \quad (4.47)$$

$$\frac{\partial I}{\partial a} = -2 \sum_{i=1}^8 (y_i - (ax_i + b)) \cdot 2 = 0 \quad (4.48)$$

Произведя несложные вычисления, строим таблицу.

Строим по данным колонок 1,2 таблицы 4.11 следующую таблицу.

x_i	y_i	x_i^2	$x_i y_i$
1	11	1	11
2	10,1	4	20,2
3	8,8	9	26,4
4	7,1	16	28,4
5	5,6	25	28
6	4,9	36	29,4
7	4,6	49	32,2
8	4,5	64	36
$\sum x_i = 36$	$\sum y_i = 56,6$	$\sum x_i^2 = 204$	$\sum x_i y_i = 211,6$

Из равенств (4.48) получаем

$$\begin{cases} a \cdot \sum_{i=1}^8 x_i^2 + b \sum_{i=1}^8 x_i = \sum_{i=1}^8 x_i y_i \\ a \cdot \sum_{i=1}^8 x_i + b \cdot 8 = \sum_{i=1}^8 y_i \end{cases} \quad (4.49)$$

или

$$\begin{cases} 204a + 36b = 211,6 \\ 36b + 8 \cdot b = 56,6 \end{cases} \quad (4.50)$$

Решаем эту систему и находим

$$y = -1,064x; b = 11,88 \quad (4.51)$$

Подставив значения a и b в уравнение $Y = ax + b$, получаем уравнение, моделирующее эксперимент 1, 2

$$y = -1,064x + 11,88 \quad (4.52)$$

Аналогично предыдущему строим таблицу для колонок 1,3 таблицы 4.11:

x_i	y_i	x_i^2	$x_i y_i$
1	11,07	1	11,07
2	10,46	4	20,9
3	9,41	9	28,23
4	7,85	16	31,40
5	6,65	25	33,25
6	6,08	36	36,48
7	5,83	49	40,81
8	5,75	64	46
$\sum x_i = 36$	$\sum y_i = 63,09$	$\sum x_i^2 = 204$	$\sum x_i y_i = 248,14$

Отсюда

$$\begin{cases} a \cdot \sum_{i=1}^8 x_i^2 + b \sum_{i=1}^8 x_i = \sum_{i=1}^8 x_i y_i \\ a \cdot \sum_{i=1}^8 x_i + b \cdot 8 = \sum_{i=1}^8 y_i \end{cases} \quad (4.53)$$

или

$$\begin{cases} 204a + 36b = 248,14 \\ 36b + 8 \cdot b = 63,09 \end{cases} \quad (4.54)$$

Решив эту систему уравнений, находим:

$$a = -0,8515; b = 11,718 \quad (4.55)$$

Подставив эти значения в уравнение $Y = ax + b$, получаем аппроксимирующую функцию (уравнение),

$$y = -0,8515x + 11,718 \quad (4.56)$$

Строим таблицу для колонок 1 и 2 таблицы 4.11.

x_i	y_i	x_i^2	$x_i y_i$
1	0,11	1	0,11
2	0,47	4	0,94
3	0,99	9	2,97
4	1,67	16	6,68
5	2,27	25	11,35
6	2,56	36	15,36
7	2,68	49	18,76
8	2,72	64	21,76
$\sum x_i = 36$	$\sum y_i = 13,47$	$\sum x_i^2 = 204$	$\sum x_i y_i = 77,93$

Получаем систему уравнений для определения a и b .

$$\left. \begin{aligned} 204a + 36b &= 77,93 \\ 36a + 8b &= 13,47 \end{aligned} \right\} \quad (4.57)$$

$$a = 0,14; b = -0,17$$

Тогда:

$$y = 0,412x - 0,17; x = 1 \quad (4.58)$$

Для колонки 1, 5 строим таблицу

x_i	y_i	x_i^2	$x_i y_i$
1	2,2	1	2,2
2	10,2	4	20,4
3	21,8	9	65,4
4	34,9	16	13,96
5	50,2	25	251,0
6	58,4	36	350,4
7	59,1	49	413,7
8	60	64	480
$\sum x_i = 36$	$\sum y_i = 296,8$	$\sum x_i^2 = 204$	$\sum x_i y_i = 1597,06$

Получаем систему уравнений для определения **a** и **b**:

$$\begin{cases} 204a + 36b = 1597,06 \\ 36a + 8b = 296,8 \end{cases} \quad (4.59)$$

Отсюда

$$\begin{cases} 1632a + 8 \cdot 36 \cdot b = 12768,48 \\ 1296a + 8 \cdot 36 \cdot b = 10694,8 \end{cases} \quad (4.60)$$

$$336a = 2073,68; a = 6,14; b = 9,605$$

$$y = 6,14x + 9,605$$

$$x = 2 \cdot 12 + 9 = 33$$

Анализ данных колонок 1,6 (таблицы 4.11) показывает, что Y от $x = 1$ до $x = 4$ резко возрастает, а от $x = 4$ до $x = 8$ рост замедляется. В связи с этим целесообразно приблизить функцию $Y = ax^2 + bx + c$ от $x = 1$ до $x = 4$, а от $x = 4$ до $x = 8$ функцию $y = a\sqrt{x} + b$.

В отрезке $[1,14]$ функции будем искать

$$y = ax^2 + bx + c \quad (4.61)$$

С требованием

$$I(x) = \sum_{i=1}^4 (y_i - (ax_i^2 + bx_i + c))^2 \rightarrow \min \quad (4.62)$$

Отсюда выбирая производные по a , b , c и приравняв их к нулю, получим:

$$\left. \begin{aligned} a \sum_{i=1}^4 x_i^4 + b \sum_{i=1}^4 x_i^3 + c \sum_{i=1}^4 x_i^2 &= \sum_{i=1}^4 x_i^2 y_i \\ a \sum_{i=1}^4 x_i^3 + b \sum_{i=1}^4 x_i^2 + c \sum_{i=1}^4 x_i &= \sum_{i=1}^4 x_i y_i \\ a \sum_{i=1}^4 x_i^2 + b \sum_{i=1}^4 x_i + 4 \cdot c &= \sum_{i=1}^4 y_i \end{aligned} \right\} \quad (4.63)$$

Составим таблицу

x_i	y_i	x_i^2	x_i^3	x_i^4	$x_i y_i$	$x_i^2 y_i$
1	0,7	1	1	1	0,7	0,7
2	7,1	4	8	16	14,2	28,4
3	16,4	9	27	81	49,2	147,6
4	30,2	16	64	256	120,8	483,2
10	54,4	30	99	354	184,9	659,9

Подставив значения соответствующих сумм в уравнения a , d , c получим систему:

$$\begin{cases} 354 \cdot a + 99b + 30c = 659,9 \\ 99a + 30b + 10 \cdot c = 184,9 \\ 30a + 10b + 4 \cdot c = 54 \cdot 4 \end{cases} \quad (4.64)$$

Решим эту систему методом Крамера.

Для этого необходимо вычислить значения определителей:

$$\Delta = \begin{vmatrix} 354 & 99 & 30 \\ 99 & 30 & 10 \\ 30 & 10 & 4 \end{vmatrix} = 120 \cdot 354 + 99 \cdot 300 + 99 \cdot 300 - (30 \cdot 30 \cdot 30 + 354 \cdot 100 + 4 \cdot 99 \cdot 99) = 276$$

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} 659,9 & 99 & 30 \\ 184,9 & 30 & 10 \\ 54,4 & 10 & 4 \end{vmatrix} = 659,9 \cdot 120 + 54,4 \cdot 990 + 184,9 \cdot 300 - (54,4 \cdot 900 + 659,9 \cdot 100 + 184,4 \cdot 4 \cdot 99) = 541,6$$

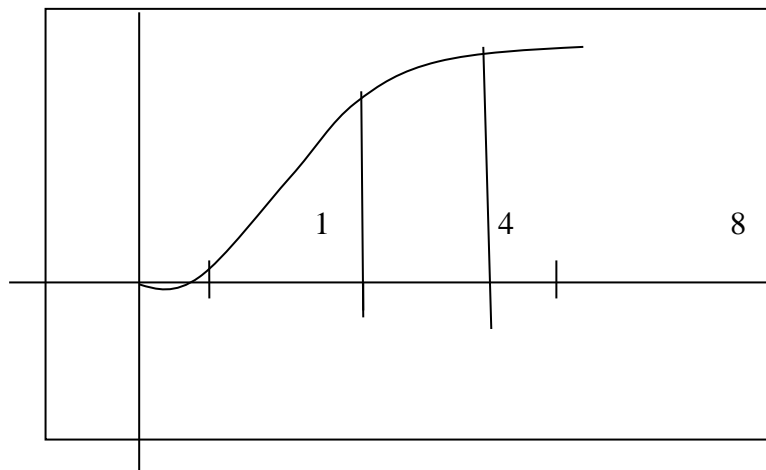
$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} 354 & 659,9 & 30 \\ 99 & 184,9 & 10 \\ 30 & 54,4 & 4 \end{vmatrix} = 354 \cdot 184,9 \cdot 4 + 659,9 \cdot 300 + 54,4 \cdot 99 \cdot 30 - \\ - (184,9 \cdot 900 + 354 \cdot 54,4 \cdot 10 + 99 \cdot 10 \cdot 659,9) = -3909306$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} 354 & 99 & 659,9 \\ 99 & 30 & 184,9 \\ 30 & 10 & 54,4 \end{vmatrix} = 354 \cdot 30 \cdot 54,4 + 99 \cdot 184,9 \cdot 30 + 99 \cdot 10 \cdot 659,9 - \\ - (900 \cdot 659,9 + 10 \cdot 184,9 \cdot 354 + 99 \cdot 99 \cdot 54,4) = -1448,4$$

$$a = \frac{\Delta_1}{\Delta} = \frac{541,6}{276} = 2,2$$

$$b = \frac{\Delta_2}{\Delta} = \frac{-3909306}{276} = 1416,4$$

$$c = \frac{\Delta_3}{\Delta} = \frac{-1448,4}{276} = 5,2$$



$$y = ax^2 + bx + c$$

$$y = d\sqrt{x+e}$$

Тогда $a = \frac{\Delta_1}{\Delta}$; $b = \frac{\Delta_2}{\Delta}$; $c = \frac{\Delta_3}{\Delta}$ и $y = ax^2 + bx + c$ на отрезке $[x_1, x_4]$, т.е. от 1 до 4

В связи с тем, что характер возрастания экспериментальных данных меняется при приходе $x = 4$, меняем и аппроксимирующую функцию. На $y = d\sqrt{x} + e$.

С этой целью составляем таблицу

x_i	y_i	$\sqrt{x_i}$	$y_i\sqrt{x_i}$
1	30,2	1	30,2
2	40,9	1,414	57,838
3	45,9	1,732	79,5
4	48,2	2	96,4
5	48,9	2,236	109,34
$\sum x_i = 15$	$\sum y_i = 214,1$	$\sum \sqrt{x_i} = 8,382$	$\sum y_i\sqrt{x_i} = 373,28$

$$I = \sum_1^5 (y_i - (d\sqrt{x+e}))^2 \rightarrow \min \quad (4.65)$$

$$\sum (y_i - (d\sqrt{x_i+e}))^2 \sqrt{x_i} = 0 \quad (4.66)$$

$$\sum (y_i - (d\sqrt{x+e})) = 0 \quad (4.67)$$

$$\begin{cases} d \sum_{i=1}^5 x_i + e \sum \sqrt{x_i} = \sum y_i \sqrt{x_i} \\ d \sum \sqrt{x_i} + 5 \cdot e = \sum y_i \end{cases} \quad (4.68)$$

$$\begin{cases} d \cdot 15 + e \cdot 8,38 = 373,28 \\ d \cdot 8,38 + 5 \cdot e = 214,1 \end{cases} \quad (4.69)$$

$$\begin{cases} 75d + (5 \cdot 8,38)e = 1866,40 \\ 70,22d + (5 \cdot 8,38)e = 1794,15 \end{cases} \quad (4.70)$$

$$4,78d = 72,25 \quad d = 15,12$$

$$e = \frac{214,1 - 8,38 \cdot 15 \cdot 12}{5} = \frac{214,1 - 126,7}{5} = \frac{87,4}{5} = 17,48$$

$$e = 17,48$$

$y = 15 \cdot 12\sqrt{x} + 17,48$ для отрезка $[4,8]$

x_i	y_i	x_i^2	$x_i y_i$
1	2,2	1	2,2
2	10,2	4	20,4
3	21,8	9	65,4
4	34,9	16	139,6
5	50,2	25	251
15	119,3	55	478,6

$$\sum_1^5 (y_i - (ax_i + b))^2 \rightarrow \min \quad (4.71)$$

$$\begin{cases} \sum (y_i - (ax_i + b)) \cdot x_i = 0 \\ \sum (y_i - (ax_i + b)) \cdot 1 = 0 \end{cases} \quad (4.72)$$

$$a \sum x_i^2 + b \sum x_i = \sum x_i y_i \quad (4.73)$$

$$a \sum x_i + b \cdot 5 = \sum y_i \quad (4.74)$$

$$\begin{cases} 55a + 15b = 478,6 \\ 15a + 5b = 119,3 \end{cases} \quad (4.75)$$

$$\begin{cases} 55a + 15b = 478,6 \\ 45a + 15b = 357,9 \end{cases} \quad (4.76)$$

$$10a = 120,7; a = 12,07; b = 10,35$$

$$y = 12 \cdot 1x - 10,5$$

Для строки 5-8 $y = dx + e$ $y = 3.8x + 30$

x_i	y_i	x_i^2	$x_i y_i$
5	50,2	25	256
6	50,8	36	349
7	59,1	49	413,7
8	60,1	64	512
26	228,1	174	1500,7

$$I = \sum_5^8 [y_i - (dx_i + e)]^2 \rightarrow \min \quad (4.77)$$

$$\sum [y_i - (dx_i + e)] \cdot x_i = 0 \quad (4.78)$$

$$\sum [y_i - (dx_i + e)] \cdot 1 = 0 \quad (4.79)$$

$$d \sum x_i^2 + e \sum x_i = \sum x_i y_i \quad (4.80)$$

$$d \sum x_i + 4e = \sum y_i \quad (4.81)$$

$$174d + 26e = 1500,7$$

$$26d + 4e = 228,2$$

x_i	y_i	x_i^2	$x_i y_i$
5	50,2	25	111,35
6	58,2	36	143,08
7	59,1	49	156,32
8	60	64	169,2
26	283,7	174	580,55

$$y = ax + b; a = 3,7; b = 31$$

$$y = 3,7 x + 31$$

$$x = 5 \quad y = 18,5 + 31 = 49,6$$

$$x = 6 \quad y = 22,2 + 31 = 53,2$$

$$x = 7 \quad y = 25,9 + 31 = 57$$

$$x = 8 \quad y = 29,6 + 31 = 60,6$$

$$\Delta y_1 = 50,2 - 49,6 = 0,6$$

$$\Delta y_2 = 58,2 - 53,2 = 5,0$$

$$\Delta y_3 = 57 - 59,1 = -2,1$$

$$\Delta y_4 = 60 - 60,6 = -0,6$$

Заключение к четвертой главе

Значения плотности, теплоемкости, коэффициентов поверхностного натяжения и адсорбционных свойств компонентов пива, которые считаются основополагающими, занимают особое место при соответствующих расчетах и создании новых аппаратов, определении их ККФ, а также и теплооб-

менных характеристик, установлении активности составных компонентов пива, изучении α при отсутствии кипения жидкости (раствора) в тракте охлаждения и др.

Полученные результаты экспериментов, математическая модель, служащая для численного определения изменения термодинамических параметров изучаемых веществ способствуют сокращению финансовых затрат на приобретение оборудования и проведения дорогостоящих экспериментов.

Применив результаты исследований и соответствующие математические модели, была построена система зависимостей для вычисления ТФС материалов, включая коэффициент адсорбции в температурной и концентрационной (концентрация сухих веществ) зависимости при различных давлениях. Полученные результаты служат основой для разработки новых материалов, веществ, аппаратов и устройств, применяемых в пивоваренном производстве.

Подведя итоги экспериментов, были выявлены основные закономерности, которым подчиняются соответствующие изменения термодинамических характеристик в зависимости от температуры, давления и концентрации добавляемых сухих веществ в приготовлении пива. Предлагаемые результаты исследований можно использовать в расчетах процессов теплообмена в устройствах, используемых в пищевой промышленности и других областях техники, а также в решении вопросов касательно прогнозирования свойств веществ и материалов и надежности разрабатываемых конструкций.

Впервые экспериментальным способом были установлены изменения теплоемкости, термодинамических характеристик и физико-химических свойств составных компонентов пива в температурной зависимости в пределах (293 – 379 К) и изменении давления (0,101 – 9,81 МПа).

Основываясь на главные закономерности теории подобия, нами был получен ряд эмпирических уравнений, описывающих связь изменения теплоемкости, коэффициента адсорбции и поверхностного натяжения образцов исследования с изменением температуры.

ВЫВОДЫ

1. Изучены физико-химические, термодинамические свойства и термограммы системы (сухого вещества + вода + сусло) в интервале температур (298-379) К, давлений ($p = 0,101-9,81$) МПа в зависимости от времени [142-А,143-А,145-А,146-А,149-А,156-А,157-А].
2. Разработана экспериментальная установка для измерения теплоемкости и изменения температуры разложения растворов (методом монотонного разогрева) в зависимости от температуры и давления [142-А,143-А,145-А,146-А,149-А,156-А,157-А].
3. Впервые получены экспериментальные данные по физико-химическим, термодинамическим свойствам и изменению адиабатической температуры исследуемых образцов системы (сухого вещества + вода + сусло) [142-А,143-А,145-А,146-А,149-А,156-А,157-А].
4. Установлено, что добавление сусла и сухого вещества существенно влияет на изменение физико-химических и термодинамических свойств воды [142-А,143-А,145-А,146-А,147-А,149-А,150-А,154-А,155-А,156-А,157-А,159-А,160-А].
5. Показано влияние концентрации сухого вещества и сусла на изменение физико-химических и термодинамических свойств воды [142-А,143-А,144-А,145-А,146-А,147-А,148-А,149-А,150-А,154-А,155-А,156-А,157-А,159-А,160-А].
6. Приведено качественное и количественное объяснение изменения теплоемкости, теплопроводности, плотности, коэффициента поверхностного натяжения, коэффициента адсорбции исследуемых объектов [142-А,143-А,144-А,145-А,146-А,147-А,148-А,149-А,150-А,151-А,152-А,153-А,154-А,155-А,156-А,157-А,159-А,160-А].
7. Для получения численных значений плотности и калорических характеристик исследуемых веществ впервые нами использованы модифицированные уравнения типа Тейта и уравнение Мамедова-Ахундова и численные методы

(методы Гаусса и Крамера) [143-А, 147-А,148-А,151-А,152-А,153-А,154-А,155-А,156-А,159-А,160-А].

8. При обработке и обобщении экспериментальных данных по физико-химическим, термодинамическим свойствам получен ряд эмпирических уравнений, позволяющих рассчитать вышеперечисленные характеристики в зависимости от температуры, давления и концентрации сусла [142-А,143-А,144-А,145-А,146-А,147-А,148-А,149-А,150-А,151-А,152-А,153-А,154-А,155-А,156-А,157-А,158-А,159-А,160-А,212-А].

9. Впервые для исследуемых образцов определены константы реакций термохимического разложения с использованием уравнения Ленгмюра – Арениуса [143-А,145-А,147-А,148-А,149-А,151-А,152-А,153-А,154-А,156-А,157-А,159-А, 160-А].

10. Предложено практическое использование полученных результатов в технологии производства пива для инженерных расчетов процессов и аппаратов пищевых производств, моделирования динамики неравномерных процессов и на его основе получен коэффициент теплоотдачи между системами и окружающей средой.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы исследования диссертационной работы

1. Составлены подробные таблицы теплопроводности, теплоемкости и плотности продуктов пива в большой области изменения температуры (293 – 673) К, давления (0,101–9,81) МПа, а также массовой концентрации наполнителей (сусло), которые могут найти свое применение в технологических оборудовании, теплообменных аппаратах и т.д.

2. Полученные аппроксимационные зависимости с достаточной эффективностью используются студентами, магистрами и аспирантами кафедры «машины и аппараты пищевых производств» Технологического университета Таджикистана при выполнении выпускных, квалификационных и научно-исследовательских работах. В предприятии ООО «Санет» в технологическое

оборудование были внесены усовершенствования (уменьшение толщины корпуса варочного оборудования, уменьшение оборота мешалок, изменение направления движения теплоносителя) и заменен зарубежный солод на солод производства Республики Таджикистан (акты о внедрении результатов прилагаются).

3. Результатами опытных исследований теплопроводности, теплоемкости, плотности, температуропроводности вязкости исследуемых объектов, можно воспользоваться для численного определения коэффициента активности каждого компонента изучаемых образцов.

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

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

ЛИТЕРАТУРА

1. **Закгейм, А.Ю.**, Введение в моделирование химико-технологических процессов. -2-е изд., перераб. и доп. перевод с английского- М.: “Химия”, (серия “Химическая кибернетика”), 1982.-288с.
2. **Алтаев, С.А.**, Ротационно-пленочный аппарат /С.А. Алтаев, К.Р. Ренп Алма-Аты - Новости науки Казахстана. - № 1. - 1990. - С.15-16
3. **Алтайулы, С.**, Анализ эффективности теплообмена в ротационно-пленочном сушильном аппарате. /С. Алтайулы// Вестник Воронеж. гос. техн. акад. 2010. - № 1. - С.29-32.
4. **Василинец, И.М.**, Роторные пленочные аппараты в пищевой промышленности /И.М. Василинец, А.Г. Сабуров. – М.: Агропромиздат, 1989, - 136 с.
5. **Амирханов, Х.И.**, Экспериментальное исследование теплопроводности воды / Х.И. Амирханов, А.П. Адамов, У.Б. Магомедов / Институт физики Дагестанского филиала АН СССР-Махачкала. 1974.-42с.
6. **Александров, А.А.**, Теплофизические свойства воды при атмосферном давлении /А.А. Александров, Трахтенгерц М.С.-М.: Издательство стандартов, 1977. – 471с.
7. **Александров, А.А.**, Орлов К.А., Очков В.Ф., Очков А.В. Программный комплекс” Water Steam Pro” для расчета теплофизических свойств воды и водяного пара//Тезисы докладов 10-й Российской конференции по теплофизическим свойствам веществ. Казань, 30 сентября – 4 октября 2002, - С.187-188.
8. **Arrhenius, S. Z.** Phys. Chem/ S. Z. Arrhenius 1889. Bd.4.- S.226-248.
9. **Алиев, А.М.**, Магнетокалорические свойства манганитов $La_{0.7}Ca_{0.3}MnO_3$ с изотопическим замещением $^{16}O-^{18}O$, Физика фазовых переходов// А. М. Алиев. И.К.Камилов - Сборник трудов 20-й Всероссийской школы – семинара молодых ученых, посвящённой 55-летию создания Института физики и 105-летию со дня рождения члена – корр. АН СССР /Х. И. Амирханова. Махачкала, 2012,- С.95-97.

10. Балыкин, В.П., Кинетические особенности процесса термической деструкции тетраамин купро сульфата / В.П. Балыкин, Исаева Т.Н. - Труды XIV Международной конференции по термическому анализу и калориметрии в России. 23-28 сентября 2013г. Санкт-Петербург.-С.39- 42.

11. Барбин, Н.М., Термический анализ процесса сжигания радиоактивного графита в расплаве $\text{Na}_2\text{CO}_3\text{-KCO}_3\text{-SnO}_2$ / Н.М. Барбин, Пешков А.В., Замятин В.М. Труды XIV Международной конференции по термическому анализу и калориметрии в России. 23-28 сентября 2013г. Санкт- Петербург.- С.56-58.

12. Бехтерова, Е.М., Фазовые равновесия в трехкомпонентной взаимной системе $\text{Na,K //I,WO}_4\text{.}$ //Бехтерова Е.М., Игнатьева Е.О., Гаркушин И.К. Труды XIV-Международной конференции по термическому анализу и калориметрии в России. 23-28 сентября 2013г. Санкт- Петербург.-С. 58-60.

13. Barratt, Netlaton, H. International Critical Tables /Barratt., Netlaton H – 1929. – V.5. – -P. 227.

14. Bach, J. Grequill U.- «Warme- und Stoffuber tragug».-1070.-Jd.3.-S.44.

15. Берналь, Дж. Структура воды в ионных растворах. /Усп. физ. наук. Дж Берналь. Р. Фаулер -1934, 14,-Вып.5.-С.586-644.

16. Богородицкий, Н.П. Электротехнические материалы. / Н.П. Богородицкий, Пасынков В. В., Тареев Б. М. Учебник для вузов Л.- Энергоатомиздат, 1985.-304 с.

17. Блохина, И.А. Термический анализ в кинетике окисления порошков TiB_2 / И.А. Блохина, Иванова В.В. Труды XIV Международной конференции по термическому анализу и калориметрии в России. 23-28 сентября 2013г, Санкт-Петербург. -467с

18. Блохин, А.В. Низкотемпературная теплоемкость перовскитоподобных слоистых оксидов переменного состава $\text{Sr}_{2-x}\text{Ba}_x\text{FeMoO}_6$ /А.В. Блохин, Абражевич А.Д., Степурко Е.Н.,Петров А.С. Труды XIV Международной конференции по термическому анализу и калориметрии в России. 23-28 сентября 2013г. Санкт- Петербург.- С.114-116.

19. Bridgman, P.W. The thermal conductivity of liquids under pressure/ P.W. Bridgman- Proc. Amer. Acad. Arts. Seicnse.-1923.- V.49.-p.141.

20. Варгафтик, Н.Б. Теплопроводность газов и жидкостей/ Н.Б. Варгафтик, Филиппов Л.П., Тарзиманов А.А., Юрчак Р.П. -М.: Издательство стандартов, 1970.-175 с.

21. Варгафтик, Н.Б. Теплопроводность жидкостей и газов/ Н.Б. Варгафтик, Филиппов Л.П., Тарзиманов А.А., Тоцкий Е.Е. - М.: Издательство стандартов, 1978.-471 с.

22. Варгафтик, Н.Б. Экспериментальное исследование теплопроводности воды/ Н.Б. Варгафтик, Олещук О.П./Теплоэнергетика. -1959.-№10.- С.70-74.

23. Vant Hoff, J.H. Etudesde dynamique chimique. Amsterdam: Frederik Muller Co., 1884.-215p.

24. Власов, Д.В. Оценка погрешности измерения высокоградиентных температурных полей термопарой с неточечным спаем/ Д.В. Власов, Казенин Д.А., Колесникова Н.А. Тезисы докладов/Вторая международная теплофизическая школа 25-30 сентября 1995. Тамбов. -С.248.

25. Гаджиев, М.А. Теплопроводность спиртов и их водных растворов: автореф. дис ... к.техн.наук: 01.04.14/Магомед Али огли Гаджиев-Баку. Из. ИНЕФХ. -1972.-27с.

26. Гордов, А.Н. Статистические методы обработки результатов теплофизического эксперимента./А.Н.Гордов, Парфенов В.Г., Потягайло А.Ю., Шарков А.В. Учеб.пособие. ЛИТМО-Л., 1981.-72 с.

27. Герщенко, Ю.А. Температурные измерения: Справочник/Ю.А. Герщенко, А.Н. Гордов, Р. И.Лах, Н.Я. Ярышев. -Киев: Наукова думка, 1984.-495 с.

28. ГОСТ 8.207-76 ГСИ. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения. -М.: Издательство стандартов, 1976.-9 с.

29. ГОСТ 8.381-80 (СтСЭВ 403-76) ГСИ. Эталоны. Государственная система обеспечения единства измерений. Способы выражения погрешностей. -М.: Издательство стандартов, 1980.-9 с.

30. Gebiete Ingenieur wes, 1955. -Bd.21.-N6.-S.176.

31. Gillam, D.G., LammO. – «Acta chemics Scand ». -1955.-V.8.-p.675.

32. Гусейнов, К.Д. Исследование термодинамических свойств ряда кислородосодержащих органических веществ в широком интервале параметров состояния. Дисс..д-ра техн. наук: 01.04.14./ Камал Дадашогли Гусейнов. – Баку. АЗНЕФТХИМ.1979–392с.

33. Диканский, Ю.И. Магнитная восприимчивость и электропроводность магнитной жидкости при наличии структурных образований. Физические свойства магнитных жидкостей/ Ю.И. Диканский, В.М. Кожевников, Чеканов В.В./ Сб. науч. трудов, Свердловск, 1983.С.28-33.

34. Домонов, Д.П. Синтез и термическое разложение двойных комплексных соединений, содержащих анион $[\text{FeMN}(\text{CN})_6]^{2-}$ / Д.П. Домонов, Печенюк С.И., Гостева А.Н. Труды XIV Международной конференции по термическому анализу и калориметрии в России. 23-28 сентября 2013г. Санкт-Петербург.-С. 63-65.

35. Дорошева, Е.В. Исследование простых четырехкомпонентных систем из галогенидов и метаванадов лития и калия. / Е.В.Дорошева, Губанова Т.В., Гаркушин И.К. Труды XIV Международной конференции по термическому анализу и калориметрии в России.23-28 сентября 2013г. Санкт-Петербург. - С.66-68.

36. Деденко, Л.Г. Математическая обработка и оформление результатов эксперимента// Л.Г.Деденко, Керженцев В.В. - М.: Издательство стандартов, 1977. -36 с.

37. Eucken, A. Weiteres zur Assoziation des Wassers.-Z. Electrochemic.-1949.-Bd. 53.-N3.-S. 102-105.

38. Емилина, А.Л. Дифференциальная сканирующая калориметрия//А.Л. Емилина, Методические указания. Химический факультет МГУ, 2009, С.42.

39. Зарипов, Дж.А. Плотность системы (вода + пероксид водорода) в зависимости от температуры при атмосферном давлении/ Дж.А. Зарипов, Сафаров М.М., Зоиров Х.А. и др. Республиканская научная конференция «Проблемы современной координационной химии», посвященной 60-ю члена корреспондента АН РТ, д-ра х.н. профессора Аминджанова А.А (13-14 января 2011). С.51-53.

40. Зарипов, Дж.А. Расчет коэффициента влагопроводности порошков на основе никеля/ Дж.А. Зарипов, Сафаров М.М., Пирмадов М.Д., Тауров Э.Ш./ Республиканская научная конференция «Проблемы современной координационной химии», посвященной 60-ю члена корреспондента АН РТ, д-ра х.н. профессора Аминджанова А.А (13-14 января 2011), -С.50-51.

41. Зарипов, Дж.А. Теплофизические и термодинамические свойства двухкомпонентных катализаторов принимаемых в нанотехнологии/Дж.А. Зарипов, Сафаров М.М., Тауров Э. Ш., и др. Вестник Таджикского национального университета. (Научный журнал) Душанбе, «Сино» 2011, 3(67). -С.16-23.

42. Зарипов, Дж.А. Термограммы системы лантан – стронций - манганит ($\text{La}_{0.65}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_x$) пероксид водорода. / Дж.А. Зарипов, Сафаров М.М., Тагоев С.А. и др. Тезисы докладов 13-ой Российской конференции по теплофизическим свойствам веществ (с международным участием), Новосибирск 29 июня-1июля 2011, -С.106-107.

43. Зарипов, Дж.А. Влияние влажности на изменение переносных свойств нанопористых материалов. / Дж. А. Зарипов, Пирмадов М.Д., Сафаров М.М., и др. Материалы 4-ой Международной научно-практической конференции «Современные энергосберегающие тепловые технологии», СЭТТ-2011г, Т.2, М. -2011, -С. 383-382.

44. Zaripov, J.A. Enthalpy and entropy ternary systems (ethylene glycol + water + graft)/ J.A. Zaripov, Safarov M.M., Nazirov Sh.M., Anaqulov M.M., e.t. Book of abstract, is European Conference on thermo physical properties, August 28-September 1, 2011, Thessaloniki, Greece, -p.333.

45. Zaripov, J.A. Experimental investigations $C_{y,x}$, $P - \rho$ -T properties and equations state./ J.A. Zaripov Safarov M.M., Zoirov H.A., e.t. Book of abstracts, 19 European Conference on Thermophysical properties, August 28- September, 2011, Thessaloniki, Grasse,- p.286.

46. Зарипов, Дж.А. Использование теплофизических и оптических свойств системы антифриза + графитовый порошок для расчета эффективности солнечных коллекторов/ Дж.А. Зарипов, Сафаров М.М., Анакулов М.М., и др. Измерительная техника, 2012, часть 55. №6,- С.586-591.

47. Зарипов, Дж.А. Калорические свойства нанопористых систем ($La_{0.7}Sr_{0.3}MnO_{3-x}$) и их растворов при различных температурах и давлениях./ Дж. А.Зарипов, Сафаров М.М., Сангов Т.Ш. Вестник Таджикского национального университета (научный журнал), Душанбе, «Сино», 2011.(5) -С.231-237.

48. Зарипов, Дж.А. Математическое моделирование теплообмена в системе «Солнечных коллекторов» с учетом теплофизических свойств теплоносителей./ Дж.А. Зарипов, Анакулов М.М., Сафаров М.М. и др. Материалы Республиканской научно-технической конференции «Перспективы энергетики Таджикистана» 23 декабря 2011, -С.19-24.

49. Zaripov, J.A. Thermodynamic investigation of phase formatting process in the systems /J.A. Zaripov, Safarov M.M., Najmudinov Sh. Z. e.t. 18th Symposium on Thermo physical properties, Boulder, Colorado, USA, June 24-29, 2012.-P 301.

50. Зарипов, Дж.А. Сафаров М.М., Пирмадов М.Д. Расчетно-экспериментальное значение коэффициента диффузии зернистых материалов /Дж.А. Зарипов, Сафаров М.М., Пирмадов М.Д. Свидетельство №0139 ТД от 09-06-2009. -4с.

51. Зарипов, Дж.А., Сафаров М.М. Теплоемкость нонапористых порошков системы $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_{3-x}$ / Дж.А. Зарипов, Сафаров М.М. Тезисы докладов Республиканской научно-методической конференции «современные проблемы физики», посвященной памяти заслуженного учителя школ Тадж. ССР. Джабарова Г. 2007,- С.118-119.

52. Зайдель, А.Н. Ошибки измерений физических величин/ А.Н. Зайдель -Л.: Наука, 1974.-146 с.

53. Зарипов, Дж.А. Термограммы перекиси водорода и сажи. / Дж.А. Зарипов, Сафаров М. М. ВестникГТУ-2010. -С.123-125.

54. Castell, Y.J., Stanley E.M.// J.Chem.AEng.Data.-1974.-V.19.N1.p.8.

55. Coats, A.W. Kinetic parameters from thermogravimetric data / A.W Coats, Redfern J. P. Nature, 1964, V.201, January, 4,-pp.68-69.

56. Кнупянц, И.Л. Химический энциклопедический словарь // Гл.ред. И. Л. Кнупянц.- М.: Советская энциклопедия, 1983. – 792с

57. Кудряшова, Ж.Ф. Рекомендации по методам обработки результатов наблюдений при прямых измерениях/ Ж.Ф.Кудряшова, Рабинович С.Г., Резник К.А. Тр. Метрологических институтов СССР. -1972.-Вып. 134(194).- С.5-90.

58. Куликова, Т.В. Комплексное исследование минеральных руд методами термического анализа/ Т.В.Куликова, Гуляева Р.Н., Ведмидь Л.Б., Быков В.А. Труды XIV Международной конференции по термическому анализу и калориметрии в России.23-28 сентября 2013г. Санкт-Петербург. -С.162-165.

59. Lawson, A.W. Thermal conductivity of Water at high pressures/ A.W. Lawson, Lowell R., Yain A.L. J.Chem.Phys.-1959.V.30.-N3.-pp.643-647.

60. Le. Neindre B. Results experimental heat conductivity thermique de lear lorde en phase liquid, jusque, and temperature at 370°C/ B.Le.Neindre, Bury P., Tufen R., Johanin P., Vodar B. - Rep.Chem.17-th.ICPS.Tokyo.1968.-p.105.

61. Львов, Б.В. Терморазложение твердых и жидких веществ. СПб, Издательство Политехнический университет,-2006,- 278с.

62. Литвиненко, И.В. Теплопроводность водных растворов электролитов и ее связь со структурой воды: дис...канд.техн.наук./ Игорь Владимирович Литвиненко –Днепро-петровск.1968. – 189с.

63. Minimiya, T. Int: Proc.of 8 – thInt.conf. of Steam.France,/ T. Minimiya- Yata J Giens, 1974.: Viscosity of Water. Proc. Ann. Meeting. ISPE. 1975. -N750.-20. - p.9.

64. Мустафаев, Р.А. Теплофизические свойства углеводородов при высоких параметрах состояния/ Р. А. Мустафаев -М., 1980.-296 с.

65. Михайлов, И.Г. Основы молекулярной акустики /И.Г. Михайлов, Соловьев В.А., Сырников Ю.П. -М.:Наука, 1964. – 514с.

66. Мирсаидов, У.М. Характер процессов дегидратации и термического разложения кристаллогидратов нитратов уранила и тория (IV)/ У.М. Мирсаидов, Хамидов Ф.А., Саломов Ф.Д., Бадалов А.Б. и др. Труды XIV Международной конференции по термическому анализу и калориметрии в России.23-28 сентября 2013г.- Санкт- Петербург.- С.55-56.

67. Наумов, В.Н. Тепловые флуктуации энергии и зависимость энтальпии сублимации от температуры молекулярных кристаллов бета дикетонатов металлов/ В.Н.Наумов, Беспятов М.А., Кузин Т.М., Сергиенко К.В. Труды XIV Международной конференции по термическому анализу и калориметрии в России.23-28 сентября 2013г. Санкт- Петербург.-С. 79-82.

68. Непомилуев, А.М. Кинетика кристаллизации фторсульфатных стекол / А.М. Непомилуев, Резницких О.Г. Труды XIV Международной конференции по термическому анализу и калориметрии в России.23-28 сентября 2013г. Санкт-Петербург. -С.166-168.

69. Нечаева, О.А. Структурная организация магнитных коллоидов в электрическом и магнитном полях: канд.физ.-мат.наук/ Ольга Александровна Нечаева. -Ставрополь. -2003.-120 с.

70. Орлов, Д.В. Магнитные жидкости в машиностроении /Д.В. Орлов и др.: Под общей ред. Орлова Д.В., В.В. Подгорнова. – М.: Машиностроение. 1993. - 272 с.

71. Парфенов, В.Г. Регрессионный и корреляционный анализ. Обработка результатов наблюдений при измерениях// Парфенов В.Г. Учеб. пособие. ЛИТМО/ -Л., 1983.-78 с.

72. Панченков, Г.М. Химическая кинетика и катализ / Панченков Г.М., Лебедев В.П. М.: Химия. 1985.-С.267-283.

73. Palmer, G. Thermal conductivity of liquids/ Ind. En gug Cytm.1948.-V.40.-N1.-p.89.

74. Печенюк, С.И. Исследование газообразных продуктов термоллиза двойных комплексных соединений, содержащих катион $[\text{Cr}(\text{ur})_6]^{3+}$ и $\text{ur}-\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ в атмосфере воздуха и аргона/ С.И. Печенюк, Гостева А.Н., Кривцов И.В. Труды XIV Международной конференции по термическому анализу и калориметрии в России.23-28 сентября 2013г. Санкт- Петербург. -С. 61-63.

75. Платунов, Е.С, Баранов И.В, БуравомВ.В. Теплофизические измерения: Учеб пособие. / Под ред. Е.С. Платунова. -С.Пб.:СПб ГУН и ПТ, 2010-738с.

76. Платунов, Е.С. Теплофизические измерения в монотонном режиме/ Е.С. Платунов - Л.: Энергия, 1973.-142 с.

77. Пригожин, И., Дефэй Р. Химическая термодинамика, пер. с англ., Новосибирск, 1966; 311с.

78. Термические константы веществ. Справочник, под ред. В.П. Глушко, в. 1-10, 1965-82. См. также лит. при статьях Калориметрия, Термохимия. М. Ю. Панов.

79. Теплофизические измерения и приборы Платунов Е.С., Буравой С.Е., Курепин В.В., Петров Г.С; Под общ. ред. Е.С Платунов -Л.: Машиностроение. Ленинград. Отд., 1986. – 256с.

80. Powell, R.W. «Phys.Mag. Suppl», 1956, V.7.-N20.-p.278.

81. Poltz, H. DieWarmeleitahigkeitvan Flussigkeitin III. Abhangikeit von der schichdicke bci organischen Flussigkeiten.- /Int.J.Heat Mass Transfer.-1956.-V.8.-p.606-609.

82. Рабинович, С.Г. Методика вычисления погрешности результатов измерения / С.Г Рабинович / Метрология. -1970.-№1.-С.3-12.

83. Rastorguev, Yu.L. Experimental stude of light water thermal conductivity at highpressures./Yu.L. Rastorguev, Grigorev B.A., Ikhchanov A. M. Proc.8-ICPS.Pris:1974.-V.1.-p.255-264.

84. Riedel, L. Meesung der Wärmeleitfähigkeit von organisichen Flüssigkeiten, insbesondere von kaltemitteln/ L.Riedel, Forschung aut dem Gxbiete das Ingenierwesens.-Bd.2,-1940,-N6.-s.340-347.

85. Радионова, И.Е. Изучение теплофизических характеристик пивного сусла /И.Е. Радионова, В.В.Кисс//Научный журнал НИУ ИТМО Серия “Процессы и аппараты пищевых производств”, №1,2014.-С.1-7.

86. Сафаров, М.М., Давлатшоев С.К., Зарипов Дж.А./Устройство для определения электрофизических свойств электролитов в зависимости от давления. Малый патент РТ, № ТЖ 371, 2010г,-7с.

87. Сафаров, М.М., Давлатшоев С.К., Зарипов Дж.А., и др. Устройство для определения влияния влажности на температуропроводность зернистых материалов, Малый патент РТ, № ТЖ 228, -8с

88. Safarov, M.M. Thermodynamics properties binary and ternary of systems (polyethylene glycoly,-waterand hydrazine) in dependence temperature and pressures./ М.М Safarov., Najmudinov Sh.Z, Zaripova M.A., Anaqulov M.M., Zaripov J.A. Conference book, 16 th International conference thermodynamics, properties materials 23-26 June, Budapest 2009, -p.234-235.

89. Сафаров, М.М. Термодинамические свойства влажных порошков.// М.М Сафаров, Пирмадов М.Д., Зарипов Дж.А.-Труды международного научно-технического семинара. « Актуальные проблемы термовлажностной обработки материалов» к 100-летию А.В Лыкова. 11-13 мая 2010, Воронеж, -С.68-74.

90. Сафаров, М.М. Теплофизические свойства простых эфиров и водных растворов гидразина и фенилгидразина при различных температурах и

давлениях: дис...д-ра .техн. наук.01.04.14/Махмадали Махмадиевич Сафаров - Душанбе 1993,- 495с.

91. Самихов, Ш.Р. Кинетика разложения и физико-химическое изучение сульфидномышьяковых концентратов месторождения Чоре. / Ш.Р Самихов, Зинченко З.А. Вестник Таджикского национального университета (научный журнал). Серия естественных наук. Душанбе «Сино», 2012.-С.224-227.

92. Самойлов, О.Я. Структура водных растворов электролитов и гидратации ионов/ О.Я. Самойлов – М.: Издательство АН СССР, 1957.–182с.

93. Самойлов, О.Я. О структуре воды/Укр.физ.ж.-1964.-9.№4.-С.387-393.

94. Самойлов, О.Я. Координационное число в структуре некоторых жидкостей / О.Я Самойлов /ЖФХ.-1946.-Вып.20.-№12.-С.1411-1414.

95. Сирота, А. М. Экспериментальное исследование максимумов теплопроводности воды в критической области/ А.М Сирота, Латунин В.Н., Беляева Г. М. Теплоэнергетика.-1976.-№1.-С.61; 1976.-№6.-С.70-76.

96. Спирин, Г.Г. О теплопроводности воды в окрестности 4°C/ Г.Г Спирин Инженерно-физический журнал.-1980.-№2.-С.339.

97.Соловьев, В.А. Элементарные методы обработки результатов/ В. А Соловьев , Яхонтова В.Е. -Л.: Изд-во ЛГУ, 1977.-86 с.

98. Sevim, F. Kinetic analis of thermal decomposition of boric acid from thermogravimetric data/ F.Sevim, Demir F., Bilen M., Okur H. KoreanJ. Chem, 2006, v. 23(5), pp.736-740.

99. Сергеев, О.А. Метрологические основы теплофизических измерений// Сергеев О.А.- М.: Издательство стандартов, 1972.-156 с.

100. Стальнов, П.И. Метод повышения точности физико-химических измерений/П.И. Стальнов. Тезисы докладов Второй международной теплофизической школы/25-30 сентября 1995. Тамбов- С.238.

101. www.Solarhome.ru.

102. Takizawa, S.X. Thermal conductivity of water by a transient hot wire method/ S. X. Takizawa, Nagashima A., Tanashita I. Proc. 8-th ICPS. Pris: 1974.- V.1.-p.246.

103. Тарзиманов, А.А. Доклад на VIII Международной конференции по свойствам водяного пара-Жиен. 1974.-110 с.

104. Тарзиманов, А.А. Экспериментальное исследование теплопроводности воды при высоких давлениях /А.А Тарзиманов, Лозовой В.С. Доклад 7-я международная конф. по свойствам водяного пара. -Токио.- 1968. – 105с.

105. Тейлор, Дж. Введение в теорию ошибок /Пер. с англ. канд. физ.-мат. наук Л.Г. Деденко - М.: Мир, 1985.-272 с.

106. Тимрот, Д.Л. Теплопроводность воды при высоких температурах/ Д.Л Тимрот, Варгафтик Н.Б. Журнал технической физики.-1940.-10.-№3.- С.1063.

107. Таблицы стандартных справочных данных СТД 261-2012 (ГСССД 261-2011) (Взамен ГСССД 6-89). “Вода. Коэффициент динамической вязкости при температурах 0...900°C и давлениях от соответствующих разреженному газу до 1000 МПа”. М.: Стандартинформ. 2014.-12с

108. Филлипов, Л.П. О теплопроводности водных органических жидкостей/ Л.П Филлипов. Вестник МГУ. Сер. 3.-1960.-№2.-С.43-50.

109. Френкель, Я.И. Кинетическая теория жидкостей//Френкель Я.И. - Л.: Наука, 1975. – 692с.

110. Fritz, W. Absolut besti numung der Wärmeleitfähigkeit van Flüssigkeit/ W Fritz, Poltz H. J. Kritische versuch an liner neuen plattenapparatur.// int. J. Heat Mass. Transfer.-1962.-V.5.-N2.-p.307.

111. Hall, J. The arigin of ultrasonic absorbtion in water/Hall J. / Phys. Rev.-1948.-Vol. 73. N.7.-p.775-781.

112. Чернеева, Л. И. Доклад 7-й Международной конференции По свойствам водяного пара.-Токио.- 1968.-109с.

113. Chelloner, A.R. Thermal conductivity of liquids: New determinations for seven liquids and appraisal of existing values./A.R.Chelloner, Powel R.W. Proc.Roy.Soc., Ser.A., Matematical a physical Sciences. -1956.-A.238.-N1212.-p.90.

114. Шашков, А.Г. Методы определения теплопроводности и температуропроводности / А.Г. Шашков, Волохов Г.М., Абраменко Т.Н.-М.: Энергия, 1973. -335 с.

115. Шевченков, А.А. Оценка кинетических параметров кристаллизации материалов фазовой памяти по результатам ДСК исследований/А.А Шевченков, Козюхин С.А., Бабич А.Б. Труды XIV Международной конференции по термическому анализу и калориметрии в России. 23-28 сентября 2013г. Санкт- Петербург. -С.110-113.

116. Schmidt, E. Warmeleitfähigkeit des Wassers bei Temperaturen bis zu 270°C / E Schmidt, Sellshopp W. Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens.-Bd.3,-1932,-N6.-s.277.

117. Эльдаров, Ф.Г. Теплопроводность неводных растворов солей/ Ф.Г Эльдаров -ЖФХ.-1960.-Т.34.-Вып.6.-С.1205-1211.

118. Теплотехнический справочник. Т.2. Под общей ред. Юренева В.Н и Лебедева П.Д.-М. 1976.-876 с.

119. Магомедов, У.Б., Алхасов А.Б., Магомедов М.М. -Ш. Справочник по теплопроводности и динамической вязкости воды и водных растворов солей/ Под редакцией академика В.Е.Фортова.- М.: ФИЗМАТЛИТ. 2013.-224с

120. Александров, А.А., Григорьев Б.А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара: Справочник.- М.: Изд-во МЭИ,1999. 168 с.;2006. 168 с.

121. Магомедов, У.Б. Теплопроводность воды при высоких параметрах состояния //Вестник ДНЦ РАН. 2003, №15.- С.9-11.

122. Магомедов, У.Б. Теплопроводность воды и ее зависимость от плотности в интервале температур 273-473 К и давлений 0,1-2000 МПа/В

сборнике, Отдела энергетики и геотермомеханики, Институт проблемы геотермии ДНЦ РАН. Махачкала, 2002, -С.71-73.

123. Международные таблицы и уравнения для теплопроводности воды и водяного пара. Справочный материал// Теплоэнергетика. 1980.№4.- С.70-74.

124. Александров, А.А. Скелетная таблица удельного объема воды и водяного пара. Справочный материал// Теплоэнергетика. 1987.№3.-С.71-77.

125. Dietz, F.J., de Groot J.J., and Franck E.U. The Thermal Conductivity of Water to 250°C фтв 350 МПа// Ber.Bunsenges. Phys.Chem. 1981. V.85. №11.- P.1005-1009.

126. Амирханов, Х.И., Адамов А.П., Магомедов У.Б. Экспериментальное исследование теплопроводности воды при температурах 30-200°C и давлении 98,2-686,5 МПа//В сб. Теплофизические свойства веществ и материалов/ ГСССД. М.: Изд-во стандартов. 1984. Вып.21.- С.35-39.

127. Григорьев, Б.А., Ганиев Ю.А., Сафронов Г.А., Ишханов А.М., Расторгуев Ю. Л. Теплопроводность обычной и тяжелой воды и водных растворов неэлектролитов: Госстандарт, ВНИЦ МВ. М.: Изд-во стандартов. 1985.-64с.

128. Амирханов, Х.И., Адамов А.П., Магомедов У.Б. Таблицы рекомендуемых справочных данных. Вода. Теплопроводность воды в диапазоне температур 25-200° С и давлений 100-400 МПа/ Всесоюзный научно - исследовательский центр по материалам и веществам Госстандарта СССР.М.: 1987.-10с. Деп. в ВНИ-ИКИ 10.06.87, №370 кк.87.

129. Григорьев, Б.А., Григорьев Е.Б., Ишханов А.М. Теплопроводность воды в зависимости от температуры и плотности при высоких давлениях. Часть 1: Оборонный комплекс научно-техническому прогрессу России. 2001.№3,- С.55-61.

130. Магомедов, У.Б. Теплопроводность воды и ее зависимость от плотности в интервалах температур 273-473 К и давлений 0.1-2000 МПа/

Сборник Отдела энергетики и геотермомеханики Института проблем геотермии ДНЦ РАН, Махачкала. -2002,- С.71-73.

131. Магомедов, У.Б. Теплопроводность высокоминерализованных растворов воды при высоких давлениях и температурах/ Доклады международной конференции «Тепловое поле Земли и методы его изучения». М.: Россия, 2000.-С.250-253.

132. Магомедов, У.Б. Состояние и перспективы исследований теплофизических свойств воды и водных растворов природных вод при высоких температурах, давлениях и концентрациях/Материалы I Школы молодых ученых “Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов”. Институт проблем геотермии ДНЦ РАН. Махачкала, Россия. Изд-во “Деловой мир”, 2006, -С.81-87.

133. Магомедов, У.Б., Магомедов М.М-Ш. Теплопроводность, вязкость воды и водных растворов солей при различных параметрах состояния/ Материалы научно-практической конференция ”Геологические исследования и их некоторые прикладные аспекты”. Выпуск №51, Изд-во ООО “ДИНЕМ” Института геологии ДНЦ РАН. Махачкала, Россия. 2007,- С.97-102.

134. Магомедов, У.Б., Алиев М.М., Магомедов М.М-Ш. Теплопроводность воды и водных растворов солей при различных температурах, давлениях и концентрациях/ Всероссийская научно- практическая конференция. “Системы обеспечения тепловых режимов преобразователей энергии и системы транспортировки теплоты”. Дагестанский государственный технический университет. 2008.-С 56-62.

135. Магомедов, У.Б., Магомедов М.Ш. Динамическая вязкость обычной и тяжелой воды при высоких параметрах состояния/ Научная конференция “ Проблемы физики полупроводников и теплофизики”. Баку, 2007, Том.13, №12,- С.44-47.

136. Алхасов, А.Б., Магомедов У.Б., Магомедов М.М-Ш. Динамическая вязкость воды и водных растворов солей// Естественные и технические науки. 2009, №6(44). -С.59-63.

137. Зарипова, М.А. Влияние наночастиц на изменение теплофизических, термодинамических свойств некоторых кислородосодержащих, азотосодержащих органических жидкостей при различных температурах и давлениях. /Мохира Абдусаломовна Зарипова// Дисс...д-ра технических наук, Душанбе, 2016, -307с.(200 стр. приложение).

138.Тиллоева, Т.Р. Теплофизические и термодинамические свойства коллоидных водных растворов серебра./ Тахмина Рустамовна Тиллоева// Дисск.т.н., Душанбе, 2016, -164с

139. Едалиева, З.Н. Теплофизические термодинамические характеристики полупроводниковых систем (CdSb-NiSb_2), влияние их на изменение свойств диметилгидразина в зависимости от температуры и давления, Дисск.т.н., Душанбе,- 167с

140. Гуломов, М.М. Влияние углеродных нанотрубок на изменение тепло-, температуропроводности и плотности жидкого диэтилового эфира/ Масрур Мирзохонович Гуломов// Дисс..... к.т.н., Душанбе, 2017, -132с.

141.Теплотехнический справочник, Под общей редакцией Юрнева,В.Н. и Лебедева П.Д.том.1,-М.: Энергия,1975,-748с.

[142-М]. Курбонов, М.Ф. Влияние температуры и наноразмерных порошков на изменение теплоемкости системы сусло+сухие вещества/ Сафаров М.М., Курбонов М.Ф., Зоиров Х.А., Курбонов Ф.Б. //Тезисы докладов 13 Российской конференция по теплофизическим свойствам веществ (с международным участием), Новосибирск-28 июня-1 июля 2011. -С. 173-174.

[143-А]. Курбонов, М.Ф. Влияние влажности на изменение переносных свойств нанопористых материалов/ Сафаров М.М., Пирмадов М.Д., Зарипова М.А., Зоиров Х.А., Зарипов Дж.А., Курбонов М.Ф., Анакулов М.М. //Материалы 4-й Международной научно-практической конференции “Современные энергосберегающие тепловые технологии, СЭТТ-2011”, Т.2, М.:- 2011.- С.383-389

[144-А]. Kurbonov, M.F. Thermal conductivity of jam(plum) and products beer in dependence temperature and pressures/ Safarov M.M., Kurbonov M.F.,

Kurbonov F.B., Zoirov H.A. //Book of abstracts,19 European Conference on Thermophysical Properties, August 28-September1, 2011, Thessaloniki, Greece,- P.334

[145-A]. Курбонов, М.Ф. Влияние нано-, микропорошков на изменение теплоемкости воды и продуктов пива/ Сафаров М.М., Курбонов М.Ф., Зоиров Х.А., Курбонов Ф.Б. ,Юсупов Ш.Т. //Республиканская научно-практическая конференция «Перспективы развития исследований в области химии координационных соединений», посвященная 70-летию О. Азизкуловой. 24 декабря 2011, Душанбе. -С.180-182.

[146-A]. Kurbonov, M.F. Influence vagatable oils to exchange specific heat capacity of aviation kerosene/ Safarov M.M., Kurbonov F.B., Kurbonov M.F., Abdulloeva M., Tagoev S.A. // 18-th Symposium on Thermophysical Properties, Boulder, Colorado USA, June 24-29, 2012, Paper ID 1021

[147-A]. Курбонов, М.Ф. Термодинамические свойства некоторых конденсированных веществ/ Сафаров М.М., Абдуллаева М.А., Курбонов М.Ф., Юсупов Ш.Т., Курбонов Ф.Б.// Материалы 8-й Международной теплофизической школы, посвящённой 60-летию профессора Сафарова М.М. Душанбе-Тамбов 8-13 октября 2012,- С.73-74.

[148-A]. Курбонов, М.Ф. Уравнение состояния систем подсолнечное масло+ н-гексан/ Сафаров М.М., Абдуллаева М.А., Курбонов М.Ф., Юсупов Ш.Т., Курбонов Ф.Б. // Материалы 8-й Международной теплофизической школы, посвящённой 60-летию профессора Сафарова М.М., 8-13 октября 2012, Душанбе-Тамбов, -С.77-80.

[149-A]. Курбонов, М.Ф. Влияние условий аэрации на кинетику сбраживания и теплоемкости пивного сусла и воды/ Сафаров М.М., Курбонов М.Ф., Курбонов Ф.Б.//Материалы 10-й Международной научно-практической конференции, 7-15 января 2014, Образование и наука. Руснаука, Прага, Вып. 26,- С.48-50

[150-A]. Курбонов, М.Ф. Влияние условий аэрации на кинетику и теплопроводность сбраживания пивного сусла/ Сафаров М.М., Курбонов М.Ф.,

Курбонов Ф.Б., Юсупов Ш. Т., Зоиров Х.А.//Труды международной научно-технической конференции "Нанотехнология функциональных материалов (НФМ -2114)" 24-28 июня 2014, Санкт Петербург. - С.416-417.

[151-А]. Курбонов, М.Ф. Расчет коэффициента активности двухкомпонентных водных растворов./ Сафаров М.М., Зарипова М.А., Назруллоев А.С., Курбонов М.Ф., Давлатов Н. Б.,Джураев Д.С. // Материалы Девятой Международной теплофизической школы, Теплофизические исследования и измерения при контроле качества веществ, материалов и изделий, 6-11 октября 2014 г., Душанбе, МТФШ-9.- С.461-465.

[152-А]. Курбонов, М.Ф. Моделирование процесса сушки и увлажнения нано - ультрадисперсных материалов /Сафаров М.М., Шарифов Д.А., Курбонов М.Ф., Джураев Д.С.// Материалы Девятой Международной теплофизической школы, Теплофизические исследования и измерения при контроле качества веществ, материалов и изделий, 6-11 октября 2014 г. Душанбе, МТФШ-9. -С.310-313.

[153-А]. Курбонов, М.Ф. Уравнение состояния типа Тейта для жидких растворов. Теплопроводность/ Сафаров М.М., Курбонов М.Ф., Курбонов Ф.Б., Юсупов Ш.Т., Давлатов Н. Б., Назруллоев А.С., Шарифов Д.А., Ньматов Г.Н. //Материалы Девятой Международной теплофизической школы, Теплофизические исследования и измерения при контроле качества веществ, материалов и изделий, 6-11 октября 2014 г.Душанбе, МТФШ-9.-С.447-452.

[154-А]. Курбонов, М.Ф. Термический анализ и калориметрия пивного сусла. Эксперимент и моделирование/ Сафаров М.М., Курбонов М.Ф., Юсупов Ш. Т., Курбонов Ф.Б., Насруллоев Ф.Х //Материалы Девятой Международной теплофизической школы. Теплофизические исследования и измерения при контроле качества веществ, материалов и изделий. 6-11 октября 2014 г.Душанбе, МТФШ-9.- С.457-460.

[155-А]. Курбонов, М.Ф. Влияние температуры, количество сухого вещества на изменение теплопроводности продуктов пива, без режима аэрации/ Сафаров М.М., Курбонов М. Ф., Курбонов Ф.Б. //Материалы 7 МНПК-

2014, “Научное обозрение физико-математических и технических наук в XXI веке”, Россия, г. Москва, 29. 07. 2014г, Ежемесячный научный журнал “Prospero”, №2. 2014. -С.133-135.

[156-А]. Курбонов, М.Ф. Теплоемкость и энтальпия системы продуктов пива в зависимости от температуры и давления, без режима аэрации/Сафаров М.М., Курбонов М.Ф., Курбонов Ф.Б // Вестник Таджикского национального университета, (научный журнал), Серия естественных наук, Душанбе, Сино, 2016, 1/1 (192),- С.207-215.

[157-А]. Курбонов, М.Ф. Влияние условий аэрации на кинетику сбраживания и термодинамические свойства пивного сусла/ Сафаров М.М., Курбонов М.Ф., Курбонов Ф.Б., Юсупов Ш.Т.//Вестник Таджикского национального университета, (научный журнал), Серия естественных наук, Душанбе, Сино, 2016, 1/4 (216), -С.49-52.

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

[159-А]. Курбонов, М.Ф. Температуропроводность сусла в зависимости от давления/ Сафаров М.М., Курбонов М.Ф., Зоиров Х.А., Курбонов Ф.Б. //Материалы 10-й Международной теплофизической школы, 3-8 октября 2016 г. “Теплофизические исследования и измерения при контроле качества веществ, материалов и изделий”. Душанбе-Тамбов, 2016.- С.222-226.

[160-А]. Курбанов, М.Ф. Комплексная переработка соевых семян/ Сафаров М.М., Курбанов Ф.Б., Юсупов Ш.Т., Зарипов Н.К., Курбонов М.Ф. //Материалы 10-й Международной теплофизической школы, 3-8 октября 2016 г. “Теплофизические исследования и измерения при контроле качества веществ, материалов и изделий”. Душанбе-Тамбов, 2016.-С.591-594.

161. Тамазян, Г.А. Влияние условий аэрации на кинетику сбраживания пивного сусла и качество пива на мини пивзаводах / Гарик Ашотович Тамазян. // Авт. диссер ...к. т. н., Санкт Петербург, 2010.-15с.

162. Рубин, А.Б. Кинетика биологических процессов. /Соросовский образовательный журнал, №10, 1998. -С.84 – 91.

163. Сафаров, М.М. Способ измерения теплофизических характеристик жидкостей и устройство для его осуществления. / М.М. Сафаров, Ш.З. Нажмудинов, С. Давлатшоев, Ш. А. Аминов // Малый патент РТ, № ТЈ 120, заявлено 28.11.2007 г.- 7с.

164. Аминов, Ш.А. Теплофизические, электрические и термодинамические свойства системы “вода + герметик (пентэласт ® - 1161)” в зависимости от температуры и давления./ Шамсуло Асоевич Аминов // Автор. дис. к.т.н. Казань – 2014.- 20 с.

165. Справочник по теплопроводности жидкостей и газов. / Н.Б. Варгафтик, Л.П. Филиппов, А.А. Тарзиманов, Е.Е. Тоцкий. –М.:Энергоатомиздат, 1990.- 358 с.

166. Тамазян, Т. А., Тишин В. Б., Огалниаян В.Г., Меледина Т.В. Влияние кислорода на кинетику биологических процессов при сбраживании пивного сусла // Хранение и переработки сельхоз сырья. -2010-№4-С.29-32.

167. Тамазян, Г. А. Влияние условий аэрации на кинетику потребления кислорода дрожжевыми клетками, в процессе главного брожения, при разных температурах // XI Международная конференция молодых ученых «Пищевые технологии и биотехнологии» - Казань, 2010.-С.181-182.

168. Сафаров, М.М., Гусейнов К.Д. Теплофизические свойства простых эфиров в широком интервале параметров состояния (монография). Душанбе, Изд-во. Дониш, 1996. -196 с.

169. Маджидов, Х., Богданов А. И., Зубайдов С., Сафаров М. М. Экспериментальная установка для измерения теплопроводности твердых материалов. Тр. респуб. научно - практич. конф.1991, г. Курган-тюбе.- С.46.

170. Маджидов, Х., Сафаров М.М., Зубайдов С. Экспериментальная установка для измерения теплоемкости и изменение энтальпии гранулированных веществ/ Сб. физика жидкостей и растворов. 1993. Душанбе.-С.93-96.

171. Сафаров, М.М., Богданов А.И., Зарипова М.А. и др. Экспериментальная установка для измерения теплоемкости жидкостей при высоких параметрах состояния. / Тезисы докл. науч. практ. конф.1993, Душанбе- С.45.

172. Сафаров, М. М., Зарипова М.А., Доброхотов С. Б. Автоматизированный теплофизический комплекс для измерения теплопроводности жидкостей при высоких параметрах состояния/ Метрология, №8-М.: 1994.-С.13-19.

173. Сафаров, М.М., Зарипова М.А. Теплоемкость жидкого диэтилового эфира в зависимости от температуры и давления/ Измерительная техника.1995., №5. М.:-С.42-45.

174. Сафаров, М.М., Хусравов Дж., Ибрагимов М.Ф., Зарипова М.А. Экспериментальная установка для измерения комплекса теплофизических свойств волокон/ Тезисы респб.научн.техн. конф. ТГУ, 1995. Душанбе.- С.84.

175. Сафаров, М.М., Зарипова М.А. Теплофизические свойства водных растворов гидразина/ Метрология,1996. №4. М.:-С.31-35.

176. Сафаров, М.М., Зарипова М.А., Давлатов В.С. Теплоемкость водных растворов диметилгидразина в зависимости от температуры и давления/ ИФЖ.Т.69, №3.1996-Минск. Деп. 1405-Б 96.-8с.

177. Сафаров, М.М., Хусравов Дж., Тургунбаев М.Т. Экспериментальная установка для измерения температуропроводности волокон. Сб.ТУТ. Вып.2., 1996. -Душанбе.- с.53.

178. Сафаров, М.М., Зарипова М.А. Зависимость изобарной теплоемкости и температуропроводности диаллилового эфира от давления и температуры/ Метрология, 1997, №6-М.: -С.19-25.

179. Сафаров, М.М., Юсупов Ш.Т., Тагоев С.А. Теплоемкость хлопкового масла в зависимости от температуры, давления и концентрации чистого бензина/ Метрология, 1997. №4-М.:- С.31-37.

180. Сафаров, М.М., Тагоев С.А., Юсупов Ш.Т. Термодинамические свойства кукурузного масла при различных температурах и давлениях/ Журнал физическая химия. 1997.-Т.71.-№4.-М.: -С.573-575.

181. Сафаров, М.М., Тагоев С.А., Юсупов Ш.Т., Зарипова М.А. Расчет теплоемкости хлопкового масла в интервале температур и давлений/ Пищевая промышленность. 1997.-№9.-М.: -С.120-126.

182. Сафаров, М.М., Кобулиев З.В., Ризоев С.Г. Экспериментальная установка для измерения теплофизических свойств твердых тел. Тезисы докл. 5 МФТШ, 2004, Тамбов.-С.223-225.

183. Сафаров, М.М., Джаманкизов Н., Костромин П.К., Шайкенов Б.А., Содыков Х.С. Удельная изобарная теплоемкость сплава феросилико-алюминия в зависимости от температуры./ физика, научный журнал, Институт физико – технической проблемы и материаловедения им. Академика Ж. Жинбаева, НАРК.2012, №2, Бишкек. -С.55-60.

184. Сафаров, М.М., Нажмудинов Ш.З., Зарипова М.А. и др./ Устройства и способ комплексного определения теплофизических свойств жидкостей// Патент Республики Таджикистан. №ТJ 100 от 13.06.2007. -14 с.

185. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах. Зиновьев В.Е. Справочник. М.: «Металлургия», 1989,- 384 с.

186. Зиновьев, В.Е. Кинетические свойства металлов при высоких температурах: Справочник -М.: “Металлургия”, 1984. -200 с.

187. Touloukian, J.S., Kirbey R.K., Taylor R.E., Deesai P.D. Thermal expansion, metallic elements and Alloys. // Thermophysical prop. matter. – v.12. – New – York – Washington, JFJ/ Plenum. -1975,26.-1938 p.

188. Теплопроводность твердых тел: Справочник / Под. ред. Охотина А.С. – М. Энергоатомиздат.-1984.-321 с.

189. Зиновьев, В.Е., Коршунов И.Г. Теплопроводность и температуропроводность переходных металлов при высоких температурах. / Обзоры по теплофизическим свойствам веществ. – Ч.1.: Обзор экспериментальных данных. -М.: ИВТАН СССР. -1978.-№4.-с.121.

190. Кржижановский, Р.Е., Штерн З.Ю. Теплофизические свойства неметаллических материалов, Л. “Энергия”, 1973. -336 с.

191. Klements, R.Y., Williams R.K. Thermal diffusivity of metals and alloys. // *Metals Rev.*-1986.-v/3v-N5.-p.197-215.

192. Таблицы физических величин: Справочник, / Под.ред. Кикоина И.К.- М.: Атомиздат.-1976.-1006 с.

193. Смитлз, К.Дж. Металлы: Справочник / Перев.с англ. / Под. ред. Глазунова С.Г.-М.: Metallurgia.-1980.-446 с.

194. Зиновьев, В.Е., Полев В.Ф., Талуц С.Г. и др. Температуропроводность и теплопроводность 3d переходных металлов в твердом и жидком состояниях. // *ФММ.*-1986.-ТТ.61.-С.1128-1135.

195. Чиркин, В.С. Теплофизические свойства материалов. Физмат. М.: 1959.

196. Kashiwagi, H., Oishi M., Tanaka Y. et.all. // *Jnt. J. Thermophys.* 1982. Vol. 3, №2. – P. 101-116.

197. Габулов, Д.М. Теплопроводность органических соединений при высоких давлениях: Автореферат дис.... к.т.н., Грозный, 1978.- 22 с.

198. Lis, F.Y., Maitland G.C., Wakeham W.A. // *Jnt. J. Thermophys.* 1984. Vol. 5., №4. – P. 351-365.

199. Пугач, В.В. Исследование теплопроводности воды и некоторых органических жидкостей при высоких давлениях: Автореф. дис....к.т.н. Одесса, 1970, -25 с.

200. Патненко, Н.Ф. Нестационарный метод исследования теплопроводности жидкостей и применение его к высокотемпературным органическим теплоносителям: Автореф. дис.... к.т.н., Киев, 1974. – 23 с.

201. Ахундов, Т.С. // *Известие Вузов. Нефть и газ.* 1974, №2. – С.78-79.

202. Назиев, Я.М. Теплопроводность предельных углеводородов при различных температурах и высоких давлениях: Автореф. Дис. к.т.н., М.: 1962,- 23 с.

203. Филиппов, Л.П. Измерения теплофизических свойств веществ методом периодического нагрева. – М.: Энергоатомиздат. – 1984. – 105 с.

204. Козлов, В.П., Станкевич А.В. Метод неразрушающего контроля при исследовании теплофизических характеристик твердых тел // ИФЖ. – 1984. – Т.47. – №2. – С. 250-255.

205. Чернышев, В.Н. Методы и системы неразрушающего контроля теплозащитных свойств строительных материалов и изделий. М: Издательский дом «Спектр», 2012-200 с.

206. Чуриков, А.А. Интегрирующие поверхностные преобразователи для контактного неразрушающего теплофизического контроля // Вестник ТГТУ. – 1998. – Т.4. №2-3. – С. 283-290.

207. Мердасов, Д.М. Аэрогидродинамические эффекты в бесконтактных струйных методах неразрушающего контроля вязкости жидких веществ. М.: физматлит. 2012. – 354 с.

208. Кименов, Г., Раичков. Г. Метод комплексного определение на теплофизических характеристик // Научные доклады на научной сессии ВМЭИ «В.И. Ленин», - София. – 1983.

209. Раичков, Г., Кименов Г. Синтез на устройства за комплексного определения теплофизических характеристики // Научные доклады на юбилейной научной сессии. В МЭИ «В. И. Ленин». – София. – 1985.

210. ГСССД 16-81. Вода. Удельный объем, энтальпия и энтропия при температурах 0 – 800°C и давлениях 0,001 – 100 МПа.

211. Конькиева, Н.А. Разработка метода и устройства для неразрушающего контроля комплекса теплофизических свойств твердых анизотропных материалов: дис... к.т.н., Тамбов, 2011, - 144 с.

[212-А].Курбонов, М.Ф. Теплофизические свойства сула в зависимости от давления и температуры. /М.Ф. Курбонов/ Вестник Технологического университета Таджикистана, 2(53), 2023, Душанбе, -С 47-55.

ПРИЛОЖЕНИЕ

«УТВЕРЖДАЮ»
 Ректор Технологического
 университета Таджикистана,
 Амонзода И.Т.
 _____ 2023 г.

«СОГЛАСОВАНО»
 Первый проректор-проректор
 по учебной работе и управлением
 качества образования,
 Гошматов М.Н.
 _____ 2023 г.

«СОГЛАСОВАНО»
 Проректор по науке и внедрению
 Технологического университета
 Таджикистана
 Гафаров А.А.
 « 20 » 04 2023 г.

А К Т

о внедрении результатов диссертационной работы соискателя **Курбонова Мухамадали Файзалиевича** на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04-14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника по теме **“Исследование теплофизических, термодинамических, адсорбционных и массообменных процессов производства пива из местного сырья”** в учебном процессе.

Комиссия в составе: председателя Негматовой Г.Д. - начальника учебно-методического управления Технологического университета Таджикистана, к.ф.м.н., доцента и **членов комиссии:** Хасанова А.Р., начальника отдела научно-исследовательских работ и подготовки научных и научно-педагогических кадров, к.э.н., доцента; Хакимова Г.К., декана инженерно-технологического факультета, к.т.н., доцента; Хушматова А.Т., зав. кафедрой технологии пищевых производств к.т.н., доцента, Мирзозода Г.Х. зав. кафедрой машины и аппараты пищевых производств к.т.н., доцент свидетельствуют о том, что соискателем Курбонова Мухамадали Файзалиевича реализованы следующие научные результаты, полученные в кандидатской диссертации:

- исследованы физико-химические, теплофизические и термодинамические свойства равновесного состояния и кинематики термического разложения продуктов пива в выбранном интервале температур (298-379)К, давлений (0,101-9,81)МПа и влияния условий аэрации;

- определены механизмы влияния процесса аэрации семенных дрожжей на физико-химические и термодинамические свойства исследуемой системы «сусло + вода» в интервале разных температурах;

- проведено технико-экономическое обоснование совершенствования технологической схемы производства пива с применением местного сырья Таджикистана.

**Реализация материалов диссертации Курбонова Мухамадали Файзалиевича
 в учебном процессе:**

Представленная технология и разработанная аппаратура для измерения теплоемкости, температуропроводности, теплопроводности и термограммы системы “сусло + вода” и их продукты используются в учебных лабораториях кафедры “Машины и аппараты пищевых производств” и “Технологии пищевых производств” Технологического университета Таджикистана преподавателями, аспирантами, магистрантами и студентами при проведении лекционных, лабораторно-практических занятий по дисциплинам “Процессы и аппараты пищевых

производств”, “Технологическое оборудование отрасли” и “Технологии отрасли”, а также при выполнении НИР и выпускных квалификационных проектов.

Материалы диссертации использованы в следующих документах, материалах и разработках:

[142-М]. Курбонов М.Ф. Влияние температуры и наноразмерных порошков на изменение теплоемкости системы сушло+сухие вещества/ Сафаров М.М., Курбонов М.Ф., Зоиров Х.А., Курбонов Ф.Б. //Тезисы докладов 13 Российская конференция по теплофизическим свойствам веществ (с международным участием), Новосибирск-28 июня-1 июля 2011. - С.173-174.

[143-А]. Курбонов М.Ф. Влияние влажности на изменение переносных свойств нанопористых материалов/ Сафаров М.М., Пирмадов М.Д., Зарипова М.А., Зоиров Х.А., Зарипов Дж.А., Курбонов М.Ф., Анакулов М.М. //Материалы 4 Международная научно-практическая конференция “Современные энергосберегающие тепловые технологии, СЭТТ-2011”, Т.2, Москва-2011.- С.383-389

[144-А]. Kurbonov M.F. Thermal conductivity of jam(plum) and products beer in dependence temperature and pressures/ Safarov M.M., Kurbonov M.F., Kurbonov F.B., Zoirov H.A. //Book of abstracts,19 European Conference on Thermophysical Properties, August 28-September1, 2011, Thessaloniki, Greece,- P.334

[145-А]. Курбонов М.Ф. Влияние наномикропорошков на изменение теплоемкости воды и продуктов пива/ Сафаров М.М., Курбонов М.Ф., Зоиров Х.А., Курбонов Ф.Б., Юсупов Ш.Т.//Республиканская научно-практическая конференция «Перспективы развития исследований в области химии координационных соединений» посвященная 70-летию О. Азизкуловна. 24 декабря 2011, Душанбе. -С.180-182.

[146-А]. Kurbonov M.F. Influence vagatable oils to exchange specific heat capacity of aviation kerosene/ Safarov M.M., Kurbonov F.B., Kurbonov M.F., Abdulloeva M., Tagoev S.A. // 18-th Symposium on Thermophysical Properties, Boulder, Colorado USA, June 24-29, 2012, Paper ID 1021

[147-А]. Курбонов М.Ф. Термодинамические свойства некоторых конденсированных веществ/ Сафаров М.М., Абдуллаева М.А., Курбонов М.Ф., Юсупов Ш.Т., Курбонов Ф.Б.// Материалы 8-я Международная теплофизическая школа, Посвящённый 60-летию профессора Сафарова М.М. Душанбе-Тамбов 8-13 октября 2012,- С.73-74.

[148-А]. Курбонов М.Ф. Уравнение состояния систем подсолнечное масло+ н-гексан/Сафаров М.М., Абдуллаева М.А., Курбонов М.Ф., Юсупов Ш.Т., Курбонов Ф.Б. // Материалы 8 Международной теплофизической школы, Посвящённый 60 летию профессора Сафарова М.М. 8-13 октября 2012, Душанбе-Тамбов- С.77-80.

[149-A]. Курбонов М.Ф. Влияние условий аэрации на кинетику сбраживания и теплоемкости пивного сусла и воды/ Сафаров М.М., Курбонов М.Ф., Курбонов Ф.Б.//Материалы 10 Международная научно-практическая конференция, 7-15 января 2014, Образование и наука. Руснаука, Прага, Вып. 26,- С.48-50

[150-A]. Курбонов М.Ф. Влияние условий аэрации на кинетику и теплопроводность сбраживания пивного сусла/ Сафаров М.М., Курбонов М.Ф., Курбонов Ф.Б., Юсупов Ш.Т., Зоиров Х.А.//Труды международной научно-технической конференции "Нанотехнология функциональных материалов (НФМ -2114)" 24-28 июня 2014, Санкт Петербург. - С.416-417.

[151-A]. Курбонов М.Ф. Расчет коэффициента активности двухкомпонентных водных растворов./ Сафаров М.М., Зарипова М.А., Назрулоев А.С., Курбонов М.Ф., Давлатов Н. Б., Джураев Д.С. // Материалы Девятая Международная теплофизическая школа, Теплофизические исследования и измерения при контроле качества веществ, материалов и изделий, 6-11 октября 2014 г., Душанбе, МТФШ-9.- С.461-465.

[152-A]. Курбонов М.Ф. Моделирование процесса сушки и увлажнения нано - ультрадисперсных материалов /Сафаров М.М., Шарифов Д.А., Курбонов М.Ф., Джураев Д.С.// Материалы Девятая Международная теплофизическая школа, Теплофизические исследования и измерения при контроле качества веществ, материалов и изделий,6-11 октября 2014 г. Душанбе, МТФШ-9. -С.310-313.

[153-A]. Курбонов М.Ф. Уравнения состояния типа Тейта для жидких растворов. Теплопроводность/ Сафаров М.М., Курбонов М.Ф., Курбонов Ф.Б., Юсупов Ш.Т., Давлатов Н. Б., Назруллоев А.С., Шарифов Д.А., Ньматов Г.Н. //Материалы Девятая Международная теплофизическая школа, Теплофизические исследования и измерения при контроле качества веществ, материалов и изделий, 6-11 октября 2014 г. Душанбе, МТФШ-9.-С.447-452.

[154-A]. Курбонов М.Ф. Термический анализ и калориметрия пивного сусла. Эксперимент и моделирование/ Сафаров М.М., Курбонов М.Ф., Юсупов Ш. Т., Курбонов Ф.Б., Назруллоев Ф.Х //Материалы Девятая Международная теплофизическая школа. Теплофизические исследования и измерения при контроле качества веществ, материалов и изделий. 6-11 октября 2014 г. Душанбе, МТФШ-9.- С.457-460.

[155-A]. Курбонов М.Ф. Влияние температуры, количество сухого вещества на изменения теплопроводности продуктов пива, без режима аэрации/ Сафаров М.М., Курбонов М.Ф., Курбонов Ф.Б. //Материалы 7 МНПК-2014, "Научное обозрение физико-математических и технических наук в XXI веке" Россия г. Москва, 29. 07. 2014г, Ежемесячный научный журнал "Prospero", №2. 2014. -С.133-135.

[156-А]. Курбонов М.Ф. Теплоемкость и энтальпия системы продуктов пива в зависимости от температуры и давления, без режима аэрации/Сафаров М.М., Курбонов М.Ф., Курбонов Ф.Б // Вестник Таджикского национального университета, (научный журнал), Серия естественных наук, Душанбе, Сино, 2016, 1/1 (192),- С.207-215.

[157-А]. Курбонов М.Ф. Влияние условий аэрации на кинетику сбраживания термодинамические свойства пивного суслу/ Сафаров М.М., Курбонов М.Ф., Курбонов Ф.Б., Юсупов Ш.Т.//Вестник Таджикского национального университета, (научный журнал), Серия естественных наук, Душанбе, Сино, 2016, 1/4 (216), -С.49-52.


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

[159-А]. Курбонов М.Ф. Температуропроводность суслу в зависимости от давления/ Сафаров М.М., Курбонов М.Ф., Зоиров Х.А., Курбонов Ф.Б.// Материалы 10 Международная теплофизическая школа, 3-8 октября 2016 г. “Теплофизические исследования и измерения при контроле качества веществ, материалов и изделий”. Душанбе-Тамбов, 2016.- С.222-226.

Практические результаты диссертационной работы прошли апробацию на ООО «Санет» пиво- безалкогольных продукции района Рудаки.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ КОМИССИИ

ЧЛЕНЫ КОМИССИИ:

 Негматова Г.Д.

 Хасанов А.Р.

 Хакимов Г.К.

 Хушматов А.Т.

 Мирзозода Г.Х.

 Курбонов М.Ф.

СОИСКАТЕЛЬ

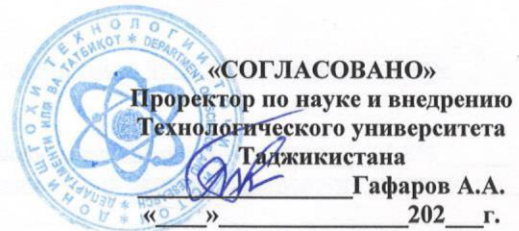
Подписи к.ф.м.н., доцента Негматова Г.Д., к.э.н., доцента Хасанова А.Р., к.т.н., доцентов Хакимова Г.К., Хушматова А.Т., Мирзозода Г.Х. и соискателя ученой степени Курбонова М.Ф. заверяю:

Начальник отдела кадров
и специальных работ
Технологического университета
Таджикистана





Бухориев Н.А.



АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов научно-исследовательской работы (кандидатской диссертации)
 в производство

Заказчик ООО «Санет»
 (наименование организации, учреждения)
АЗИЗОВ Алишер Сангалиевич
 (Ф.И.О. руководителя организации)

Настоящим актом подтверждается, что результатом диссертационной работы
 соискателя Курбонова Мухамадали Файзалиевича

Выполненной учеными преподавателями Технологического университета Таджикистана
 и Таджикского технического университета им. акад. М.С. Осими совместно с ООО
 «Санет» района Рудаки
 (наименование ВУЗа, НИИ, КБ, ТБ)

Стоимостью 153 тыс. сомони (Сто пятьдесят тысяч сомони)
 (цифрами и прописью)

Выполненной: в период с 2015г. по 2023г. года
 (сроки выполнения)

Внедрено: в августе 2022 года в цехе по производству пива

1. Вид внедренных результатов Технология производства пива
 (эксплуатация изделия, работы, технология производства)

2. Характеристика масштаба внедрения Единичное
 (уникальное, единичное, партия, массовое, серийное)

3. Форма внедрения
 Методика (метод) Опытный образец

4. Новизна результатов научно-исследовательской работы Новое -технология производства пива с применением местного сырья
 (принципиально новые, модернизация старых разработок)

5. Опытно-промышленная проверка 20 августа 2022г.
 (указать номер и дату)

- в промышленное производство ООО «Санет» района Рудаки
 (указать объект, предприятие, учреждение)

6. Годовой экономический эффект
 ожидаемый 45900 сомони (Сорок пять тысяч девятьсот сомони)

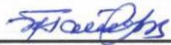
фактический 39474 сомони (Тридцать девять тысяч четыреста семьдесят четыре сомони)


7. Удельная экономическая эффективность внедрения результатов 25,8%
 8. Объём внедрения: Разработанная оборудования и технология внедрено в
линии по производству пива
 что составляет 100 % от внедрения положенного в
 основу гарантированного экономического эффекта, рассчитанного по окончании НИР
 9. Социальный и научно-технический эффект Улучшение условий труда в цехе по производству пива и обеспечена системы менеджмента
качества выпускаемой продукции
 (охрана окружающей среды, улучшение условий труда)


(научно-технических направлений, социальные назначения и т.д.)

Примечание: настоящий акт внедрения заверяется гербовой печатью со стороны Заказчика и стороны исполнителя.

От ТУТ:

К.т.н., доцент Хакимов Г. К. /  /
 (Научный консультант из ТУТ)

К.т.н., доцент Хушматов А.Т /  /
 (Ответственный руководитель по технологической части)

От ТТУ им акад. М.С. Осими:
Д.т.н., профессор Сафаров М. М. /  /
 (Научный консультант из ТТУ)

От предприятия: Гл. технолог ООО «Сонет» Курбонов А.Ф. /  /
 (руководитель цеха)

ПРИЛОЖЕНИЕ П.3

Метод расчета констант и энергия активации (уравнение 3.7)

$$\lg(1-a) = \frac{K\tau}{2,303}, T = 279,7\text{K} \frac{1}{T} = 0,00358 \quad a = 0,4 \%$$

$$a = 0,004$$

$$K = \frac{2,303 \cdot \lg(1-a)}{\tau} = \frac{2,303 \lg(1-0,004)}{0,4} = \frac{2,303 \lg(0,996)}{0,4} = \frac{2,303(-1,74 \cdot 10^{-3})}{0,4} = -10 \cdot 10^{-3} \frac{1}{c}$$

$$a = 0,008$$

$$K = \frac{2,303 \cdot \lg(1-a)}{\tau} = \frac{2,303 \lg(1-0,008)}{0,6} = \frac{2,303 \lg(0,992)}{0,6} = \frac{2,303(-3,4910^{-3})}{0,6} = -12 \cdot 10^{-3} \frac{1}{c}$$

$$a = 0,016$$

$$K = \frac{2,303 \cdot \lg(1-a)}{\tau} = \frac{2,303 \lg(1-0,016)}{0,8} = \frac{2,303 \lg(0,984)}{0,8} = \frac{2,303(-0,984 \cdot 10^{-3})}{0,8} = -20 \cdot 10^{-3} \frac{1}{c}$$

$$a = 0,018$$

$$K = \frac{2,303 \cdot \lg(1-a)}{\tau} = \frac{2,303 \lg(1-0,018)}{1} = \frac{2,303 \lg(0,982)}{1} = \frac{2,303(-3,49 \cdot 10^{-3})}{1} = -18,2 \cdot 10^{-3} \frac{1}{c}$$

$$a = 0,018$$

$$K = \frac{2,303 \cdot \lg(1-a)}{\tau} = \frac{2,303 \lg(1-0,02)}{2,5} = \frac{2,303 \lg(0,98)}{2,5} = -8,08 \cdot 10^{-3} \frac{1}{c}$$

№	K	lgK	T, K	1/T
1	$-10 \cdot 10^{-3} \frac{1}{c}$	2,00	279,7	$3,58 \cdot 10^{-3}$
2	$-12 \cdot 10^{-3} \frac{1}{c}$	1,920		
3	$-20 \cdot 10^{-3} \frac{1}{c}$	1,682		
4	$-18,2 \cdot 10^{-3} \frac{1}{c}$	1,799		
5	$-8,08 \cdot 10^{-3} \frac{1}{c}$	2,093		

2-объект

$$\lg(1-a) = \frac{K\tau}{2,303}, T = 280,0\text{K}, \frac{1}{T} = 0,00357,$$

$$a = 0,004$$

$$K = \frac{2,303 \cdot \lg(1-a)}{\tau} = \frac{2,303 \lg(1-0,004)}{2,5c} = \frac{2,303 \lg(0,996)}{2,5c} = -1,6 \cdot 10^{-3} \frac{1}{c}$$

$$K = \frac{2,303 \cdot \lg(1-a)}{\tau} = \frac{2,303 \lg(1-0,008)}{2,8c} = \frac{2,303 \lg(0,992)}{2,8c} = -5,24 \cdot 10^{-3} \frac{1}{c}$$

$$K = \frac{2,303 \cdot \lg(1-a)}{\tau} = \frac{2,303 \lg(1-0,016)}{3,0c} = \frac{2,303 \lg(0,984)}{3,0c} = -5,37 \cdot 10^{-3} \frac{1}{c}$$

$$K = \frac{2,303 \cdot \lg(1-a)}{\tau} = \frac{2,303 \lg(1-0,018)}{3,2c} = \frac{2,303 \lg(0,982)}{3,2c} = -5,68 \cdot 10^{-3} \frac{1}{c}$$

$$K = \frac{2,303 \cdot \lg(1-a)}{\tau} = \frac{2,303 \lg(1-0,02)}{3,6c} = \frac{2,303 \lg(0,98)}{3,6c} = -5,63 \frac{1}{c}$$

$$\lg(1-a) = \frac{K\tau}{2,303}, T = 280,7, K, \frac{1}{T} = 0,0036$$

$$a = 0,004$$

$$K = \frac{2,303 \cdot \lg(1-a)}{\tau} = \frac{2,303 \lg(1-0,004)}{0,8c} = \frac{2,303 \lg(0,996)}{0,8c} = -4,26 \cdot 10^{-3} \frac{1}{c}$$

$$K = \frac{2,303 \cdot \lg(1-a)}{\tau} = \frac{2,303 \lg(1-0,008)}{7,5c} = \frac{2,303 \lg(0,992)}{7,5c} = -1,07 \cdot 10^{-3} \frac{1}{c}$$

$$K = \frac{2,303 \cdot \lg(1-a)}{\tau} = \frac{2,303 \lg(1-0,016)}{6,5c} = \frac{2,303 \lg(0,984)}{6,5c} = -2,42 \cdot 10^{-3} \frac{1}{c}$$

$$K = \frac{2,303 \cdot \lg(1-a)}{\tau} = \frac{2,303 \lg(1-0,018)}{9,5c} = \frac{2,303 \lg(0,982)}{9,5c} = -1,91 \cdot 10^{-3} \frac{1}{c}$$

$$K = \frac{2,303 \cdot \lg(1-a)}{\tau} = \frac{2,303 \lg(1-0,02)}{7,2c} = \frac{2,303 \lg(0,98)}{7,2c} = -9,81 \cdot 10^{-3} \frac{1}{c}$$

№	K	lgK	T, K	$\frac{1}{T}$
1	$-1,6 \cdot 10^{-3} \frac{1}{c}$	2,796	280,0	$3,57 \cdot 10^{-3}$
2	$-5,24 \cdot 10^{-3} \frac{1}{c}$	1,281		
3	$-5,37 \cdot 10^{-3} \frac{1}{c}$	1,270		
4	$-5,68 \cdot 10^{-3} \frac{1}{c}$	1,245		
5	$-5,63 \cdot 10^{-3} \frac{1}{c}$	2,249		

3-объект

$$\lg(1-a) = \frac{K\tau}{2,303}, T = 281,5K, \frac{1}{T} = 0,00355,$$

$$a = 0,004$$

$$K = \frac{2,303 \cdot \lg(1-a)}{\tau} = \frac{2,303 \lg(1-0,004)}{0,8c} = \frac{2,303 \lg(-1,74 \cdot 10^{-3})}{0,8c} = -5,01 \cdot 10^{-3} \frac{1}{c}$$

$$K = \frac{2,303 \cdot \lg(1-a)}{\tau} = \frac{2,303 \lg(1-0,008)}{7,5c} = \frac{2,303 \lg(-3,49 \cdot 10^{-3})}{7,5c} = -2,68 \cdot 10^{-3} \frac{1}{c}$$

$$K = \frac{2,303 \cdot \lg(1-a)}{\tau} = \frac{2,303 \lg(1-0,016)}{6,5c} = \frac{2,303 \lg(-7,0 \cdot 10^{-3})}{6,5c} = -3,58 \cdot 10^{-3} \frac{1}{c}$$

$$K = \frac{2,303 \cdot \lg(1-a)}{\tau} = \frac{2,303 \lg(1-0,018)}{9,5c} = \frac{2,303 \lg(-7,89 \cdot 10^{-3})}{9,5c} = -3,49 \frac{1}{c}$$

$$K = \frac{2,303 \cdot \lg(1-a)}{\tau} = \frac{2,303 \lg(1-0,02)}{7,2c} = \frac{2,303 \lg(-8,8 \cdot 10^{-3})}{7,2c} = -5,79 \cdot 10^{-3} \frac{1}{c}$$

$$T = 282K, \frac{1}{T} = 0,00367,$$

$$K = \frac{2,303 \cdot \lg(1-a)}{\tau} = \frac{2,303 \lg(1-0,004)}{1,0c} = \frac{2,303 \lg(-1,74 \cdot 10^{-3})}{1,0c} = -4,01 \cdot 10^{-3} \frac{1}{c}$$

$$K = \frac{2,303 \cdot \lg(1-a)}{\tau} = \frac{2,303 \lg(1-0,008)}{6,5c} = \frac{2,303 \lg(-3,49 \cdot 10^{-3})}{6,5c} = -1,24 \cdot 10^{-3} \frac{1}{c}$$

$$K = \frac{2,303 \cdot \lg(1-a)}{\tau} = \frac{2,303 \lg(1-0,016)}{7c} = \frac{2,303 \lg(-7,0 \cdot 10^{-3})}{7c} = -2,303 \cdot 10^{-3} \frac{1}{c}$$

$$K = \frac{2,303 \cdot \lg(1-a)}{\tau} = \frac{2,303 \lg(1-0,018)}{14c} = \frac{2,303 \lg(-7,89 \cdot 10^{-3})}{14c} = -1,29 \cdot 10^{-3} \frac{1}{c}$$

$$K = \frac{2,303 \cdot \lg(1-a)}{\tau} = \frac{2,303 \lg(1-0,02)}{4,2c} = \frac{2,303 \lg(-8,8 \cdot 10^{-3})}{4,2c} = -4,83 \frac{1}{c}$$

№	K	lgK	T, K	$\frac{1}{T}$
1	$-5,01 \cdot 10^{-3} \frac{1}{c}$	2,300	281	$3,55 \cdot 10^{-3}$
2	$-2,68 \cdot 10^{-3} \frac{1}{c}$	1,572		
3	$-3,58 \cdot 10^{-3} \frac{1}{c}$	1,446		
4	$-3,49 \cdot 10^{-3} \frac{1}{c}$	1,457		
5	$-5,79 \cdot 10^{-3} \frac{1}{c}$	2,237		

4-объект

$$\lg(1-a) = \frac{K\tau}{2,303}, T = 282,2K, \frac{1}{T} = 0,00354,$$

$$K = \frac{2,303 \cdot \lg(1-a)}{\tau} = \frac{2,303 \lg(1-0,004)}{1,2} = \frac{2,303 \lg(-1,74 \cdot 10^{-3})}{1,2c} = -3,34 \cdot 10^{-3} \frac{1}{c}$$

$$K = \frac{2,303 \cdot \lg(1-a)}{\tau} = \frac{2,303 \lg(1-0,008)}{6c} = \frac{2,303 \lg(-3,49 \cdot 10^{-3})}{6c} = -1,34 \cdot 10^{-3} \frac{1}{c}$$

$$K = \frac{2,303 \cdot \lg(1-a)}{\tau} = \frac{2,303 \lg(1-0,016)}{7,5c} = \frac{2,303 \lg(-7,0 \cdot 10^{-3})}{7,5c} = -2,15 \cdot 10^{-3} \frac{1}{c}$$

$$K = \frac{2,303 \cdot \lg(1-a)}{\tau} = \frac{2,303 \lg(1-0,018)}{14c} = \frac{2,303 \lg(-7,89 \cdot 10^{-3})}{14c} = -1,29 \cdot 10^{-3} \frac{1}{c}$$

№	K	lgK	T, K	$\frac{1}{T}$
1	$-3,34 \cdot 10^{-3}$	2,476	282,2	$3,54 \cdot 10^{-3}$
2	$-1,34 \cdot 10^{-3} \frac{1}{c}$	2,873		
3	-	2,668		
4	2,15· $10^{-3} \frac{1}{c} - 1,29 \cdot 10^{-3} \frac{1}{c}$	2,889		

$$T = 282,5 \text{ K}, \frac{1}{T} = 0,00354,$$

$$K = \frac{2,303 \cdot \lg(1-a)}{\tau} = \frac{2,303 \lg(1-0,004)}{1,4} = \frac{2,303 \lg(-1,74 \cdot 10^{-3})}{1,4c} = -2,86 \cdot 10^{-3} \frac{1}{c}$$

$$K = \frac{2,303 \cdot \lg(1-a)}{\tau} = \frac{2,303 \lg(1-0,008)}{25c} = \frac{2,303 \lg(-3,49 \cdot 10^{-3})}{25c} = -0,32 \cdot 10^{-3} \frac{1}{c}$$

$$K = \frac{2,303 \cdot \lg(1-a)}{\tau} = \frac{2,303 \lg(1-0,016)}{15,8c} = \frac{2,303 \lg(-7,0 \cdot 10^{-3})}{15,8c} = -1,02 \cdot 10^{-3} \frac{1}{c}$$

$$K = \frac{2,303 \cdot \lg(1-a)}{\tau} = \frac{2,303 \lg(1-0,018)}{31c} = \frac{2,303 \lg(-7,89 \cdot 10^{-3})}{31c} = -0,59 \cdot 10^{-3} \frac{1}{c}$$

$$K = \frac{2,303 \cdot \lg(1-a)}{\tau} = \frac{2,303 \lg(1-0,02)}{5,0c} = \frac{2,303 \lg(-8,8 \cdot 10^{-3})}{5,0c} = -4,05 \cdot 10^{-3} \frac{1}{c}$$

№	K	lgK	T, K	$\frac{1}{T}$
1	$-2,86 \cdot 10^{-3}$	2,544	282,5	$3,538 \cdot 10^{-3}$
2	$-0,32 \cdot 10^{-3} \frac{1}{c}$	1,495		
3	$-1,02 \cdot 10^{-3} \frac{11}{c c}$	2,991		
4	$-0,59 \cdot 10^{-3} \frac{11}{c c}$	1,229		
5	$-4,05 \cdot 10^{-3} \frac{11}{c c}$	1,393		

$$T = 283 \text{ K}, \frac{1}{T} = 0,00353$$

$$K = \frac{2,303 \cdot \lg(1-a)}{\tau} = \frac{2,303 \lg(1-0,004)}{1,6} = \frac{2,303 \lg(-1,74 \cdot 10^{-3})}{1,6c} = -2,5 \cdot 10^{-3} \frac{1}{c}$$

$$K = \frac{2,303 \cdot \lg(1-a)}{\tau} = \frac{2,303 \lg(1-0,008)}{36c} = \frac{2,303 \lg(-3,49 \cdot 10^{-3})}{36c} = -0,28 \cdot 10^{-3} \frac{1}{c}$$

$$K = \frac{2,303 \cdot \lg(1-a)}{\tau} = \frac{2,303 \lg(1-0,016)}{26c} = \frac{2,303 \lg(-7,0 \cdot 10^{-3})}{26c} = -0,62 \cdot 10^{-3} \frac{1}{c}$$

$$K = \frac{2,303 \cdot \lg(1-a)}{\tau} = \frac{2,303 \lg(1-0,018)}{55c} = \frac{2,303 \lg(-7,89 \cdot 10^{-3})}{55c} = -0,33 \cdot 10^{-3} \frac{1}{c}$$

$$K = \frac{2,303 \cdot \lg(1-a)}{\tau} = \frac{2,303 \lg(1-0,02)}{43c} = \frac{2,303 \lg(-8,8 \cdot 10^{-3})}{43c} = -0,47 \cdot 10^{-3} \frac{1}{c}$$

№	K	lgK	T, K	$\frac{1}{T}$
1	$-2,5 \cdot 10^{-3}$	2,602	283	$3,53 \cdot 10^{-3}$
2	$-0,28 \cdot 10^{-3} \frac{1}{c}$	1,659		
3	$-1,62 \cdot 10^{-3} \frac{11}{c c}$	1,208		
4	$-0,33 \cdot 10^{-3} \frac{11}{c c}$	1,481		
5	$-4,47 \cdot 10^{-3} \frac{11}{c c}$	1,328		

Энергия активации

$$E = \frac{2,3 \cdot R \cdot T_2 \cdot T_1}{T_2 - T_1} \text{Lg} \frac{K_2}{K_1} T_1 = 280,7 \text{ K} \quad T_2 = 283 \text{ K} \quad \lg(1-a) = \frac{K\tau}{2,303} K = \frac{2,303 \cdot \lg(1-a)}{\tau}$$

$a = 1c$

$$K_1 = \frac{2,303 \cdot \lg(1-a)}{1c} = \frac{2,303 \cdot \lg(\frac{1}{1-a})}{1c} = \frac{2,303 \cdot 7,32 \cdot 10^{-3}}{1c} = 16,86 \cdot 10^{-3} \frac{1}{c}$$

$$K_2 = \frac{2,303 \cdot \lg(1-a)}{1c} = \frac{2,303 \cdot \lg(\frac{1}{1-a})}{1c} = \frac{2,303 \cdot 0,87 \cdot 10^{-3}}{1c} = 2,004 \cdot 10^{-3} \frac{1}{c}$$

$$E = \frac{2,3 \cdot 8,31 \cdot 283 \cdot 280,7}{283 - 280,7} \text{Lg} \frac{16,86 \cdot 10^{-3}}{2,004 \cdot 10^{-3}} = 6,6 \cdot 10^6 \text{Lg} 8,413 = 6,11 \cdot 10^6 \text{ Дж/мол}$$

$$E = \frac{2,3 \cdot R \cdot T_2 \cdot T_1}{T_2 - T_1} \text{Lg} \frac{K_2}{K_1} T_1 = 280,7 \text{ K} \quad T_2 = 283 \text{ K} \quad \lg(1-\square) = \frac{K\tau}{2,303} K = \frac{2,303 \cdot \lg(1-a)}{\tau}$$

$a = 3c$

$$K_1 = \frac{2,303 \cdot \lg(1-a)}{1c} = \frac{2,303 \cdot \lg(\frac{1}{1-a})}{3c} = \frac{2,303 \cdot 7,02 \cdot 10^{-3}}{3c} = \frac{16,17 \cdot 10^{-3}}{3} = 5,38 \cdot 10^{-3} \frac{1}{c}$$

$$K_2 = \frac{2,303 \cdot \lg(1-a)}{3c} = \frac{2,303 \cdot \lg(\frac{1}{1-a})}{3c} = \frac{2,303 \cdot 2,34 \cdot 10^{-3}}{3c} = \frac{5,38 \cdot 10^{-3}}{3} = 1,7910^{-3} \frac{1}{c}$$

$$E = \frac{2,3 \cdot 8,31 \cdot 283 \cdot 280,7}{2,3} \text{Lg} \frac{5,39 \cdot 10^{-3}}{1,79 \cdot 10^{-3}} =$$

$$660130,6 \cdot \text{Lg} 3,011 = 0,66 \cdot 10^6 \text{Lg} 3,011 = 0,66 \cdot 10^6 \cdot 0,478 = 0,315 \cdot 10^6 \text{ Дж/мол}$$

$a = 5c T_1 = 280,7 \text{ K}; \quad T_2 = 283 \text{ K}$

$$K_1 = \frac{2,303 \cdot \lg(1-a)}{5c} = \frac{2,303 \cdot \lg(\frac{1}{1-a})}{5c} = \frac{2,303 \cdot 5,58 \cdot 10^{-3}}{5c} = \frac{12,851 \cdot 10^{-3}}{5} = 2,57 \cdot 10^{-3} \frac{1}{c}$$

$$K_2 = \frac{2,303 \cdot \lg(1-a)}{5c} = \frac{2,303 \cdot \lg(\frac{1}{1-a})}{5c} = \frac{2,303 \cdot 3,68 \cdot 10^{-3}}{5c} = \frac{8,475 \cdot 10^{-3}}{5} = 1,6910^{-3} \frac{1}{c}$$

$$E = \frac{2,3 \cdot 8,31 \cdot 283 \cdot 280,7}{2,3} \text{Lg} \frac{2,57 \cdot 10^{-8}}{1,69 \cdot 10^{-8}} = 0,66 \cdot 10^6 \text{Lg} 1,5207 = 0,66 \cdot 10^6 \cdot 0,182 = 0,12 \cdot 10^6 \text{Дж/мол}$$

Л

$$a = 8c \quad T_1 = 280,7 \text{ K}; \quad T_2 = 283 \text{ K}$$

$$K_1 = \frac{2,303 \cdot \text{lg}(1-a)}{8c} = \frac{2,303 \cdot \text{lg}(\frac{1}{1-a})}{8c} = \frac{2,303 \cdot 8 \cdot 10^{-8}}{8c} = 2,303 \cdot 10^{-3} \frac{1}{c}$$

$$K_2 = \frac{2,303 \cdot \text{lg}(1-a)}{8c} = \frac{2,303 \cdot \text{lg}(\frac{1}{1-a})}{8c} = \frac{2,303 \cdot 5,48 \cdot 10^{-8}}{8c} = 1,578 \cdot 10^{-3} \frac{1}{c}$$

$$E = \frac{2,3 \cdot 8,31 \cdot 283 \cdot 280,7}{2,3} \text{Lg} \frac{2,303 \cdot 10^{-8}}{1,578 \cdot 10^{-8}} = 0,66 \cdot \text{Lg} 1,459 = 0,66 \cdot 10^6 \cdot 0,164 = 0,108 \cdot 10^6 \text{Дж/мол}$$

$$a = 11c \quad T_1 = 280,7 \text{ K}; \quad T_2 = 283 \text{ K}$$

$$K_1 = \frac{2,303 \cdot \text{lg}(1-a)}{11c} = \frac{2,303 \cdot \text{lg}(\frac{1}{1-a})}{11c} = \frac{2,303 \cdot 8,68 \cdot 10^{-8}}{11c} = 1,817 \cdot 10^{-3} \frac{1}{c}$$

$$K_2 = \frac{2,303 \cdot \text{lg}(1-a)}{11c} = \frac{2,303 \cdot \text{lg}(\frac{1}{1-a})}{11c} = \frac{2,303 \cdot 6,46 \cdot 10^{-8}}{11c} = 1,352 \cdot 10^{-3} \frac{1}{c}$$

$$E = \frac{2,3 \cdot 8,31 \cdot 283 \cdot 280,7}{2,3} \text{Lg} \frac{1,817 \cdot 10^{-8}}{1,352 \cdot 10^{-8}} = 0,66 \cdot \text{Lg} 1,3439 = 0,66 \cdot 10^6 \cdot 0,128 = 0,084 \cdot 10^6 \text{Дж/мол}$$

$$\square = 14c, \quad T_1 = 280,7 \text{ K} \quad T_2 = 283 \text{ K}$$

$$K_1 = \frac{2,303 \cdot \text{lg}(1-a)}{14c} = \frac{2,303 \cdot \text{lg}(\frac{1}{1-a})}{14c} = \frac{2,303 \cdot 8,34 \cdot 10^{-8}}{14c} = 1,372 \cdot 10^{-3} \frac{1}{c}$$

$$K_2 = \frac{2,303 \cdot \text{lg}(1-a)}{14c} = \frac{2,303 \cdot \text{lg}(\frac{1}{1-a})}{14c} = \frac{2,303 \cdot 6,55 \cdot 10^{-8}}{14c} = 1,077 \cdot 10^{-3} \frac{1}{c}$$

$$E = \frac{2,3 \cdot 8,31 \cdot 283 \cdot 280,7}{2,3} \text{Lg} \frac{1,372 \cdot 10^{-8}}{1,077 \cdot 10^{-8}} = 0,66 \cdot \text{Lg} 1,274 = 0,66 \cdot 10^6 \cdot 0,105 = 0,069 \cdot 10^6 \text{Дж/мол}$$