

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Школа Инженерная школа энергетики

Направление подготовки 13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника

Отделение школы (НОЦ) И.Н. Бутакова

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Создание высокотемпературной газопарокапельной смеси с контролируемой дисперсностью аэрозоля

УДК 621.1.016.7:536.45

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ7Э	Соломатин Ярослав		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ИШЭ	Шидловский Станислав Викторович	Д.Т.Н., профессор		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	И.В. Подопригора	К.Э.Н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ООД ШБИП	О.А.Куликова	К.Т.Н.		

Нормоконтроль

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ст. преподаватель НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ	М.А. Вагнер	К.Т.Н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Экологически чистые технологии преобразования энергоносителей	В.Е. Губин	К.Т.Н., доцент		

Томск – 2019 г.

**Запланированные результаты обучения выпускника образовательной программы
магистра по направлению в соответствии целями основной образовательной
программы, видами и задачами профессиональной деятельности, указанными в
ФГОС ВО 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»**

Код	Результат обучения
	<i>расчетно-проектная и проектно-конструкторская деятельность:</i>
P1	Применять передовые знания и достижения для формулирования заданий на разработку проектных решений, проектировать инновационное оборудование, системы и установки для экологически чистого преобразования энергоносителей
	<i>производственно-технологическая деятельность:</i>
P2	Интегрировать знания различных областей для разработки мероприятий по совершенствованию технологии производства, обеспечению экономичности, надежности и безопасности эксплуатации, ремонта и модернизации оборудования преобразования энергоносителей
P3	Применять современные методы и средства практической инженерной деятельности в сфере создания и эксплуатации современного оборудования и установок для экологически чистого преобразования энергоносителей
P4	Применять знания нетехнических ограничений инженерной деятельности, разрабатывать мероприятия по безопасности жизнедеятельности персонала и населения, предотвращать экологические нарушения
	<i>научно-исследовательская деятельность:</i>
P5	Планировать и ставить задачи инновационного инженерного исследования, выявлять приоритеты решения задач, выбирать и создавать критерии оценки, применять инновационные методы исследования, проводить исследования, критически интерпретировать, публично представлять и обсуждать результаты научных исследований
	<i>организационно-управленческая деятельность:</i>
P6	Руководить коллективом специалистов различных направлений и квалификаций, действовать в нестандартных ситуациях, принимать организационно-управленческие решения и нести за них ответственность при организации работ
	<i>педагогическая деятельность:</i>
P7	Осуществлять педагогическую деятельность в области профессиональной подготовки
	<i>Универсальные компетенции</i>

P8	Мыслить абстрактно, обобщать, анализировать, систематизировать и прогнозировать, принимать решения в сложных инженерных задачах с технической неопределенностью и недостатком информации
P9	использовать творческий потенциал, саморазвиваться, самореализовываться
P10	Работать в команде, управлять проектом, использовать иностранный язык для эффективного взаимодействия в профессиональной сфере, осуществлять межкультурное взаимодействие
	Профиль «Экологически чистые технологии преобразования энергоносителей»
P11	Проводить моделирование, проектирование, технико-экономический анализ эффективности проектных решений в сфере экологически чистых технологий преобразования энергоносителей, с учетом требований охраны окружающей среды
P12	Использовать автоматизированные системы управления технологическими процессами экологически чистого преобразования энергоносителей

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Школа ИШЭ

Направление подготовки 13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника

Отделение школы (НОЦ) И.Н. Бутакова

УТВЕРЖДАЮ:
Руководитель НОЦ И.Н. Бутакова
_____ Заворин А.С.

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
5БМ7Э	Соломатину Ярославу

Тема работы:

Создание высокотемпературной газопарокапельной смеси с контролируемой дисперсностью аэрозоля	
Утверждена приказом директора №	1065/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:	30.05.2019
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Объектом проектирования является генератор высокотемпературной газопарокапельной смеси. Автоматизированная система должна обеспечивать контролируемую дисперсность аэрозоля, впрыскиваемого в камеру смешения генератора. При разработке автоматизированной системы управления процессом расхода воды предусмотреть использование современных микропроцессорных технических средств автоматизации для реализации функций автоматизированного контроля параметров и управления системы.
--------------------------	--

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	1 Исследовательские изыскания. 2 Проектирование АСУ газопарокапельного генератора. 3 Схема взаимосвязи оборудования верхнего и полевого уровней. 4 Разработка принципиальной электрической схемы автоматизированной системы управления. 5 Разработка монтажной схемы автоматизированной системы управления. 6. Разработка чертежа общего вида щитовой конструкции АСУ. 7. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение. 8. Социальная ответственность.
Перечень графического материала	1 Схемы структурная. 2 Схема функциональная. 3 Схема принципиальная электрическая щита управления. 4 Схема монтажная. 5 Общий вид щита управления.

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Подопригора Игнат Валерьевич
Социальная ответственность	Куликова Ольга Александровна

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	10.02.19
--	----------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ИШЭ	Шидловский Станислав Викторович	д.т.н., профессор		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ7Э	Соломатин Ярослав		

Реферат

Выпускная квалификационная работа содержит 126 с., 19 рис., 19 табл., 75 источников.

Ключевые слова: газопарокапельная смесь, многокомпонентный теплоноситель, генератор, автоматизированная система управления, теплотехника, автоматизация.

Объектом автоматизации является генератор газопарокапельной смеси.

Цель работы – проектирование автоматизированной системы управления расхода воды генератор газопарокапельной смеси на основе современных средств автоматизации.

В процессе выполнения выпускной квалификационной работы проводились экспериментальные исследования, анализ объекта автоматизации, составление структурной схемы, разработка функциональной, принципиальной электрической, монтажной схем, общего вида щита управления, выбор приборов и технических средств автоматизации с последующим составлением заказной спецификации.

В результате исследования и проектирования была разработана автоматизированная система управления расхода воды в генератор газопарокапельной смеси на основе современных средств автоматизации.

Обозначения и сокращения

АРМ – автоматизированное рабочее место оператора;

АСУ – автоматизированная система управления;

ГПС – газопарокапельная смесь;

ДД – датчик давления;

ДР – датчик расхода;

ИМ – исполнительный механизм;

К – контроллер;

ПУ – пусковое устройство;

РО – регулирующий орган;

РУ – устройство ручного управления;

ТПС – термопреобразователь сопротивления;

ТП – термоэлектрический преобразователь;

ТОУ – технологический объект управления.

Содержание

Введение	10
1 Исследовательские изыскания	12
1.1 Газопарокапельные технологии	12
1.2 Описание экспериментального стенда	14
1.3 Описание методик исследования	15
1.3.1 Метод PIV	16
1.3.2 Метод PTV	18
1.3.3 Метод SP	18
1.3.4 Методика обработки, регистрируемые и рассчитываемые параметры	19
1.4 Результаты исследований.....	24
2 Проектирование АСУ газопарокапельного генератора	33
2.1. Анализ объекта автоматизации	33
2.2. Выбор структуры автоматизированной системы расхода воды	34
2.3 Разработка функциональной схемы АСУ расхода воды	36
2.4. Выбор технических средств АСУ расходом воды	39
2.4.1. Выбор датчика температуры	39
2.4.2. Выбор датчика давления воды	42
2.4.3. Выбор технических средств измерения расхода воды	44
2.4.4. Выбор управляющего устройства	45
2.4.5. Выбор исполнительного механизма	49
2.4.6. Выбор блока управления исполнительным механизмом	50
2.4.7. Выбор автоматизированного рабочего места оператора.....	50
3 Схема взаимосвязи оборудования верхнего уровня и полевого	54
4 Разработка принципиальной электрической схемы автоматизированной системы управления.....	56
5 Разработка монтажной схемы автоматизированной системы управления ..	58
6 Разработка чертежа общего вида щитовой конструкции АСУ	60
7 Расчет параметров настройки регулятора	61
7.1 Идентификация объекта управления	61
7.2 Расчет параметров настройки регулятора	64

8 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение...	72
8.1 Планирование работ и оценка времени выполнения	72
8.2 Смета затрат на проект	76
8.3 Смета затрат на оборудование и монтажные работы.....	79
8.4 Определение экономической эффективности проекта	80
Выводы по разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	81
8. Социальная ответственность	83
8.1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	85
8.2. Производственная безопасность	86
8.3. Экологическая безопасность.....	96
8.4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях	99
Выводы по разделу «Социальная ответственность»	101
Заключение	102
Список использованных источников	103
Приложение А	108
Графический материал:	на отдельных листах
ФЮРА.421000.011 С2	Схема функциональная
ФЮРА.421000.011 Э3	Схема принципиальная электрическая
ФЮРА.421000.011 С4	Схема монтажная
ФЮРА.421000.011 ВО	Общий вид щита автоматизации

Введение

В настоящее время все более актуальными становятся вопросы ресурсоэффективности и энергосбережения. Как в России, так и в зарубежных странах разрабатываются новые установки и реализуются новые программы, призванные снизить экологическую нагрузку на природу.

Одной из важнейших проблем современной энергетики является снижение тепловых потерь при выработке, транспорте и использовании энергии. Повысить энергоэффективность теплогенерирующих установок возможно благодаря использованию газопарокапельных смесей. Газопарокапельные смеси являются многокомпонентными теплоносителями, состоящие из продуктов сгорания топлива, воды и пара.

Целью данной работы является создание высокотемпературной газопарокапельной смеси с контролируемой дисперсностью аэрозоля. Для изучения процессов соударения капель жидкости в газовой среде и их вторичного измельчения был спроектирован стенд и проведены исследования по взаимодействию капель аэрозоля.

Результаты исследования будут интересны в сфере образования для студентов и аспирантов:

- 1) для изучения процессов взаимодействия отдельных капель жидкости и в потоке аэрозоля;
- 2) для изучения влияния таких свойств жидкости, как плотность, вязкость, поверхностное натяжение на результаты взаимодействий капель;
- 3) для изучения влияния газовой среды: ее температуры и состава на процессы распыла аэрозоля;
- 4) для исследования систем автоматизированного управления процессами генерации газопарокапельной смеси.

Полученная в ходе исследований экспериментальная база будет востребована в научной сфере при разработке математических моделей

взаимодействия капель жидкости, генерации многокомпонентных смесей, создании установок, генерирующих многокомпонентные теплоносители.

Контроль за дисперсностью аэрозоля осуществляется с помощью автоматизированной системы управления. Автоматизированная система управления предназначена для поддержания постоянной или для изменения по требуемому закону технологической величины объекта, характеризующей протекающий в нем процесс. Это достигается формированием регулятором определенных регулирующих воздействий на технологический объект автоматизации.

Основным звеном в автоматизированной системе регулирования технологическим процессов водооборотного цикла является программируемый логический контроллер, связанный с верхним уровнем системы и обеспечивающий:

- 1) управление всеми технологическими процессами;
- 2) передачу измеренных значений физических величин на автоматизированное рабочее место диспетчеров АСУ ТП;
- 3) защиту и блокировку оборудования и исполнительных механизмов;
- 4) предупредительную и аварийную сигнализацию.

Сбор данных и архивирование параметров процесса происходит на сервере сбора данных, расположенном в операторной объекта. Сервер сбора данных имеет избыточные вычислительные мощности и ресурсы информационных накопителей и позволяет хранить параметры технологического процесса в течение нескольких лет. Автоматизация технологического процесса связана с реализацией функций регулирования, мониторинга, диагностики и управления.

Цель настоящей работы – экспериментальное исследование бинарных столкновений капель жидкости и их взаимодействие в аэрозоле, а также проектирование автоматизированной системы расхода воды в генератор газопарокапельной смеси.

1 Исследовательские изыскания

1.1 Газопарокапельные технологии

Развитие направлений ресурсоэффективности и энергосбережения является одной из приоритетных задач энергетической стратегии до 2030 года [1].

Одним из важнейших направлений энергосбережения является снижение тепловых потерь при выработке, транспортировке и использовании энергии. При этом на промышленных топливных теплогенерирующих установках большая часть тепловых потерь приходится на потери с уходящими дымовыми газами (60-70%). Повышение эффективности использования топлива требует создания новых энергоэффективных технологий.

В настоящее время многокомпонентные смеси, в частности газопарокапельные теплоносители находят все больше областей применения в энергетике, строительстве, сельском хозяйстве. Газопарокапельные смеси могут выступать в качестве многокомпонентного теплоносителя с целью повышения эффективности низко- и среднетемпературных теплотехнических систем. При этом снижаются потери тепла с уходящими газами. Также газопарокапельные смеси могут являться дешевой альтернативой водяному пару как конечному продукту. В этом случае они могут применяться в технологических процессах, в которых используется пар, но которые при этом допускают присутствие продуктов сгорания.

Основная сложность применения газопарокапельных потоков состоит в контроле компонентного состава и структуры газопарокапельной смеси. В условиях интенсивных фазовых превращений, химического реагирования и турбулентных течений такой контроль затруднен. Важно разработать методики и получить прогностические оценки изменения структуры и состава газопарокапельных потоков при столкновениях капель. Одной из основных проблем при создании таких потоков (особенно высокотемпературных) на

основе дымовых газов, пара и капель воды, а также других жидкостей, эмульсий и суспензий является сложно контролируемый унос капель газами [2]. Актуальна задача создания прогностического математического аппарата для установления предельных условий и характеристик такого уноса в большой группе приложений (в частности, полидисперсное тушение пожаров с применением тонкораспылённой воды, тумана или соответствующих водяных парокропельных завес; термическая или огневая очистка жидкостей в потоке продуктов сгорания или высокотемпературного воздуха; создание теплоносителей на базе дымовых газов, паров и капель воды; размораживание сыпучих сред и обработка зашлакованных поверхностей теплонагруженного энергетического оборудования; зажигание капель жидких и суспензионных топлив). Высокая значимость решения этой задачи обусловлена тем, что характеристики уноса капель и их испарения в газовой среде существенно отличаются при разных условиях теплообмена и концентрациях [2].

Наиболее типичным для выделенных выше приложений является смешение аэрозольного и газового потоков. Задача прогнозирования характеристик смешения (в частности, уноса капель разных размеров газами) усложняется в условиях фазовых превращениях. Последние особенно интенсивно реализуются при высоких (более 1000 К) температурах газов и малых размерах капель. Однако экспериментальных результатов исследований соответствующих процессов при таких температурах пока очень мало.

Целью исследований является экспериментальное определение основных характеристик взаимодействия капель жидкостей в составе аэрозоля в условиях, соответствующих перспективным ресурсоэффективным топливным технологиям, а также термической очистки, газопарокропельных теплоносителей.

1.2 Описание экспериментального стенда

В целях определения основных характеристик взаимодействия капель жидкостей в составе аэрозоля был сконструирован стенд, изображенный на рисунке 1.1.

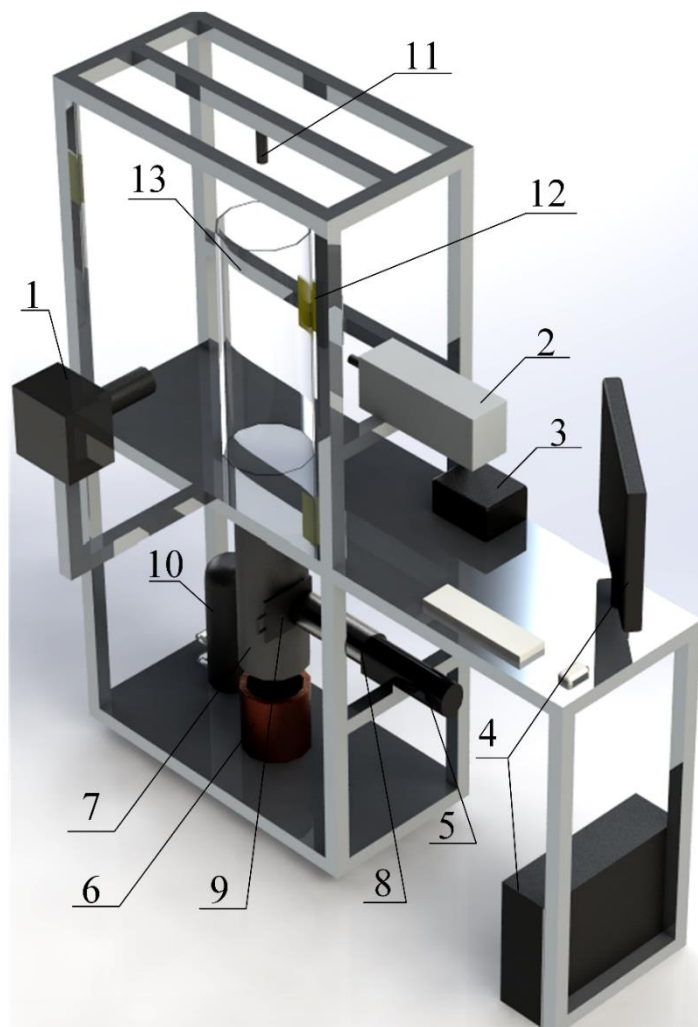


Рисунок 1.1 – Схема экспериментального стенда:

1 – высокоскоростная видеокамера; 2 – генератор лазерного излучения; 3 – синхронизатор; 4 – персональный компьютер; 5 – воздухонагреватель и магнетател; 6 – цилиндр из жаропрочного металла(в который помещается горючая жидкость); 7 – тракт подачи продуктов сгорания; 8 – тракт подачи нагретого воздушного потока; 9 – шибер (необходим для раздельной подачи продуктов сгорания от нагретого воздуха); 10 – резервуар с водой; 11 – форсуночное устройство; 12 – прожектор; 13 – цилиндр из кварцевого стекла.

С помощью данного стенда изучались условия взаимодействия капель с использованием двух генераторов аэрозолей компрессорного типа (давление впрыска до 6 атм, расход до 0,1 л/с), схема взаимного расположения которых менялась (встречно, сонаправленно, перекрестно) для более широких диапазонов варьирования параметров капель (размеры 0.1–1 мм, скорости 0.1–10 м/с, углы 0–90°, относительная концентрация 0.001–0.002 м³ капель жидкости в 1 м³ газа); применялись две высокоскоростные видеокамеры (разрешение 1152×864, частота регистрации от 3000 до 100000 кадров в секунду) с фокусировкой в одной области регистрации с целью получения пространственных изображений сталкивающихся капель и увеличения числа зарегистрированных взаимодействий капель в каждом эксперименте; после проведения опытов с аэрозолем выполнялись дополнительные уточняющие эксперименты (необходимы в ряде случаев вследствие пересечения траекторий перемещающихся капель в области регистрации в случае аэрозолей) с применением капилляров, генерирующих последовательные капли фиксированных размеров, формы и скорости.

1.3 Описание методик исследования

За последние годы панорамные оптические методы, кросскорреляционные комплексы, системы высокоскоростной фото – и видеорегистрации позволили получить уникальные экспериментальные результаты и расширить представления о физике процессов в области большой группы газожидкостных систем (плёнки, капли, пузырьки, аэрозоли, двухфазные, многофазные и гетерогенные потоки) [3–9]. Особенно следует отметить оптические бесконтактные методы (в частности, «Particle Image Velocimetry» (PIV) [10–12], «Particle Tracking Velocimetry» (PTV) [13, 14], «Stereo Particle Image Velocimetry» (Stereo PIV) [15, 16], «Interferometric Particle Imaging» (IPI) [17, 18] и «Shadow Photography» (SP) [19, 20]), которые

позволили получить новые сведения о сложных процессах смешения газопарокапельных потоков в условиях интенсивных фазовых превращений и химического реагирования.

1.3.1 Метод PIV

Метод цифровой трассерной визуализации (Particle Image Velocimetry или PIV) относится к классу бесконтактных методов измерения скорости в потоках. Данный метод занимает особое место в исследовании структуры течений благодаря возможности регистрировать мгновенные пространственные распределения скорости. Данное преимущество является особенно важным при изучении потоков, содержащих крупномасштабные вихревые структуры, информация о которых частично теряется при применении одноточечных методов диагностики. К этим течениям относятся большая часть сдвиговых течений, включая струи, следы и слои смешения. Применение полевых методов дает возможность получения информации о динамике структур, их масштабов, расчета дифференциальных характеристик, пространственных и пространственно – временных корреляций, а также статистических характеристик потока. Схема экспериментального стенда при использовании метода «PIV» представлена на рисунке 1.2.

Измерение мгновенного поля скорости потока в заданном сечении основано на измерении перемещения частиц примеси, находящихся в плоскости сечения, за фиксированный интервал времени. В поток жидкости или газа добавляются частицы малого размера (трассеры). В данных экспериментах роль трассеров выполнял нанопорошок из диоксида титана (80–100 нм). Размер, плотность и объемная концентрация диоксида титана подбираются таким образом, чтобы эффекты, связанные с двухфазностью потока и плавучестью частиц, были минимальны. Измерительной областью потока считается плоскость, «вырезаемая» световым ножом. Частицы в измерительной плоскости потока должны быть освещены минимум дважды.

Образы частиц регистрируются на фотографический или электронный носитель (цифровую камеру). Последующая обработка изображений позволяет рассчитать смещения частиц за время между вспышками источника света и построить двухкомпонентное поле скорости. Измеренные двухкомпонентные значения векторов являются проекциями реальных (трехмерных) векторов на плоскость, перпендикулярную оптической оси регистрирующей образы частиц аппаратуры. Для измерения трех компонент скорости используют, как правило, два регистрирующих модуля, оптические оси которых ориентированы под определенным углом относительно друг друга.

При использовании преобразований Фурье находится максимум корреляционной функции, которая и определяет перемещение трассеров. При помощи масштабного коэффициента (определенного на начальном этапе экспериментов в момент калибровки оптической системы) и известной временной задержке осуществляется перерасчет скорости в м/с.

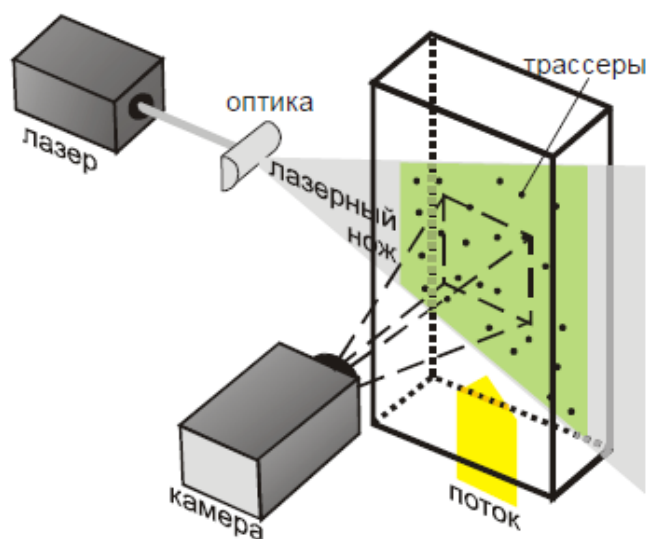


Рисунок 1.2 – Схема экспериментального стенда

В качестве источника излучения используется твердотельный импульсный Nd:YAG лазер. Длительность импульса в таком лазере составляет

4-10 наносекунд. Среди преимуществ данного метода можно выделить его бесконтактность, возможность измерения мгновенных распределений скоростей и широкий диапазон измеряемых скоростей – от нуля до сверхзвуковых [21].

Метод PIV применялся для измерения скоростей движения капель воды U_d и воздушного потока U_g . Скорости перемещения воздуха в области регистрации определялись до вдува распыленной жидкости. Трассирующие частицы вводились в воздушный поток в нижней части области регистрации.

1.3.2 Метод PTV

Метод Particle Tracking Velocimetry применялся для регистрации траектории и скорости движения каждой конкретной капли. Данный метод является развитием PIV и предназначен для вычисления мгновенных двухкомпонентных полей скорости трассирующих частиц в потоке газа или жидкости. В отличие от PIV метода в PTV вектор скорости измеряется по перемещениям отдельных трассеров в потоке. Измеренное векторное поле имеет разрешение больше, чем в методе PIV, а векторная сетка является нерегулярной – с узлами в точках положения трассеров. С применением метода PTV можно обеспечить достоверный контроль скорости и траекторий движения различных маркированных элементов многофазных и многокомпонентных сред, фиксировать скорости и траектории движения фрагментов жидкости при столкновениях капель.

1.3.3 Метод SP

Метод теневой фотографии позволяет определять размеры различных сферических объектов на монохромных изображениях. При использовании метода «SP» к исходному изображению применяется процедура высокочастотной фильтрации, которая позволяет выделить границы образов зарегистрированных объектов.

После высокочастотной фильтрации применяется процедура бинаризации. Бинаризация позволяет отсечь фоновый шум и подготавливает изображение к следующему этапу.

На последнем этапе обработки по бинаризованному полю производится поиск односвязных областей. В результате определяются положения объектов и их радиусы. Если некоторые идентифицированные объекты находятся внутри других или имеют некруглую форму, то проводится валидация данных.

Среди преимуществ метода можно выделить следующие:

- 1) бесконтактность;
- 2) возможность измерения скорости частиц при комбинации с методом «PTV»;
- 3) для измерения скорости и размера частиц достаточно одной камеры;
- 4) систему можно дополнить «PIV» системой, что позволит измерять скорость несущей фазы;
- 5) алгоритмы идентификации не требуют больших вычислительных ресурсов и просты в освоении.

Данный метод позволяет определять параметры пузырьковых, аэрозольных потоков и потоков с твердыми частицами сферической формы и изучать процессы взаимодействия фаз в многофазных потоках [22].

1.3.4 Методика обработки, регистрируемые и рассчитываемые параметры

Кросскорреляционный комплекс на базе программного обеспечения Actual Flow применялся для обработки видеограмм со сближающимися каплями за счет применения группы специализированных оптических методов.

Для обработки полученных видеограмм применялось программное обеспечение Tema Automotive и FastCam, которые обеспечивали проведение анализа координат положения, форм капель, их скоростей, ускорений, углов,

пройденных расстояний и прочих параметров при их изменении в широком диапазоне значений с высокой дискретизацией во времени.

В соответствии с потенциальными приложениями результатов экспериментальных исследований процессов соударений капель жидкостей в газовой среде составлен перечень наиболее значимых факторов, эффектов и процессов, которые могут существенно изменять не только характеристики самого соударения капель, но и режим, а также последствия. Ниже будут перечислены данные факторы и эффекты, а также диапазоны варьирования соответствующих параметров для учета влияния последних с акцентом на приложения:

- 1) соотношение размеров капель R_s и R_l . В типичных аэрозольных технологиях характерные размеры капель могут изменяться в несколько раз в пределах основного диапазона от 0.1 до 5 мм. Как следствие, целесообразно выполнить варьирование значения отношения R_s и R_l от 0 до 1;
- 2) относительная скорость движения капель перед соударением U_{rel} . Наиболее типичными являются соударения капель в аэрозоле при движении в одной плоскости. В таких условиях векторы движения капель, как правило, сонаправленны или противоположно направлены;
- 3) число Вебера We , характеризующее отношение сил инерции к силам поверхностного натяжения. Этот параметр часто применяется для описания влияния скоростей движения и размеров капель на параметры взаимодействия последних. В соответствии с данными экспериментальных работ последних 50 лет, процитированными в обзорах [23–25], можно выделить наиболее типичный диапазон варьирования We – от 0 до 200. В этом диапазоне реализуются четыре основных режима взаимодействия: отскок, разлет, коагуляция, дробление;
- 4) угол атаки или взаимодействия α_d . Угловой параметр соударения рассчитывается, как косинус от угла взаимодействия. Варьирование

- значения угла между траекториями движения капель проводилось в диапазоне от 0 до 90°;
- 5) концентрация капель в составе аэрозоля γ_d . Этот параметр существенно влияет на частоту соударений капель. Интерес представляет, как он влияет на режим взаимодействия капель и характерные последствия. Диапазон варьирования может быть достаточно большим для характеристики всех возможных режимов распыления;
 - 6) температурный диапазон в зоне соударения капель, который зависит как от температуры газовой среды (T_a), так и капель жидкости (T_d). Наиболее типичные диапазоны варьирования данных параметров в соответствии с типичными газопарокапельными приложениями составляют: по T_a до 1000 °С, по T_d до 100 °С;
 - 7) турбулентный, переходный или ламинарный режим движения аэрозоля. При работе типичных распылительных и оросительных систем могут обеспечиваться разные режимы движения аэрозоля в целом и отдельных капель, как элементов последних. Как следствие, числа Рейнольдса для капельных аэрозолей могут варьироваться от нескольких десятков до нескольких тысяч. Важно для такого широкого диапазона выполнить варьирование характерных значений Re ;
 - 8) безразмерные параметры взаимодействия капель. Традиционно применяются два вида параметров взаимодействия: линейный (B) и угловой (β). Угловой параметр рассчитывался по формуле $\beta = \cos(\alpha_d)$, а линейный с учетом расстояния между центрами масс $B = b / (R_{d1} + R_{d2})$. Типичный диапазон варьирования данных параметров [23]: 0–1;
 - 9) неоднородный состав капель. Для таких случаев строятся карты параметров взаимодействия с использованием чисел Онезорге, Лапласа, Рейнольдса и капиллярности [24, 25]. Характерные диапазоны варьирования Oh , La , Ca , Re на таких картах могут отличаться, но в целом традиционно выполняют сопоставление с известными данными для воды. В таком случае можно оценить влияние вязкости,

поверхностного натяжения, плотности и других свойств жидкости на характеристики трансформации капель. Анализ данных [23–25] позволяет сделать вывод о том, что для капель однородных жидкостей, растворов и эмульсионных составов получено достаточно много данных. Как следствие, привлекают внимание суспензионные составы для изучения;

- 10) соотношения исходных площадей поверхности взаимодействующих капель и их роли: мишень, снаряд. Очень часто результаты обработки экспериментальных данных по изучению процессов взаимодействия капель жидкостей обобщают без акцента на роль капли. Как показали эксперименты [26,27], снаряды и мишени могут иметь не только разные размеры и скорости перед соударением, но и формы. Этот фактор следует учитывать при обобщении данных и особенно на последствия соударений капель, в частности, среднее число новых капель N и отношение площадей поверхности S_1/S_0 .

При проведении экспериментов контролировались размеры генерируемых капель, их скорости, углы столкновений, концентрация в потоке газа и скорость газа. Схема регистрации параметров соударений показана на рисунке 1.3.

По измеряемым параметрам рассчитывались: числа Вебера, Онезорге, Рейнольдса, капиллярности, а также безразмерные параметры взаимодействия, отражающие влияние угла атаки (α_d) и расстояния между центрами масс капель (b).

Число Вебера:

$$We=2 \cdot \rho \cdot R_d \cdot U_{rel}^2 / \sigma. \quad (1.1)$$

Число Онезорге:

$$Oh=\mu/(\rho \cdot \sigma \cdot 2 \cdot R_d \cdot 10^{-3})^{0.5}. \quad (1.2)$$

Число Рейнольдса:

$$Re_2=(\rho \cdot 2R_d \cdot 10^{-3} \cdot U_{rel})/\mu. \quad (1.3)$$

Число капиллярности:

$$Ca = \mu \cdot U_{rel} / \sigma \quad (1.4)$$

По полученным параметрам строились карты режимов (отскока, разлета, дробления и коагуляции) в системе координат $B(We)$, $\beta(We)$, $We(Oh)$, $Re(Oh)$, $We(Ca)$.

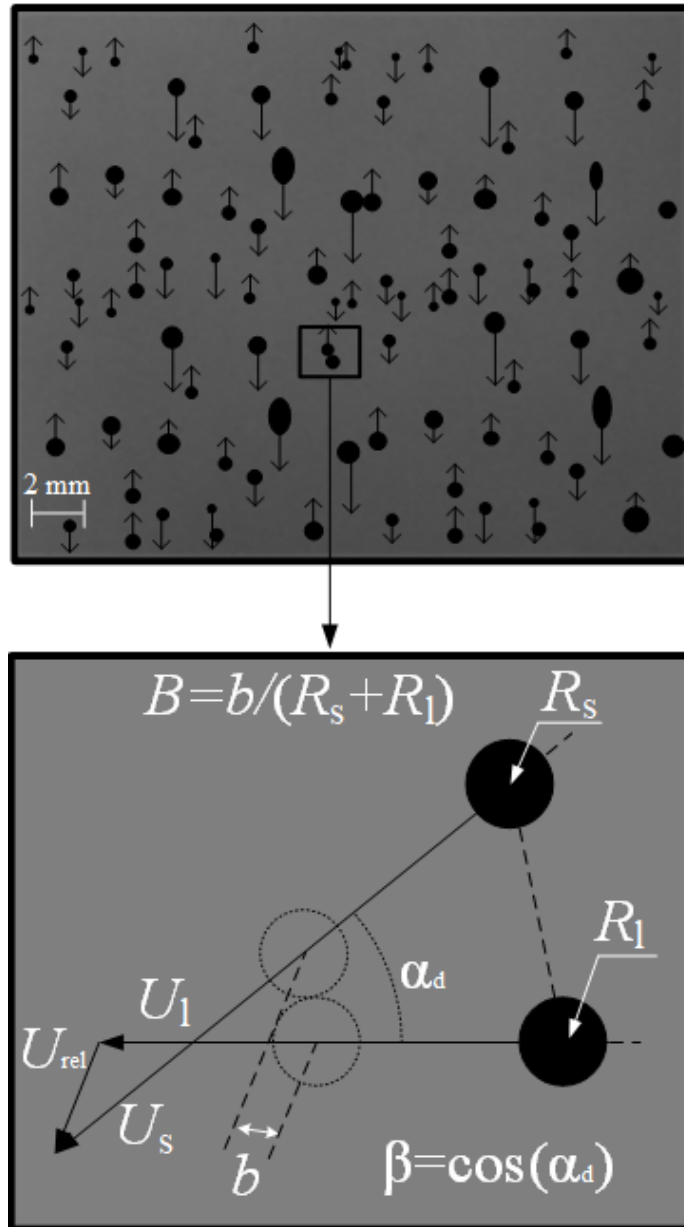


Рисунок 1.3 – Схема регистрации параметров взаимодействия

Систематические погрешности определения размеров R_d и скоростей U_g и U_d с применением панорамных оптических методов, а также соответствующего видеорегистрирующего стенда не превышали 1.6 и 2.1%. Максимальные случайные погрешности определения рассматриваемых

параметров составили: $R_d - 2.1\%$, U_g и $U_d - 3.4\%$. Систематическая погрешность регистрации α_d не превышала 2.3% .

При анализе кадров видеogramм рассчитывались вероятности (как число соударений с соответствующими последствиями при идентичных параметрах к общему числу столкновений): P_1 – коагуляция, P_2 – разлет, P_3 – дробление, P_4 – отскок. В сумме вероятности P_1, P_2, P_3, P_4 составляли 1, так как учитывали все зарегистрированные столкновения (статистический анализ проводился при обработке не менее 100 взаимодействий капель при идентичных условиях эксперимента). Для выборки кадров со сближением капель разработан специализированный алгоритм в программном пакете Mathematica. С его применением обеспечивалась выборка 500–1000 кадров (из начальных 3000–5000 кадров) в идентичных условиях экспериментов для обеспечения надежной статистики столкновений.

1.4 Результаты исследований

Наиболее масштабное и ожидаемое влияние на режимы и последствия соударений капель жидкостей могут оказывать три ключевых фактора: размеры, скорость движения, угол атаки. Первые два традиционно анализируются в виде общего критерия – числа Вебера. На рисунках 3 и 4 приведены кривые, иллюстрирующие влияние данных факторов на вероятности реализации каждого из четырех режимов взаимодействия. При обобщении результатов опытов стало очевидным, что роль размеров и скорости движения капель следует анализировать с помощью соответствующих отношений и разностей, как показано на рисунках 1.4 и 1.5. Помимо трех отмеченных факторов существенное влияние оказывают эффекты изменения формы поверхности капли вследствие непрерывной трансформации и роли капель, в частности, мишени и снаряда. При использовании рисунков 1.4 и 1.5 показаны отличия вероятностей P_1, P_2, P_3 и P_4 для отношений размеров и скоростей движения как меньше 1 (значения

соответствующих параметров для снаряда ниже, чем для мишени), так и больше 1 (обратная ситуация). Наибольшую ценность проведенных опытов представляют численные результаты исследований по доминированию тех или иных последствий взаимодействия капель в составе аэрозоля. При необходимости с учетом установленных относительных вероятностей взаимодействия (P_1, P_2, P_3, P_4) из рисунков 1.4, 1.5 можно получить области параметров для обеспечения устойчивой коагуляции, отскока, разлета и дробления капель разной формы и с разной ролью (мишень, снаряд).

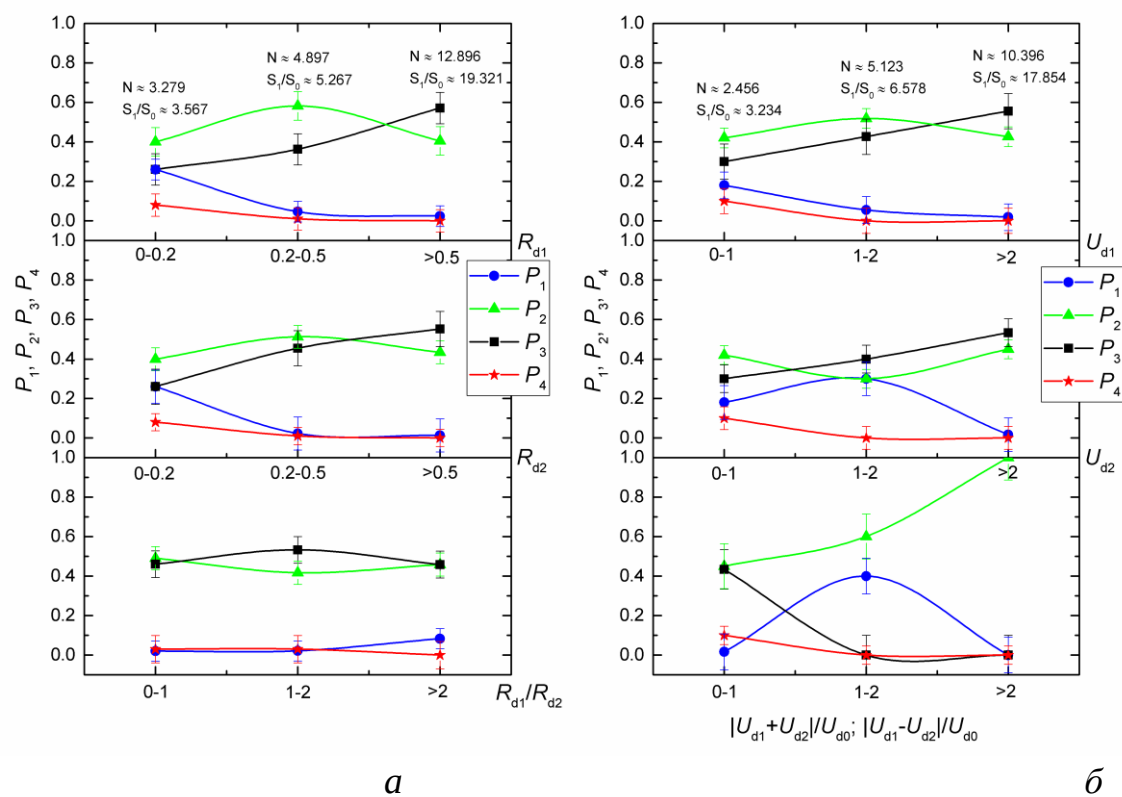


Рисунок 1.4 – Вероятности реализации каждого из четырех режимов взаимодействия капель (P_1 – коагуляция, P_2 – разлет, P_3 – дробление, P_4 – отскок) при изменении отношения их размеров (а) и относительной скорости движения перед соударением (б)

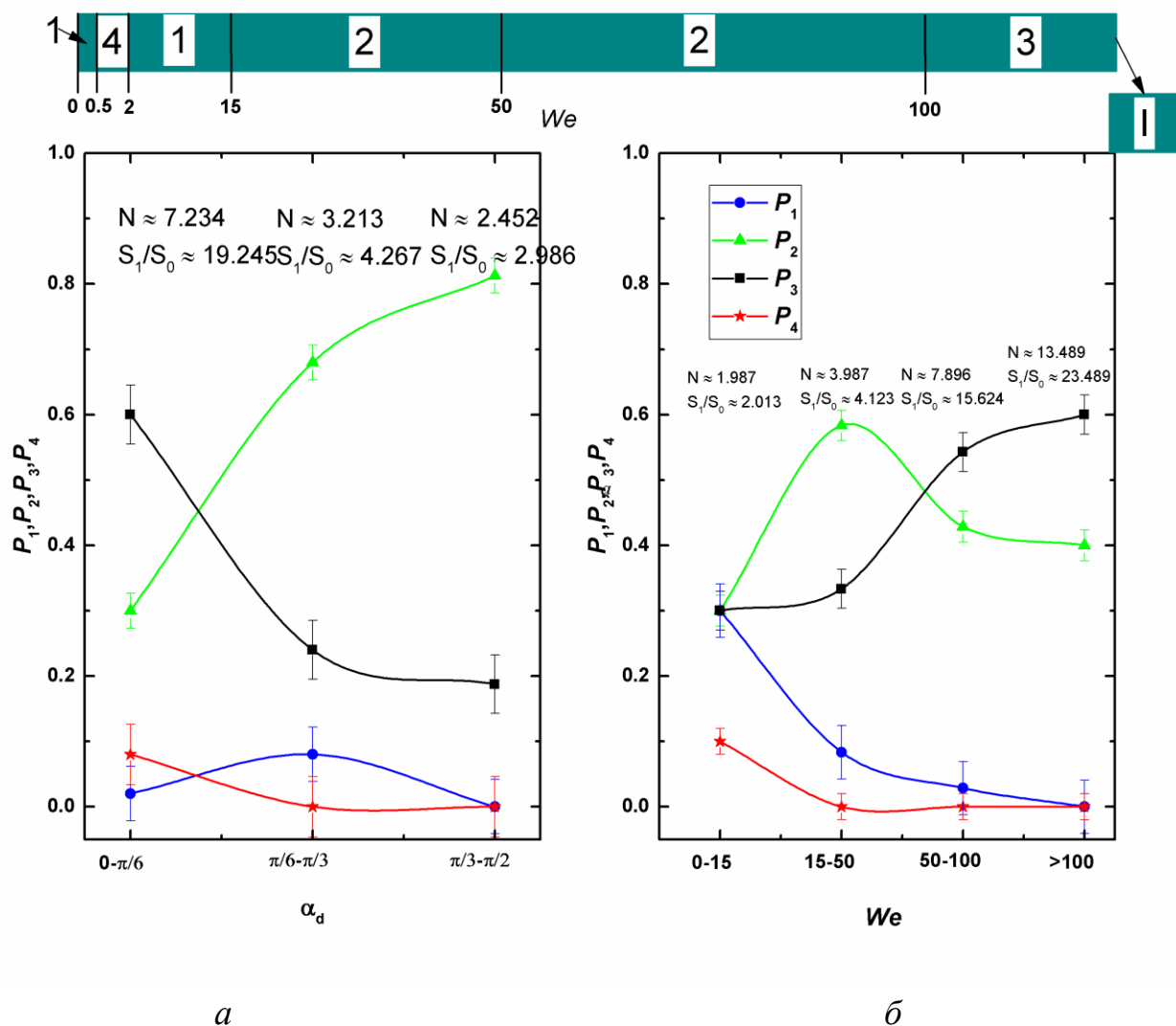


Рисунок 1.5 – Вероятности (P) реализации каждого из четырех режимов взаимодействия капель (P_1 – коагуляция, P_2 – разлет, P_3 – дробление, P_4 – отскок) при изменении угла атаки (между траекториями полета) (а) и числа Вебера (б).

На рисунках 1.6–1.8 приведены результаты изучения вклада слабо изученных ранее эффектов и факторов, в частности, относительной концентрации капель в аэрозоле, температуры в области соударения капель, а также турбулентности капельного потока. В целом при обобщении можно отметить, что каждый из этих факторов изменяет структуру аэрозоля и интенсифицирует соударения капель. В частности, на рисунке 1.6 хорошо видно, что количество соударений капель существенно увеличивается при повышении относительной концентрации последних в составе аэрозоля, но

вероятность дробления капель, как можно было ожидать, явно не доминирует (тенденции более сложные вследствие сильной привязки к относительной скорости взаимодействия капель, а также отношений их размеров). Рост концентрации капель интенсифицирует все режимы взаимодействия, особенно коагуляцию и дробление, как показано на рисунке 1.6. Лишь при высоких значениях We концентрации дробления и разлета существенно преобладают над отскоком и коагуляцией. С применением рисунка 1.6 можно прогнозировать условия, при которых поток перестраивается существенно в режиме дробления и коагуляции и слабо в режиме разлета и отскока.

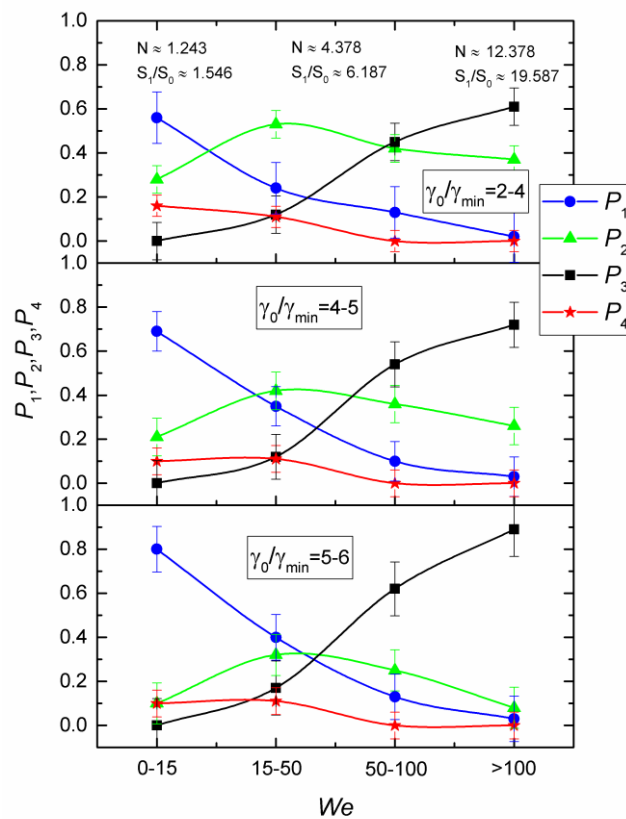


Рисунок 1.6 – Вероятности (P) реализации каждого из четырех режимов взаимодействия капель (P_1 – коагуляция, P_2 – разлет, P_3 – дробление, P_4 – отскок) при изменении относительной концентрации капель. $\gamma_0=10^{-4}$ – масштаб относительной концентрации (m^3 капель жидкости в $1 m^3$ газа) до взаимодействия капель.

Если же детализировать влияние фактора температуры в области соударения капель, которая может изменяться как за счет разной начальной температуры капель, так и за счет разной температуры газовой среды, то можно отметить, что в условиях нагрева газопарокапельной среды возрастает число соударений в режиме коагуляции и особенно отскока капель и существенно снижается количество взаимодействий с разлетом и дроблением капель. Особенно заметны данные тенденции в диапазоне средних и малых значений We на рисунке 1.7. Данный эффект обусловлен тем, что интенсификация нагрева капель в газовой среде способствует росту концентрации паров. Это приводит к увеличению давления парогазовой смеси, действующей на каждую из капель. Так как вектор вдува паров с поверхности капли противоположен направлению ее перемещения всегда, то этот эффект затормаживает движение капель. Как следствие, кинетическая энергия снижается. Капли отталкиваются друг от друга. Учащаются отскоки. Лишь при высоких начальных скоростях движения капель фактор формирования буферного парового слоя вокруг фрагментов жидкости не может оказать существенное влияние, так как линейные скорости оттока паров даже в условиях интенсивного парообразования не могут превышать нескольких десятых метра в секунду.

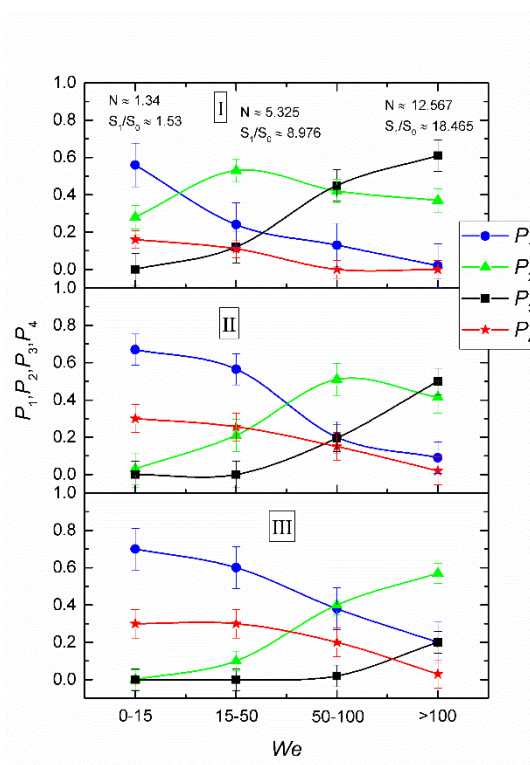


Рисунок 1.7 – Вероятности (P) реализации каждого из четырех режимов взаимодействия капле (P_1 – коагуляция, P_2 – разлет, P_3 – дробление, P_4 – отскок) при изменении температуры газопарокапельной среды в области соударений: I – 20 °С; II – 200 °С; III – 500 °С.

Турбулизация газопарокапельного потока приводит к существенному нарушению тенденций изменения вероятностей P_1 , P_2 , P_3 , P_4 , как функций от We (Рисунок 1.8). В частности, при малых значениях чисел Рейнольдса газов (до 1100) регистрировались ожидаемые тенденции роста вероятностей дробления и разлета, снижения коагуляции и отскока при повышении We . При средних (2400) и высоких (2800) значениях чисел Рейнольдса газов на рисунке 1.8 видно нарушение монотонности изменения вероятностей дробления и разлета, а для коагуляции и отскока тенденции сохранились. Это, скорее всего, обусловлено тем, что турбулизация газопарокапельного потока приводит к существенному изменению не столько линейных скоростей движения капель, сколько скоростей вращательного движения. Как следствие, капли взаимодействуют при вращении чаще в режиме разлета, особенно при

повышении скорости движения (Рисунок 1.8). Таким образом, даже в условиях сильной турбулентности можно обеспечивать стабильную структуру газопарокапельного потока (так как разлет не приводит к росту числа капель и изменению размеров исходных).

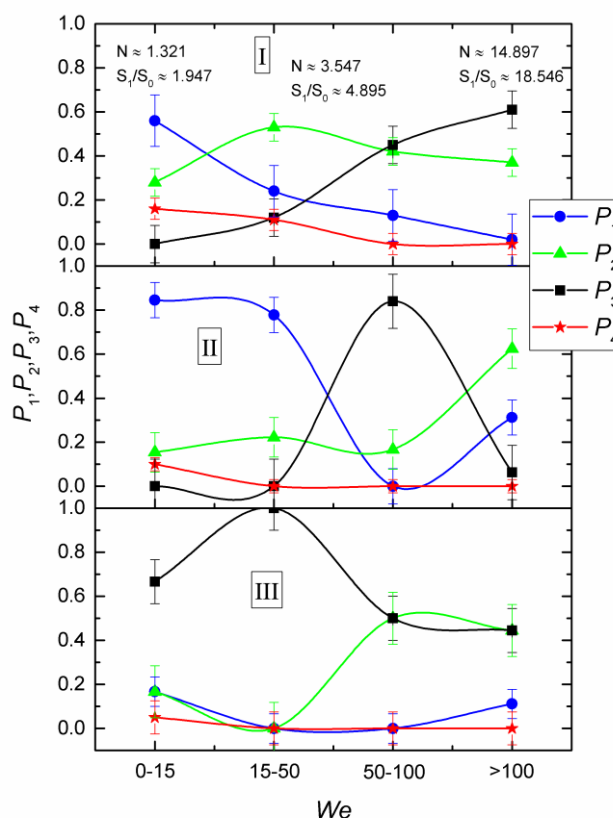


Рисунок 1.8 – Вероятности (P) реализации каждого из четырех режимов взаимодействия капель (P_1 – коагуляция, P_2 – разлет, P_3 – дробление, P_4 – отскок) при изменении степени турбулентности аэрозольного потока: I – $Re \approx 1100$; II – $Re \approx 2400$; III – $Re \approx 2800$.

Используемый экспериментальный стенд позволял осуществлять подачу жидкости с температурой 90°C в нагревательную камеру.

При повышении температуры жидкости уменьшается ее поверхностное натяжение, что в свою очередь приводит к снижению значений критических чисел Вебера для границ отскока, разлета и дробления (Рисунок 1.9). Зона отскока уменьшается ($\Delta \approx 57\%$), что связано с ослаблением сил

поверхностного натяжения. Границы дробления и разлета сместились на 27% и 45% соответственно. Кроме того область разлета увеличилась в сторону больших значений безразмерного линейного параметра.

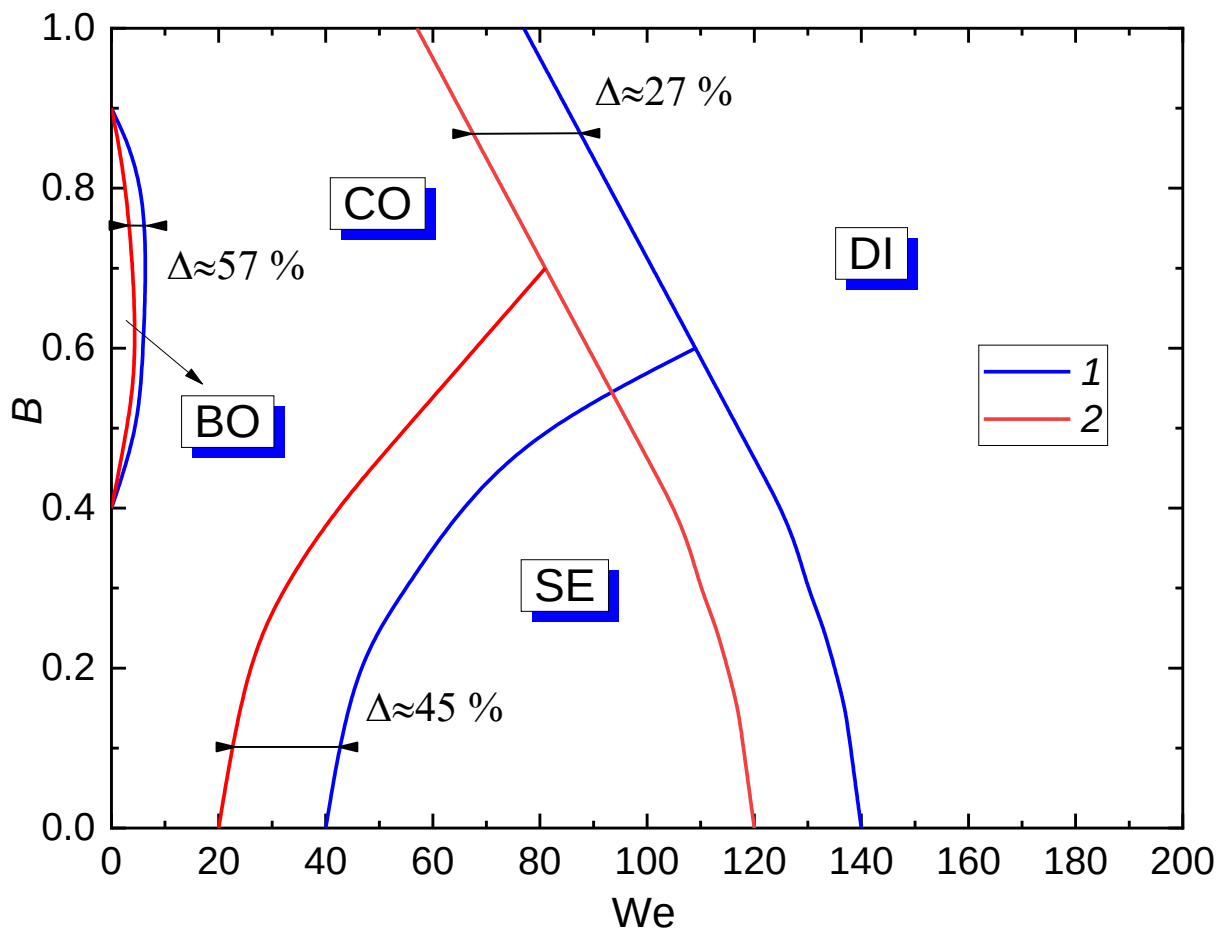


Рисунок 1.9 – Влияние температуры на границы переходов: 1 – вода при 20 °C, температур среды – 20 °C; 2 – вода при 90 °C, температура среды – 100 °C.

Из рисунка 1.10 видно, что при нагреве воздушного объема и нагреве самой жидкости, увеличивается отношение площадей. Такое явление объясняется увеличением количества *child-droplets* с радиусом менее 0.15 мм (практически на 50%). Рост количества образованных фрагментов объясняется изменением свойств у нагреваемой жидкости. Так как падает поверхностное натяжение капли, то ее становится легче порвать, то есть силы натяжения ослабевают. За счет уменьшения вязкости радиус образованных частиц уменьшается, так как слабо вязкостные жидкости долго формируют

сферическую каплю, тем самым при малом поверхностном натяжении продолжают разрушаться и после соударения, за счет вращающихся сил.

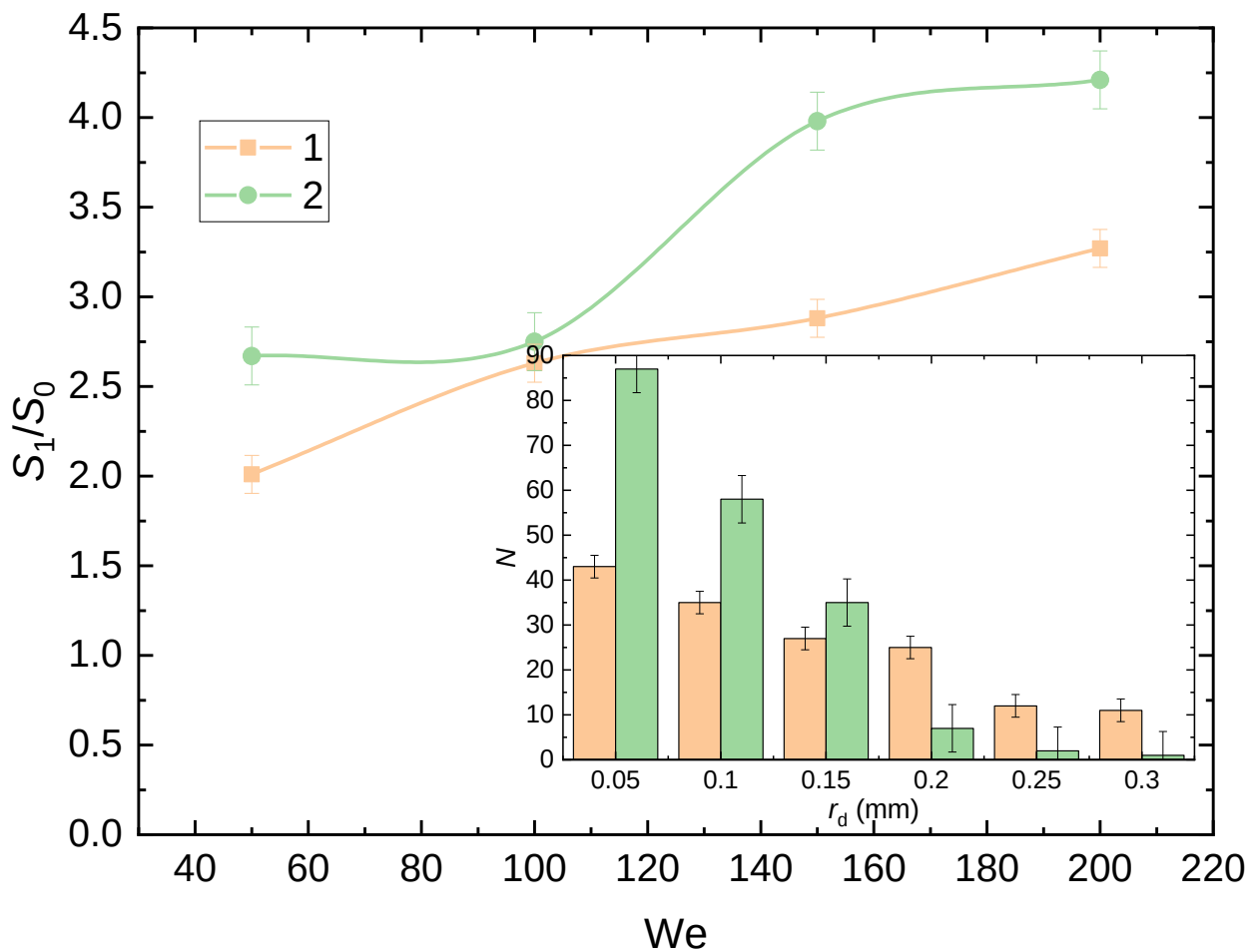


Рисунок 1.10 – Отношения площадей до и после взаимодействия в зависимости от числа Вебера и количество образованных фрагментов от радиуса (при $We=150$): 1 – вода при 20°C, температура среды 20 – °C; 2 – вода при 90 °C, температура среды – 100 °C.

2 Проектирование АСУ газопарокапельного генератора

2.1. Анализ объекта автоматизации

В качестве объекта автоматизации выбрана система управления расходом воды для газопарокапельного генератора, предназначенного для выработки газопарокапельной смеси с контролируемой дисперсностью аэрозоля.

Генераторы газопарокапельных смесей относятся к теплогенераторам смесительного типа, вырабатывающих газопарокапельные смеси, используемые в качестве теплоносителей в различных технологических процессах. В отличие от поверхностных теплообменников пар мгновенного вскипания образуется при перемешивании потока высокотемпературных продуктов сгорания топлива с потоком тонко распыленной воды.

Для обеспечения работы генератора необходимо правильно подобрать режимные и технологические параметры, обеспечивающие соответствие процесса выработки теплоносителя современным требованиям в области энергоэффективности и экологической чистоты.

Интенсивное парообразование в камере испарения приводит к резкому увеличению объема газов в ограниченном объеме камеры, что приводит к росту давления смеси. Увеличение давления теплоносителя расширяет область его применения, но при этом возникает вероятность появления существенного противодействия со стороны газопарокапельного генератора. Противодействие может привести к блокаде дымовых газов при недостаточной мощности дутьевого вентилятора.

При распылении воды через форсунку образуется мелкодисперсная взвесь капель жидкости (туман). Размеры капель жидкости определяются конструктивными особенностями форсунки и уменьшаются по ходу движения за счет поверхностного испарения и вторичного измельчения.

Задача регулирования технологического процесса генерации газопарокапельного теплоносителя является необходимостью поддержания материального и энергетического баланса для его нормальной работы.

Задача автоматизации генератора является обеспечение оптимального расхода воды и дисперсности впрыскиваемого аэрозоля для достижения необходимых параметров смеси.

2.2. Выбор структуры автоматизированной системы расхода воды

На основании описанных свойств технологического процесса генерации газопарокапельной смеси выберем структуру АСУ.

При разработке АСУ ТП должны быть соблюдены требования:

- 1) ввод в действие АСУ должен приводить к повышению качества функционирования объекта управления;
- 2) система должна быть приспособлена к модернизации, развитию и наращиванию;
- 3) надежность АСУ должна быть достаточна для достижения установленных требований;
- 4) любая поступающая информация в АСУ, должна быть актуализирована в соответствии с периодичностью ее использования при выполнении функций системы;
- 5) информация, которая содержится в базах данных АСУ, должна быть актуализирована в соответствии с периодичностью ее использования при выполнении функций системы.

Разработанная АСУ ТП должна соответствовать требованиям, представленным в ГОСТ 24.104.85.

Регулирование расхода воды в камеру смешения будет проводится исходя из необходимой дисперсности аэрозоля. Контролируя дисперсность аэрозоля, впрыскиваемого в камеру смешения, можно добиться необходимых

параметров газопарокапельного теплоносителя: давления, температуры, концентрации воды и пара.

Структура системы регулирования расхода воды представлена на рисунке 2.1.

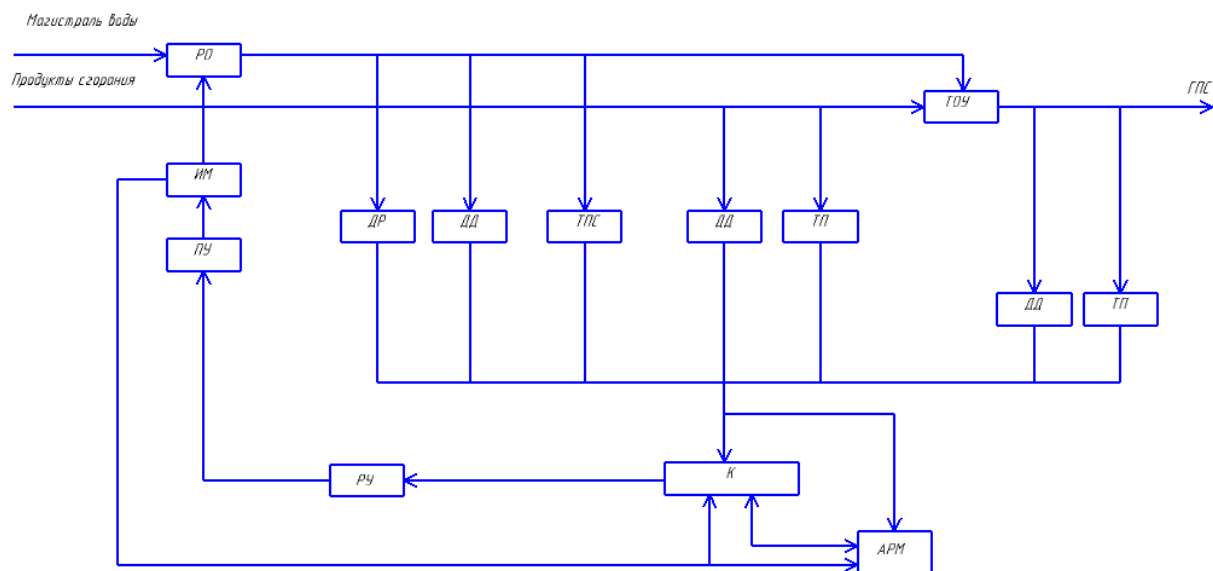


Рисунок 2.1 – Структурная схема автоматизированной системы управления:

ТПС – термопреобразователь сопротивления; ТП – термоэлектрический преобразователь; К – контроллер; РУ – устройство ручного управления; ПУ – пусковое устройство; РО – регулирующий орган; ИМ – исполнительный механизм; АРМ – автоматизированное рабочее место оператора; ДД – датчик давления; ДР – датчик расхода; ГОУ – технологический объект управления.

В процессе функционирования системы на объект управления поступают воздействия возмущения, вызывающие отклонения регулируемых параметров – значение влажности и температуры от требуемого значения. Информация о значениях параметра в текущий момент времени поступает непосредственно в систему управления, где происходит сравнение с заданным для них значением. Регулировка значения осуществляется на основе ПИ закона регулирования. Как результат, система управления обязана выработать управляющее воздействие, которое необходимо для компенсации отклонений нашего выходного параметра.

В зависимости от параметров воды, продуктов сгорания и необходимых параметров газопарокапельной смеси регулирующим органом (РО) изменяется расход воды через впрыскивающие устройства (форсунки) и таким образом меняется дисперсность аэрозоля. Контроль за параметрами воды осуществляется с помощью датчиков температуры (ТПС), давления (ДД) и расхода (ДР), расположенными в магистрали подачи воды. Датчики температуры и давления также располагаются в магистрали подачи продуктов сгорания и магистрали газопарокапельной смеси. Сигналы с датчиков поступают на регулирующее устройство. В данной системе роль регулирующего устройства выполняет микропроцессорный контроллер (К). Сигналы, выработанные в контроллере, поступают на исполнительный механизм (ИМ), проходя через пусковое устройство (ПУ), на котором они усиливаются. Исполнительный механизм воздействует на регулирующий орган технологического объекта управления.

2.3 Разработка функциональной схемы АСУ расхода воды

Функциональная схема систем измерения и автоматизации является основным техническим документом и определяет функционально – блочную структуру узлов регулирования, контроля и управления технологическим процессом. При разработке функциональной схемы автоматизации и выборе технических средств должны быть учтены особенности технологического процесса, параметры и свойства технологических сред, требуемую точность и быстродействие системы.

На функциональной схеме упрощенно изображаются линии связи, приборы и средства автоматизации условными обозначениями по действующим государственным стандартам.

В процессе разработки функциональной схемы необходимо решить следующие задачи:

- изучить технологическую схему автоматизируемого объекта;

- составить перечень контролируемых параметров технологического процесса и технологического оборудования;
- определить местоположение точек отбора информации;
- определить максимальные и минимальные значения контролируемых параметров;
- выбрать структуру измерительных каналов;
- выбрать методы и технические средства получения, обработки, передачи и представления информации;
- контроль технологических параметров процессов и состояния технологического оборудования, их регистрация;
- получение первичной информации о состоянии технологического процесса и оборудования;
- стабилизация технологических параметров процесса;
- решить вопросы размещения технических средств автоматизации на технологическом оборудовании, трубопроводах, по месту и на щитах [28].

В процессе разработки функциональной схемы, по структурной схеме была изучена технологическая схема автоматизируемого объекта и определены точки отбора измерительной информации – давления, расхода и температуры воды, температуры продуктов сгорания и газопарокапельной смеси.

Разработанная функциональная схема автоматизированной системы расхода воды представлена на листе с шифром ФЮРА.421000.011 С2.

Перечень контролируемых параметров технологического процесса и технологического оборудования и их предельные значения:

- 1) температура впрыскиваемой воды 100 °С;
- 2) давление впрыскиваемой воды 0,8 МПа;
- 3) расход впрыскиваемой воды 1,1 м³/ч;
- 4) давление продуктов сгорания 0,9 МПа;
- 5) температура продуктов сгорания 1300 °С;
- 6) температура газопарокапельной смеси 800 °С;

7) давление газопарокапельной смеси 0,7 МПа.

В разработанной функциональной схеме присутствует восемь измерительных каналов (1, 3-9) и один канал управления (2).

Измерительный канал 3 формирует сигнал о значении расхода воды с помощью датчика 1а. Датчики 2а, 3а и 4а формируют сигналы о значении температуры впрыскиваемой воды, температуры продуктов сгорания и генерируемой газопарокапельной смеси соответственно. Сформированные сигналы о значениях температур поступают по измерительным каналам 5, 7 и 8 в контроллер. Измерительные каналы 4, 6 и 9 предназначены для передачи сигналов в контроллер о значениях давления в магистрали впрыскиваемой воды, продуктов сгорания и газопарокапельной смеси. Канал 1 передает на микропроцессорный контроллер информацию о работе задвижки.

Дисперсность аэрозоля (размер распыляемых капель) зависит от давления перед распылительными форсунками. Изменение давления в магистрали воды обеспечивается благодаря регулированию положения задвижки в трубопроводе. По каналу 2 сигнал с контроллера поступает на пусковое устройство, которое приводит в действие исполнительный механизм. Исполнительный механизм изменяет положение задвижки в трубопроводе воды.

На следующем этапе разрабатывалась нижняя часть функциональной схемы. В этой части изображались приборы, установленные по месту, пусковой щит аппаратуры и щит управления. В щите управления установлен микропроцессорный контроллер.

Сигналы, поступающие на контроллер, также передаются на пульт управления, для регулировки управляющих воздействий и предотвращения аварийных режимов.

Технологическое оборудование на функциональной схеме изображено в соответствии с ГОСТ 21.403 – 80, условные обозначения запорной арматуры изображены по ГОСТ 2.785 – 70, первичные и функциональные измерительные приборы – в соответствии с ГОСТ 21.404 – 85.

2.4. Выбор технических средств АСУ расходом воды

При разработке автоматизированной системы регулирования расходом воды предпочтение отдавалось серийно выпускаемым средствам автоматизации. При проектировании учитывались такие параметры средств автоматизации как наличие унифицированных сигналов, взаимозаменяемость, легкость компоновки на щитовых конструкциях и сочетаемость приборов.

2.4.1. Выбор датчика температуры

Для измерения температуры различных агрессивных и неагрессивных сред в теплоэнергетической отрасли используются термоэлектрические преобразователи и термопреобразователи сопротивления.

Для измерения температуры впрыскиваемой воды рассмотрим термопреобразователи сопротивления фирм «Метран» и «Элемер».

Термопреобразователи сопротивления обладают рядом преимуществ, а именно:

- имеют высокую точность измерений, которая может достигать в некоторых случаях до $0,013^{\circ}\text{C}$;
- при использовании трехпроводной и четырехпроводной схем подключения исключается влияние изменения сопротивлений линий связи на результат измерения;
- имеют практически линейную характеристику зависимости температуры от сопротивления.

1. Термопреобразователи сопротивления компании «Элемер»

Термопреобразователи предназначены для преобразования значения температуры различных, в том числе агрессивных, сред в унифицированный токовый выходной сигнал $4...20$ мА. Данные термопреобразователи выполнены в климатическом исполнении от -50 до 70°C [29].

Таблица 2.1 – Диапазон измеряемых температур термопреобразователей сопротивления фирмы «Элемер»

Тип термопреобразователя	Диапазон температур, °C
ТСМУ-205 (100М)	от -50 до 50 °C, от -50 до 100 °C, от 0 до 50 °C, от 0 до 100 °C
ТСМУ-205 (100М)	от -50 до 150 °C, от 0 до 150 °C, от 0 до 180 °C, от 0 до 200 °C
ТСПУ-205 (Pt100)	от -50 до 50 °C, от 0 до 100 °C
	от 0 до 200 °C
	от 0 до 300, от 0 до 400, от 0 до 500 °C

2. Термопреобразователи сопротивления компании «Метран»

Термопреобразователи сопротивления с медными и платиновыми чувствительными элементами Метран-203, Метран-204, Метран-205, Метран-206 предназначены для измерения температуры жидких, газообразных, сыпучих сред в различных отраслях промышленности. Изготавливаются в климатическом исполнении для работы при температурах от минус 45 до плюс 60 °C [30].

Таблица 2.2 – Диапазон измеряемых температуры термопреобразователей сопротивления фирмы «Метран»

Тип термопреобразователя	Диапазон температур, °C
Метран-203, Метран-204	от -50 до 150 °C
Метран-205, Метран-206	от -50 до 200 °C

Для измерения температуры впрыскиваемой воды выбираем два термопреобразователя сопротивления ТСМУ-205 (100М) фирмы «Элемер» с диапазоном измерения температур от 0 до 200 °C.

Для измерения температур продуктов сгорания и генерируемой газопарокапельной смеси рассмотрим термоэлектрические преобразователи

фирмы «Метран». Принцип действия термоэлектрических преобразователей основан на термоэлектрическом эффекте или так называемом эффекте Зеебека. Между соединенными проводниками контактная разность потенциалов; если стыки связанных в кольцо проводников находятся при одинаковой температуре, сумма таких разностей потенциалов равна нулю. Когда же стыки находятся при разных температурах, разность потенциалов между ними зависит от разности температур. Коэффициент пропорциональности в этой зависимости называют коэффициентом термо-ЭДС. У разных металлов коэффициент термо-ЭДС разный и, соответственно, разность потенциалов, возникающая между концами разных проводников, будет различная.

Среди преимуществ термопар можно выделить следующие:

- простота изготовления;
- надежность;
- дешевизна;
- широкий диапазон рабочих температур, термопары являются самыми

высокотемпературными датчиками.

В таблице 2.3 приведены характеристики для термопар ТП-0395/2, так как эти термопары являются высоко температурными, что и требуется для решения данной задачи, то осуществим выбор НСХ [30].

Максимальная температура продуктов сгорания достигает 1300 °С, для измерения таких значений подходят термопары ТП-0395/2 с НСХ ПП(R). Выбираем две термопары: одну для измерения температуры продуктов сгорания, вторую для измерения температуры генерируемой газопарокапельной смеси.

Таблица 2.3 – Номинальная статическая характеристика (НСХ) и класс допуска

НСХ	Диапазон измерений, °С	Класс допуска	Кол-во рабочих спаев
ХА (К)	0...+1250	1	1
НН (N)		2	2
ПП (R)	0...+1600	2	
ПП (S)			
ПР (В)	+600...+1800	2	
		3	
Показатель тепловой инерции, с			
40			
Длина монтажной части L, мм			
320, 400, 500, 600, 740, 1000, 1190			

2.4.2. Выбор датчика давления воды

Датчики давления предназначены для непрерывного преобразования абсолютного давления, дифференциального давления, избыточного давления, избыточного давления-разряжения и разности давлений в унифицированный токовый сигнал или цифровой сигнал в стандарте протокола HART. По принципу преобразования давления в электрический сигнал датчики давления делятся на:

- 1) тензометрические;
- 2) пьезометрические;
- 3) емкостные;
- 4) резонансные;
- 5) индуктивные;
- 6) ионизационные;
- 7) пьезоэлектрические.

Принцип преобразования давления в электрический сигнал влияет на пределы измерения, динамические и частотные диапазоны, точность и условия эксплуатации. [31]

Рассмотрим два преобразователя давления ОВЕН ПД100-ДИ и Метран-150.

Датчики давления ОВЕН ПД100-ДИ представляют собой преобразователи давления с измерительной мембраной из нержавеющей стали. Данные датчики обладают повышенной точностью измерения (от $\pm 0,5\%$ верхнего предела измерения), устойчивостью к гидроударам и низким выходным шумом значение которого составляет не более ± 16 мкА.

Основные технические характеристики общепромышленного преобразователя ПД100-ДИ:

- 1) верхний предел измеряемого давления (ВПИ) – от 16 кПа до 25 МПа;
- 2) преобразование давления в унифицированный сигнал постоянного тока 4...20 мА;
- 3) измерение избыточного давления нейтральных к нержавеющей стали AISI 316L сред (газы, пар, вода, слабоагрессивные жидкости);
- 4) перегрузочная способность не менее – 200% ВПИ;
- 5) степень защиты корпуса и электроразъема преобразователя – IP65 [32].

Датчики давления серии Метран-150 предназначены для непрерывного преобразования значения давления в унифицированный токовый выходной сигнал или цифровой сигнал в стандарте HART протокола. Управление параметрами датчика может осуществляться при помощи HART-коммуникатора, удаленно с помощью программы HART-Master, HART-модема и компьютера или программных средств АСУ ТП, локального интерфейса оператора или удаленно с помощью AMS. Датчик давления Метран-150 обладает двухсекционным герметичным корпусом и морозостойким ЖК-дисплеем. Среди преимуществ датчика Метран-150 можно выделить высокую перегрузочную способность, защиту от переходных процессов и функцию непрерывной самодиагностики. Интервал между поверками составляет 5 лет.

Основные технические характеристики датчика избыточного давления Метран-150:

- 1) выходной сигнал – 4...20 мА или HART 0...5 мА;
- 2) максимальное давление – 1 МПа;
- 3) давление перегрузки – 10 МПа;
- 4) температура окружающей среды – от -40 до 85 °С;
- 5) температура измеряемой среды – от -40 до 120 °С [30].

Оба преобразователя давления имеют характеристики, удовлетворяющие техническим требованиям. Исходя из этого выбираем датчик ОВЕН ПД100-ДИ, так как он имеет меньшую стоимость.

2.4.3. Выбор технических средств измерения расхода воды

Электромагнитные расходомеры предназначены для непрерывного измерения объема протекающей по трубопроводу жидкостей и преобразование его в выходной сигнал, который может быть импульсным, частотным или аналоговым 4...20 мА.

Электромагнитные датчики расхода компании «Элемер» Flonet FN20XX.1 применяются для измерения расхода в энергетике, химической и пищевой промышленности. Измеряемой средой является: горячая, холодная вода, кислоты, щелочи, пищевые жидкости.

Технические характеристики датчика расхода Flonet FN20XX.1:

- 1) максимальное давление – от 0,6 до 4 МПа;
- 2) максимальная температура измеряемой среды – 150 °С;
- 3) класс пылевлагозащиты – IP68;
- 4) функция дозирования;
- 5) определение «сухой трубы»;
- 6) климатическое исполнение – от -5 до 55 °С [29].

2.4.4. Выбор управляющего устройства

В качестве регулирующего устройства будет использоваться программируемый логический контроллер. Рассмотрим контроллеры фирм «ОВЕН», «ВЭСТ», «Siemens».

Программируемый логический контроллер SIMATIC S7-300 предназначен для построения систем автоматизации низкой и средней степени сложности. S7-300 применяется для автоматизации машин специального назначения, машиностроительного оборудования, текстильных и упаковочных машин, оборудования для производства технических средств управления и электротехнического оборудования, в системах автоматизации судовых установок и систем водоснабжения. Эффективность применения данных контроллеров повышает наличие широкой линейки процессоров различной производительности, модулей ввода-вывода дискретных и аналоговых сигналов, функциональных модулей и коммуникационных процессоров. Программируемые контроллеры S7-300 могут включать в свой состав модуль центрального процессора, блок питания, сигнальные модули, коммуникационные процессоры, функциональные модули, интерфейсные модули. Конструкция контроллера обеспечивает высокую гибкость и удобство обслуживания. Все модули устанавливаются на профильную шину и объединяются в одну систему с помощью шинных соединителей. В монтажных стойках модули размещаются в произвольном порядке [33]. Технические характеристики процессорных модулей представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Основные технические характеристики процессоров Simatic S7-300

Процессор	312C	313C	314C-2 PtP	314C-2PN/DP
1	2	3	4	5
Рабочая память, Кб	64	128	96	192
Время выполнения логических операций, мкс	0,1	0,07	0,06	0,06
Время выполнения операций с плавающей точкой, мкс	1,1	0,72	0,59	0,59
Количество дискретных/аналоговых каналов	256/64	1008/253	16048/1006	16048/1006
Встроенные интерфейсы	MPI	MPI	RS 422/ RS 485	MPI/DP + PN
Количество встроенных дискретных входов/выходов	10/6	24/16	24/16	24/16
Количество встроенных аналоговых входов/выходов	-	4 AI (I/U) + 1 AI (Pt100)/2 АО		
ПИД-регулирование	нет	да	да	да

Контроллер ОВЕН ПЛК63 предназначен для локальных систем автоматизации. Применение данный контроллер находит в котельных установках, жилищно-коммунальном хозяйстве, машиностроении и металлообработке, электроэнергетике и нефтегазовой сфере. ПЛК63 имеет двухстрочный знаковосинтезирующий дисплей, встроенные интерфейсы RS-

485, RS-232, поддерживает протоколы OВЕН, Modbus RTU, Modbus ASCII, GateWay. Имеется возможность расширения путем подключения модулей ввода/вывода. Бесплатная библиотека функциональных блоков включает ПИД-регулятор с автонастройкой, блок управления трехпозиционными задвижками и стандартные библиотеки CODESYS [34]. Технические характеристики контроллера OВЕН ПЛК 63 приведены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Основные технические характеристики контроллера OВЕН ПЛК 63

Центральный процессор	32-разрядный RISC процессор 50 МГц на базе ядра ARM7
Объем оперативной памяти для хранения переменных программ	10 кб
Объем памяти хранения программ	280 кб
Конструктивное исполнение	Крепление на DIN-рейку
Интерфейсы	RS-485, DEBUG RS-232
Протоколы	OВЕН, Modbus RTU/ASCII, GateWay
Количество универсальных аналоговых входов	8
Количество дискретных входов	8
Количество выходных элементов	6
Расширение количества дискретных выходов	до 8

Регулятор ВЭСТ-02 предназначен для создания систем управления малыми и средними объектами. Регулятор может быть запрограммирован по определенному сценарию. Например: тепловой пункт, тепловая завеса, вентиляция. Конфигурируются сценарии в программе, разработанной НПО ВЭСТ, АКИАР. Среди преимуществ ВЭСТ-02 можно выделить поддержку

интерфейсов RS-232 и RS-485, возможность подключения GSM/GPRS-модемов, интернет-коммуникаторов, преобразователей и конвертеров, возможность создания архива данных и интегрирования в существующую АСУ ТП с конвертацией протокола обмена данными. Областью применения ВЭСТ-02 являются тепловые пункты, системы вентиляции, водогрейные котельные, водопроводные насосные станции и насосные станции пожаротушения, а также системы дымоудаления и диспетчеризации [35]. Технические характеристики ВЭСТ-02 приведены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Основные технические характеристики регулятора ВЭСТ-02

Диапазон контроля температур	от -50 до 150 °С
Тип входных датчиков температуры	Pt1000
Аналоговых входов	8
Цифровых входов	5
Семисторных выходов	6
Аналоговых выходов 0...10 В	2
Аналоговых выходов с ШИМ	2
Интерфейс связи	RS-232, RS-485
Средняя наработка на отказ	50000 ч

В качестве регулирующего устройства выбираем контроллер Siemens S7-300 на базе процессора CPU 413C-2 PtP. В дополнении к процессору выбираем модуль ввода аналоговых сигналов Siemens 331-7NF00. Модуль аналогового ввода подключается с помощью общей шины к процессорному модулю. На лицевых панелях сигнальных модулей расположены светодиоды индикации отказов и ошибок. Выбранный сигнальный модуль имеют 8 аналоговых входов. Для питания контроллера выбираем блок питания PS 307 с входным напряжением 220 В.

2.4.5. Выбор исполнительного механизма

Однооборотные электроприводы МЭО используются для передачи крутящего момента арматуре при ее повороте на один оборот или менее. Механизмы МЭО предназначены для приведения в действие запорно-регулирующей арматуры в системах автоматического регулирования технологическими процессами, в соответствии с командными сигналами регулирующих и управляющих устройств. Механизмы МЭО исполняют функции автоматического, дистанционного или местного открытия и закрытия арматуры, указания степени открытия арматуры на шкале местного указателя, позиционирование рабочего органа арматуры в любом промежуточном положении, формируют дискретные сигналы о промежуточных и конечных положениях рабочего органа арматуры. Цифровые сигналы состояния моментных выключателей открытия и закрытия, сигнал крутящего момента и цифровые сигналы состояния конечных и путевых выключателей передаются по интерфейсу RS-485. Электроприводы МЭО могут работать в экстремальных условиях: при повышенных температурах, запыленности и сильной вибрации [36]. Для выбора исполнительного механизма для привода задвижки на трубопроводе воды воспользуемся формулой:

$$M_{\max} = 6,89 \cdot D_y - 338 = 6,89 \cdot 184 - 338 = 929,76 \text{ Н}\cdot\text{м}, \quad (2.1)$$

где D_y - условный диаметр трубопровода, мм.

При выборе учитывалось условие:

$$M_n > M_{\max}, \quad (2.2)$$

где M_n – номинальный крутящий момент на выходном валу исполнительного механизма, Н·м.

Выбираем механизм электроисполнительный однооборотный типа МЭО-1600/63-0,25У-92КБ.

2.4.6. Выбор блока управления исполнительным механизмом

Блоки управления электродвигателями БУЭР предназначены для бесконтактного управления электрическими исполнительными механизмами типа МЭО. По сравнению с ПБР и ФЦ блоки управления БУЭР имеют современную элементную базу, обеспечивающую высокую надежность и значительно меньшие габариты и вес. Блоки управления крепятся на стандартную DIN-рейку и выполнены в пластмассовом корпусе. БУЭР-3-30-02 выполняет управление электрическим исполнительным механизмом с однофазным электродвигателем по командам, получаемым по резервированному цифровому каналу. Блок управления осуществляет управление электродвигателем (пуск, реверс, остановка), самодиагностику и диагностику исполнительного механизма [37]. Режим работы – повторно-кратковременный с продолжительностью включения до 25%. Блок управления содержит микропроцессорное устройство, два приемо-передатчика интерфейсного канала RS-485 и преобразователь питания, что обеспечивает:

- резервирование цифрового канала;
- прием команд управления исполнительным механизмом;
- формирование управляющих импульсов;
- передачу по цифровому каналу значения сигнала датчика положения механизма;
- диагностику работоспособности блоков управления и исполнительного механизма.

Решения по выбору технических средств автоматизации приведены в заказной спецификации, представленной в таблице 2.7.

2.4.7. Выбор автоматизированного рабочего места оператора

АРМ объединяет программно-аппаратные средства, обеспечивающие взаимодействие человека с компьютером, предоставляет возможность ввода информации.

Организация сетей передачи данных осуществляется посредством сетей Ethernet/Modbus TCP/IP, полевой шины Modbus и технологической сети Ethernet

В таблице 2.8 приведены два компьютера, между которыми производится выбор.

Таблица 2.8 – Технологические характеристики компьютеров

Наименование	Asus KP55	Acer Aspire TC-605 DT.SRQER.085
Производитель видеокарты	NVIDIA	NVIDIA
Видео память	2 ГБ	2 ГБ
Графический контроллер	GeForce GT720	GeForce GT625
Операционная система	Windows 10 SL 64 Bit	Windows 8.1 SL 64 bit
Оперативная память (ram)	8 ГБ	8 ГБ
Тип процессора	Core i7-4660	Core i5-4460
Кэш-память	8 МБ	6 МБ
Жесткий Диск (hdd)	1 ТБ	1 ТБ
Стоимость	26134	265178

Выбираем компьютер Asus, потому что компьютер имеет лучшие характеристики, такие как оперативная память, тип процессора, кэш-память, и наименьшую стоимость.

Таблица 2.7 – Заказная спецификация средств автоматизации

Позиция	Наименование, техническая характеристика приборов и средств автоматизации	Тип и марка прибора	Кол
1	2	3	4
1а	Расходомер электромагнитный, выходной унифицированный сигнал 4...20 мА, диапазон измерения: 0,2...20 л/с, максимальное давление 4 МПа, предел допускаемой основной погрешности $\pm 0,2\%$, степень защиты IP68. ООО «Элемер», г. Зеленоград	Flonet FN20XX.1	1
6а...8а	Преобразователь давления, выходной унифицированный сигнал 4...20 мА, диапазон измерения: 16 кПа...25 МПа, предел допускаемой основной погрешности $\pm 0,25\%$. ООО «ОВЕН», г. Москва	ПД100-ДИ	3
2а	Измерительный преобразователь с унифицированным выходным сигналом, диапазон измерения: 0...200 °С, выходной сигнал 4...20 мА, предел допускаемой основной погрешности $\pm 0,25\%$, НСХ 100М. ООО «Элемер», г. Зеленоград	ТСМУ Элемер-205	1
3а, 4а	Преобразователь термоэлектрический, НСХ ПП(R), диапазон измерения 0 ... 1600 °С, монтажная длина 600 мм, класс допуска С.. ПГ «Метран», г. Челябинск	ТПР-Метран0395/2	2
5а	Контроллер программируемый, логический, микропроцессорный, количество входов – 4 аналоговых и 24 дискретных, количество дискретных выходов – 16, количество аналоговых выходов – 2. ООО «Сименс», г. Москва	Siemens S7-300	1
		ФЮРА.421000.011 С01	
Исполнил	Соломатин Я.	Спецификация приборов и средств автоматизации	Стад
Проверил	Шидловский С.В.		Лист
			Листов
			П
		ТПУ	ИШЭ
		Группа	56М73

1	2	3	4
5δ	Блок управления электродвигателем реверсивный, входной сигнал управления 4...20 мА, климатическое исполнение УХЛ 4.2. ЗАО «Волмаг», г. Чебоксары.	БЧЭРЗ-30-02	1
5в	Механизм электроисполнительный однооборотный с номинальным значением момента на выходном валу 1600 Н·м. в составе с токовым блоком сигнализации положения выходного вала БСПТ-10; год разработки – 2015. ОАО «ЗЭиМ», г. Чебоксары.	МЭО-1600/63-0,25- 92	1
ФЮРА.421000.011 С01			Лист 2

3 Схема взаимосвязи оборудования верхнего уровня и полевого

Автоматизированная система управления расходом воды, строится по трехуровневому принципу:

- верхний уровень;
- средний уровень;
- нижний уровень.

Основные функции автоматизированной системы управления являются: сбор, обработка, хранение данных, а также предоставление отчетности. Такая система должна работать непрерывно, 24 часа в день и 7 дней в неделю.

АСУ должна быть организована по трехуровневому принципу, с минимизацией участия диспетчеров в технологическом процессе. Также оборудование системы регулирования должно иметь возможность архивации данных о состоянии технологического процесса.

Структурная схема автоматизированной системы управления расходом воды представлена на рисунке 3.1.

Верхний уровень АСУ является автоматизированным рабочим местом оператора (АРМ). Оборудование АРМ оператора предназначено для оперативного отражения состояний технологических объектов и оборудования комплекса на экране компьютера, а также предоставляет возможность дистанционного управления оборудованием и задания технологических уставок. В составе оборудования может поставляться промышленный компьютер, стойка сервера, источник бесперебойного питания и периферийное оборудование.

Нижний уровень представляет собой совокупность первичных средств измерения температуры, расхода и давления, необходимого для контроля всех технологических параметров топливоподачи. На магистрали подачи воды установлен расходомер. Датчики давления установлены в магистралях воды, продуктов сгорания и ГПС. Три датчика температуры использованы для контроля температуры воды, ГПС и продуктов сгорания.

Средний уровень используется для взаимосвязи нижнего уровня с верхним уровнем и выполнен с помощью щита автоматизации. Сигналы с нижнего уровня поступают в щит и далее передаются на верхний уровень управления, сигналы воздействия поступают с АРМ.

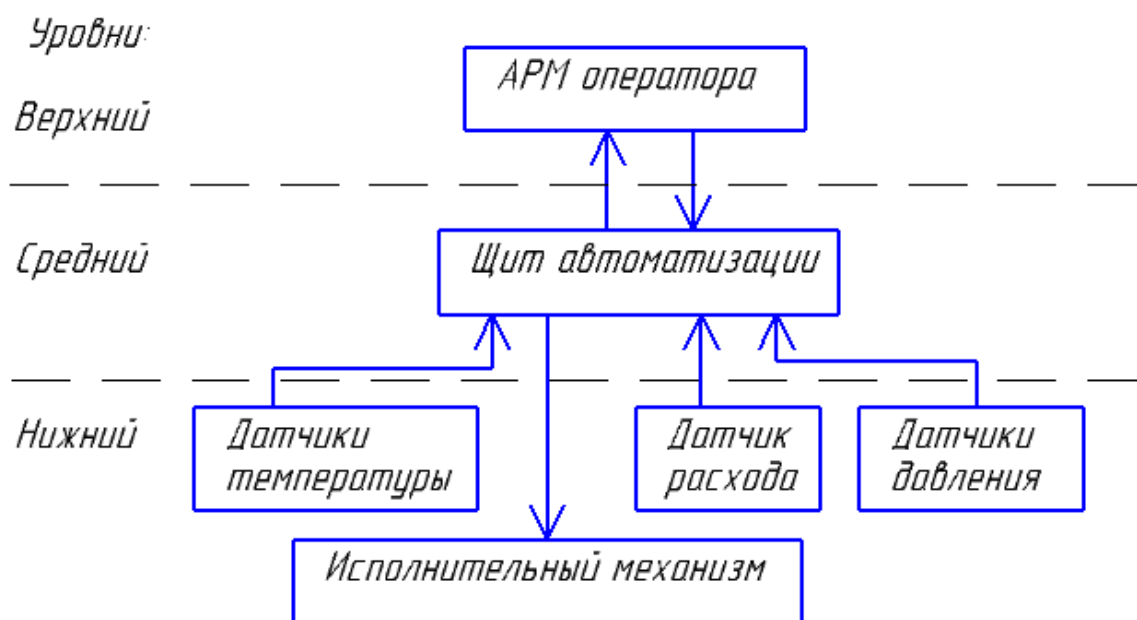


Рисунок 3.1 – Структурная схема автоматизированной системы управления
расхода воды

4 Разработка принципиальной электрической схемы автоматизированной системы управления

На принципиальной схеме изображают все электрические элементы или устройства, предназначенные для контроля и осуществления в изделии заданных электрических процессов, все электрические связи между ними, а также электрические элементы (соединители, зажимы и т.п.), которыми заканчиваются входные и выходные цепи. На схеме допускается изображать соединительные и монтажные элементы, устанавливаемые в изделии по конструктивным соображениям [38]. Принципиальные схемы имеют код ЭЗ.

Принципиальные схемы служат основанием для разработки других документов проекта (монтажных таблиц щитов и пультов, схем внешних соединений и др.). На такой схеме изображаются все элементы информационно-измерительной системы, находящиеся в щите, а также принцип их взаимодействия между собой.

Разработанная принципиальная электрическая схема автоматизированной системы управления представлена на листе ФЮРА.421000.011 ЭЗ.

При выполнении схемы использованы развернутые изображения элементов технических средств. Расположение графического текстового материала выбираем для облегчения чтения этого чертежа. Принципиальная электрическая схема выполнена с применением условных графических изображений.

Линии связи состоят только из горизонтальных и вертикальных отрезков и имеют минимальное число взаимных пересечений.

Для обозначения участков цепей принципиальных электрических схем применяются арабские цифры одного размера. Последовательность обозначений сверху вниз в направлении слева направо. В данной схеме для цепей управления, регулирования и измерения используется группа чисел 1 - 99, для цепей питания 100 - 200.

В верхней части схемы изображен контроллер, состоящий из модуля питания, модуля центрального процессора и модуля ввода аналоговых сигналов. Модуль питания А1 подключен к клеммному блоку ХТ1. Также к клеммному блоку ХТ1 подключен блок питания G1. Модуль питания контроллера А1 и блок питания G1 питаются от щита питания с напряжением 230 В. Блок питания G1 предназначен для питания датчиков дистанционного указания положения, датчиков температуры, расхода, и давления. С помощью клеммного блока ХТ2 датчики соединяются с модулем центрального процессора А2 и модулем ввода аналоговых сигналов. БУЭР 3-30-02 соединен с модулем центрального процессора А2 через интерфейс RS-485. Датчик дистанционного указателя положения, расположенный в МЭО, через клеммный блок ХТ2 подключаются к модулю ввода аналоговых сигналов А3. С помощью этих датчиков ведется контроль за положением вала исполнительного механизма. Модуль центрального процессора с помощью интерфейса Ethernet соединен с АРМ оператора.

Обозначение устройств на принципиальной электрической схеме следующее:

А1 – модуль питания контроллера PS 307;

А2 – модуль центрального процессора CPU 314C-2 PtP;

А3 – модуль ввода аналоговых сигналов 331-7NF00;

G1 – блок питания БП 906;

ХТ1, ХТ2 – клеммные блоки.

5 Разработка монтажной схемы автоматизированной системы управления

Монтажные схемы щитов и пультов проектируют с целью выполнения различных видов коммутации элементов систем автоматизации в пределах щитов и пультов. К монтажной документации щитов относят схемы электрических соединений щитов. Для разработки монтажных документов используют функциональные и принципиальные схемы и техническую документацию заводов изготовителей средств автоматизации.

Схема монтажная должна содержать:

- первичные преобразователи, расположенные вне щита;
- внешние электрические и трубные проводки;
- щит автоматизации;
- таблицу с поясняющими надписями [39].

На схеме внешних проводок сверху поля чертежа размещена таблица с поясняющими надписями. Под таблицей с поясняющими надписями расположены изображения первичных преобразователей и других средств автоматизации, устанавливаемые непосредственно на технологическом оборудовании и технологических трубопроводах.

Исполнительные механизмы и датчики изображены монтажными символами. Внутри монтажных символов указаны номера зажимов и подключение к ним соответствующих жил кабелей. Изображены только клеммы, которые используются для решения данной задачи. Маркировки жил указаны вне монтажных символов. Для упрощения монтажной схемы на ней не изображены группы элементов, подключаемые одинаково.

Щит автоматизации был изображен в виде прямоугольника в нижней части чертежа, в нем показаны блоки зажимов, а также подключенные к ним провода и жилы кабелей. Проводники, подключаемые к соответствующим зажимам обозначены в соответствии с принципиальной электрической схемой.

Конечной целью проектирования электрических и трубных проводок является создание монтажной документации, необходимой для прокладки,

коммутации жил к техническим средствам автоматизации, а также для проверки и ввода в эксплуатацию проводок.

Для линий питания выбираем кабели с сечением алюминиевых жил $2,5 \text{ мм}^2$ типа АКРВБГ, которые имеют броню из двух стальных оцинкованных лент, а также оболочку из резины, не распространяющей горение. Такой кабель предназначен для неподвижного присоединения к электрическим приборам, аппаратам, сборкам зажимов электрических распределительных устройств с номинальным переменным напряжением до 660 Вольт частотой до 100 Гц или постоянным напряжением до 1000 Вольт [40], что полностью удовлетворяет нашим требованиям.

Для информационных линий выбираем кабели с сечением медных жил 1 мм^2 типа КРВГ [41].

Выбранные кабели, а также их технические характеристики представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Характеристики проводов и кабелей электропроводки АСУ

№ линии	Марка	Число жил	Номинальное сечение, мм^2	Диаметр, мм
8, 15	АКРВБГ	4	2,5	15,51
1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9,	КРВГ	4	1	10,54
10	КРВГ	5	1	11,6
13	КРВБГ	10	1	23,25
14	КРВБГ	8	1	19,7
11	КРВБГ	4	1	10,7
12	КИПЭВ	2	0,6	9,22

Для соединения сборок зажимов с контроллером используется провод ПВ-1. Данный провод имеет медную жилу и изоляцию из поливинилхлоридного пластика.

Монтажная схема проектируемой автоматизированной системы представлена на чертеже ФЮРА.421000.011 С4.

6 Разработка чертежа общего вида щитовой конструкции АСУ

Щиты систем автоматизации предназначены для размещения на них средств контроля и управления технологическими процессами, контрольно-измерительных приборов, сигнальных устройств, аппаратуры управления, автоматического регулирования, защиты, блокировки, линии связи между ними (трубная и электрическая коммутация) и т.п.

Целью данного этапа является составление комплекта чертежей, необходимых для изготовления щита, монтажа технических средств автоматизации, электрических проводок и эффективной эксплуатации средств автоматизации.

Учитывая конструктивные особенности, а также степень защиты от прикосновения к токоведущим частям, в операторском помещении разместим для монтажа средств автоматизации разрабатываемой системы регулирования расхода воздуха щит шкафной, односекционный с задней дверью, малогабаритный (ЩШМ-ЗД) исполнения II [42].

Для контроля за технологическим процессом, а также задания уставок, расположим на щите контроллер Simatic S7-300, сборки зажимов и блоки питания.

В данном случае для размещения средств автоматизации используем щит с задней дверью одиночный, шириной 400 мм и глубиной 250 мм – ЩШ-ЗД-II-400×250. Фасадная сторона щитов (шкафных и панельных с каркасом) на три функциональных поля, т.к. исполнение II. Разбивка выполнена на основе рационального распределения приборов, органов управления и сигнальной арматуры. При проектировании щитов систем автоматизации технологических процессов рекомендуется применять преимущественно щиты исполнения II. Фасадные панели этого исполнения наиболее технологичны в изготовлении благодаря минимальным размерам и применению автоматизированного процесса пробивки отверстий в них.

Общий вид щита представлен на чертеже ФЮРА.421000.011 ВО.

7 Расчет параметров настройки регулятора

7.1 Идентификация объекта управления

Идентификация предназначена для получения математических моделей объекта управления. Существует активная и пассивная, в инженерной практике применяют активную идентификацию (на объект подается специализированное входное воздействие и по реакции объекта при обработке результатов получают математическую модель).

В данной работе для получения кривой разгона была использована динамическая модель изменения температуры в топке котла НР-18. Модель составлена на базе экспериментальных исследований, проведенных на реальном объекте. Кривая разгона приведена на рисунке 7.1.

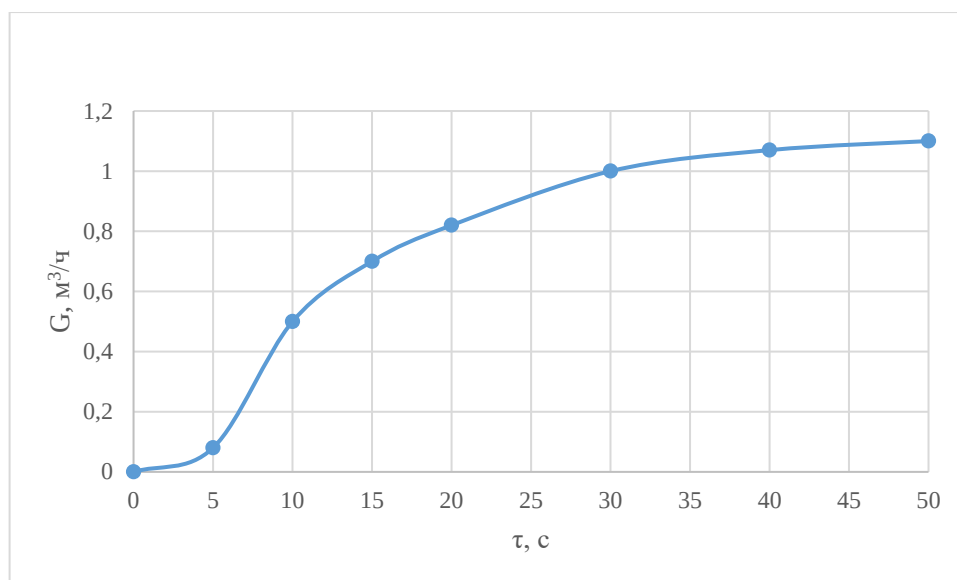


Рисунок 7.1 – Кривая разгона объекта управления, где τ – время, G – расход

По полученной переходной характеристике определяем динамические параметры объекта, такие как: постоянная времени T ; запаздывание t , коэффициент передачи K .

Передаточная функция для кривой представляет собой апериодическое звено с запаздыванием:

$$W(P) = \frac{k}{(TP+1)} e^{-P\tau}, \quad (7.1)$$

где k – коэффициент усиления;

P – оператор Лапласа;

τ – время запаздывания;

T – постоянная времени.

Решение уравнения 7.1 при нулевых начальных условиях представляет собой:

$$\begin{cases} h(t) = 0 & 0 \leq t \leq \tau, \\ h(t) = h(\infty) \left[1 - e^{-\frac{t-\tau}{T}} \right] & t > \tau. \end{cases} \quad (7.2)$$

Получаем два неизвестных значения времени запаздывания τ и постоянную времени T .

Получаем два неизвестных значения время запаздывания τ и постоянную времени T . Коэффициент усиления $k = \frac{h(T_y)}{A}$, где A – выходное воздействие; при единичном воздействии $k = h(T_y)$. Время чистого запаздывания заранее выделяется из $h(t)$. На кривой разгона строим две точки A и B . Точка A определяется как $0,33 k$, а точка B имеет ординату $0,7 k$. Постоянная времени T и время запаздывания τ определяются по формулам:

$$T = -\frac{t_A - \tau}{\ln(1 - h_A)}, \quad (7.3)$$

$$\tau = \frac{t_B \ln(1 - h_A) - t_A \ln(1 - h_B)}{\ln(1 - h_A) - \ln(1 - h_B)}, \quad (7.4)$$

где t_A и t_B – значение времени при соответствующих точках на кривой;

h_A и h_B – значение ординат при точках A и B .

Определяем расположение на кривой точек A и B и находим необходимые неизвестные параметры.

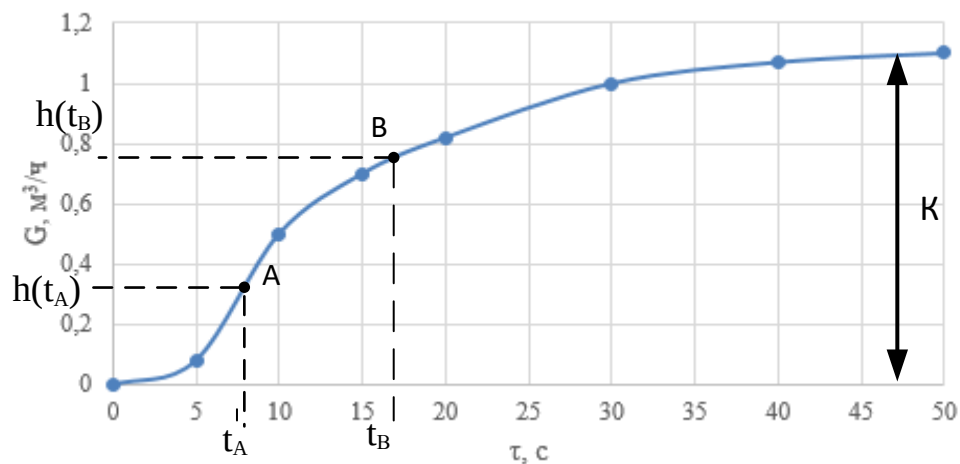


Рисунок 7.2 – Определение точек на кривой разгона для расчета параметров регулятора где τ – время, G – расход

Для наглядности и точности производится аппроксимация кривой по методу Орманна. Определяется время t_B по нормированной переходной функции $H(t)$, которое является корнем уравнения $h(t_B)$ и время t_A и $h(t_A)$. Затем вычисляются постоянная времени T и время запаздывания τ :

$$\tau = 0,5(3t_A - t_B), \quad (7.5)$$

$$T = \frac{t_B - \tau}{1.2} = 1,25(t_B - t_A). \quad (7.6)$$

Определяем значения по кривой разгона:

$$\tau = 0,5(3 \cdot 8 - 17) = 3,5 \text{ с}, \quad (7.7)$$

$$T = 1,25(17 - 8) = 11,25 \text{ с}. \quad (7.8)$$

Передаточная функция имеет вид:

$$W(P) = \frac{1,1}{(11,25P+1)} e^{-3,5P}. \quad (7.9)$$

7.2 Расчет параметров настройки регулятора

На рисунке 7.3 представлен вид структурной схемы системы регулирования.

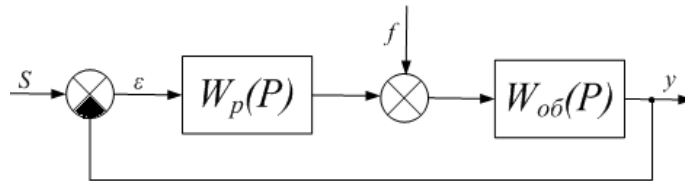


Рисунок 7.3 – Структурна схема системы регулирования

Расчет системы производится для степени устойчивости равной $\psi=0,9$.

Определяем значение степени колебательности:

$$m = -\frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \ln(1 - \psi) = -\frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \ln(1 - 0,9) = 0,366. \quad (7.10)$$

Передаточная функция объекта регулирования описывается формулой:

$$W(P) = \frac{1,1}{(11,25P+1)} e^{-3,5P}. \quad (7.11)$$

Полученные расширенные частотные характеристики объекта представлены в таблице 7.1 в виде листинга расчета. Полученные значения представлены для диапазона частот от 0,0001 до 0,054 с^{-1} , с шагом по частоте в 0,02 с^{-1} .

Таблица 7.1 – Расширенные частотные характеристики объекта

$\omega, \text{с}^{-1}$	$\text{Re}_{об}(m, \omega)$	$\text{Im}_{об}(m, \omega)$	$A_{об}(m, \omega)$
1e-4	1.100592	-1.6238842e-3	1.10059339
0.02	1.137344	-0.3648843	1.1944417
0.04	0.984259	-0.7214869	1.22037268
0.06	0.69519	-0.9478153	1.17543325
0.08	0.387204	-1.0160439	1.0873233
0.1	0.133794	-0.9777791	0.9868905
0.12	-0.05081	-0.8905741	0.89202234
0.139	-0.178687	-0.78925	0.80922475
0.159	-0.265847	-0.6897867	0.73924316
0.179	-0.325086	-0.5980566	0.68070012
0.199	-0.365293	-0.5154099	0.63173282
0.219	-0.392365	-0.4414164	0.5905918
0.239	-0.410175	-0.3750698	0.55580638
0.259	-0.42128	-0.3152791	0.52619192

Продолжение таблицы 7.1

$\omega, \text{с}^{-1}$	$\text{Re}_{o6}(m, \omega)$	$\text{Im}_{o6}(m, \omega)$	$A_{o6}(m, \omega)$
0.279	-0.427391	-0.2610499	0.50080927
0.299	-0.429667	-0.2115353	0.47891653
0.319	-0.42891	-0.1660377	0.45992609
0.338	-0.42568	-0.123991	0.44336996
0.358	-0.420377	-0.0849405	0.42887273
0.378	-0.413292	-0.0485222	0.41613095
0.398	-0.40464	-0.0144463	0.4048974
0.418	-0.39458	0.0175173	0.39496913
0.438	-0.38324	0.0475502	0.38617827
0.458	-0.370716	0.0757951	0.378385
0.478	-0.35709	0.1023628	0.37147207
0.498	-0.34243	0.1273385	0.36534056
0.518	-0.326797	0.1507862	0.3599065
0.537	-0.310244	0.1727527	0.35509823

Параметры настройки ПИ-регулятора рассчитываются как:

$$\frac{K_p}{T_u} = - \frac{\omega \cdot (m^2 + 1) \cdot \text{Im}_{o6}(m, \omega)}{A_{o6}^2(m, \omega)}, \quad (7.12)$$

$$K_p = - \frac{m \cdot \text{Im}_{o6}(m, \omega) + \text{Re}_{o6}(m, \omega)}{A_{o6}^2(m, \omega)}, \quad (7.13)$$

где T_u – постоянная интегрирования регулятора,

K_p – коэффициент передачи регулятора.

Для нахождения значения параметров использовался диапазон значения частот от 0 до 0,054 с^{-1} , с шагом по частоте в 0,02 с^{-1} . Полученные значения представлены в таблице 7.2 в виде листинга расчета.

Таблица 7.2 – Значение параметров ПИ – регулятора

$\omega, \text{с}^{-1}$	K_p	$\frac{K_p}{T_u}$
0.0001	-0.908109	1.520189e-7
0.02	-0.703583	5.800313e-3
0.0399	-0.483576	0.021919
0.0598	-0.252084	0.046518
0.0797	-0.012968	0.077669
0.0996	0.230066	0.113386
0.1195	0.473493	0.151664

Продолжение таблицы 7.2

$\omega, \text{с}^{-1}$	K_p	$\frac{K_p}{T_u}$
0.1394	0.71399	0.190518
0.1593	0.94845	0.228009
0.1792	1.173997	0.26228
0.1991	1.388003	0.291577
0.219	1.588089	0.314278
0.2389	1.772139	0.32891
0.2588	1.938299	0.33417
0.2787	2.084985	0.328936
0.2986	2.210877	0.312284
0.3185	2.314919	0.283489
0.3384	2.396316	0.242038
0.3583	2.454526	0.187629
0.3782	2.489253	0.12017
0.3981	2.50044	0.039779
0.418	2.488254	-0.053225
0.4379	2.453077	-0.158324
0.4578	2.395491	-0.274818
0.4777	2.316268	-0.401829
0.4976	2.21635	-0.53832
0.5175	2.096839	-0.683107
0.5374	1.958974	-0.834875

Для удобства и визуализации строится зависимость от полученных параметров, представленная на рисунке 7.4. Полученная кривая на рисунке, является линией для степени затухания равной 0,9. Все значения параметров настройки, которые будут лежать на этой кривой, будут обеспечивать заданную степень затухания.

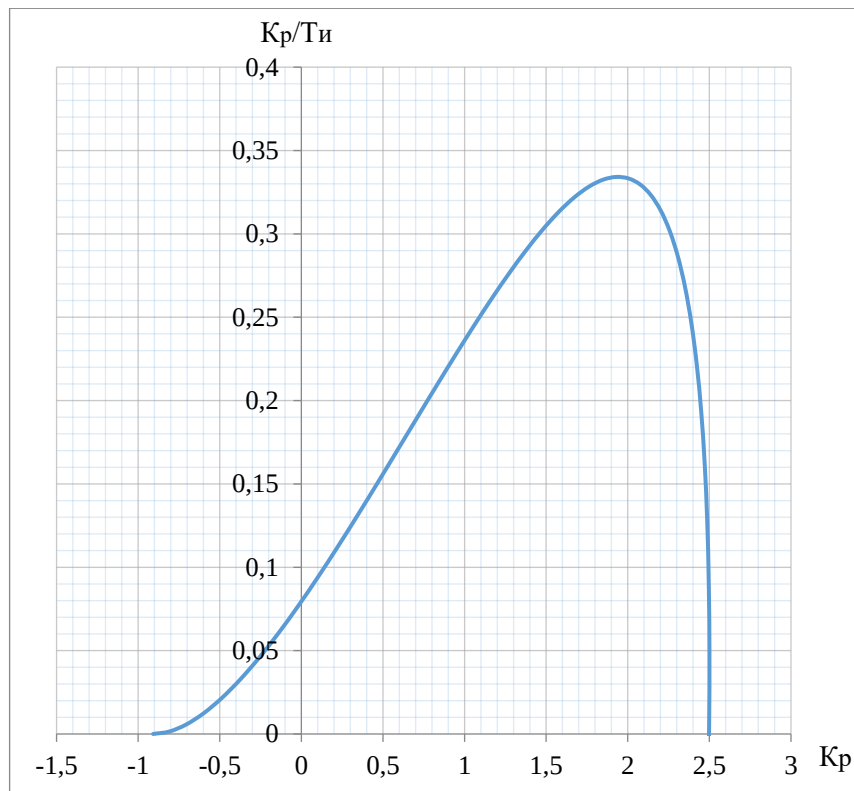


Рисунок 7.4 – Параметры настройки ПИ-регулятора

В качестве критерия качества используется первая интегральная оценка. Минимальное значение этой оценки соответствует точке с максимальным значением соотношения K_p/T_u на линии заданного запаса устойчивости.

Из таблицы 7.2 определяем:

$$\max \left(\frac{K_p}{T_u} \right) = 0,334136, \quad K_p = 1,928024, \quad \text{резонансная частота } \omega = 0,258 \text{ с}^{-1}.$$

Определяем значение постоянной интегрирования:

$$T_u = \frac{K_p}{\max(K_p/T_u)} = 5,77 \text{ с.} \quad (7.14)$$

Произведем оценку качества переходного процесса в замкнутой системе при возмущении, которое идет по каналу регулирующего воздействия.

Передаточная функция будет иметь вид:

$$W(P) = \frac{W_{об}(P) \cdot W_p(P)}{1 + W_{об}(P) \cdot W_p(P)}, \quad (7.15)$$

где $W_p(P)$ – передаточная функция регулятора;

$W_{об}(P)$ – передаточная функция объекта.

Переходный процесс, идущий в замкнутой системе по каналу задающего воздействия, рассчитывается по методу трапеций. Чтобы рассчитать переходный процесс, необходимо определить вещественную частотную характеристику системы. На рисунке 7.5 представлен график вещественной частотной характеристики.

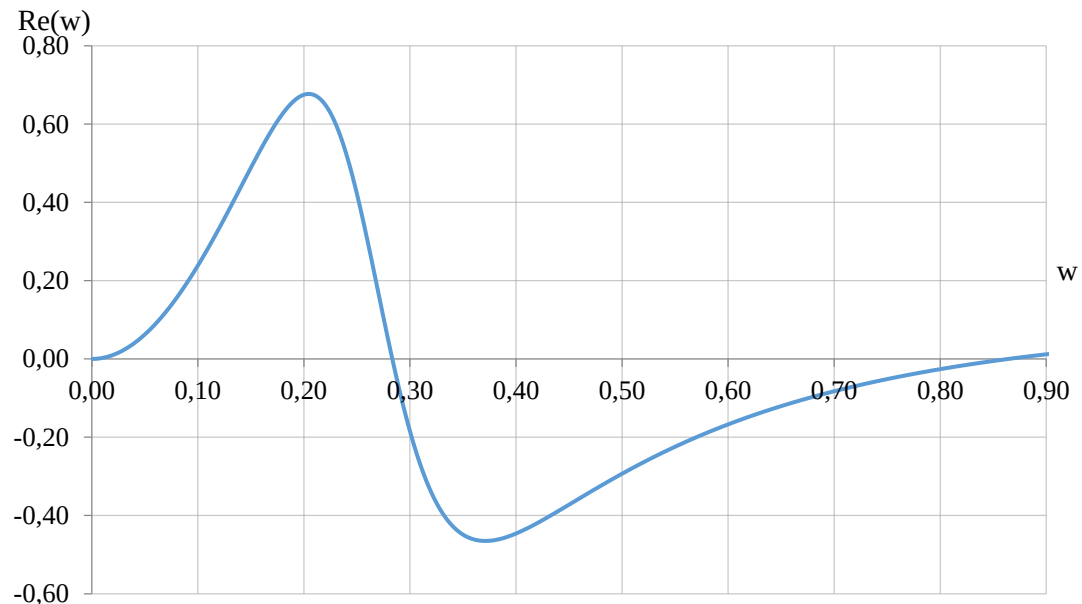


Рисунок 7.5 – Графическое представление вещественной частотной характеристики системы

Переходная характеристика системы связана с вещественной частотной характеристикой системы выражением:

$$y(t) = \frac{2}{\pi} \cdot \int_0^{\infty} \frac{Re(\omega)}{\omega} \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot d\omega, \quad (7.16)$$

где $Re(\omega)$ – вещественная частотная характеристика системы;

ω – частота;

t – продолжительность переходного процесса системы.

Для достижения точности расчета в качестве верхнего предела интеграла применяется не бесконечность, а значение, при котором значение вещественной частотной характеристики системы стремится к 0. Из рисунка 7.5 определяем это значение.

Конечный вид уравнения для определения переходного процесса системы имеет вид:

$$y(t) = \frac{2}{\pi} \cdot \int_0^{0,8} \frac{Re(\omega)}{\omega} \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot d\omega. \quad (7.17)$$

На рисунке 5.6 представлен переходный процесс замкнутой системы по каналу задающего воздействия. С помощью этого переходного процесса была произведена оценка качества регулирования. Данная оценка позволит сделать вывод о том, насколько система удовлетворяет требованиям, при предъявленных к системе ограничениях.

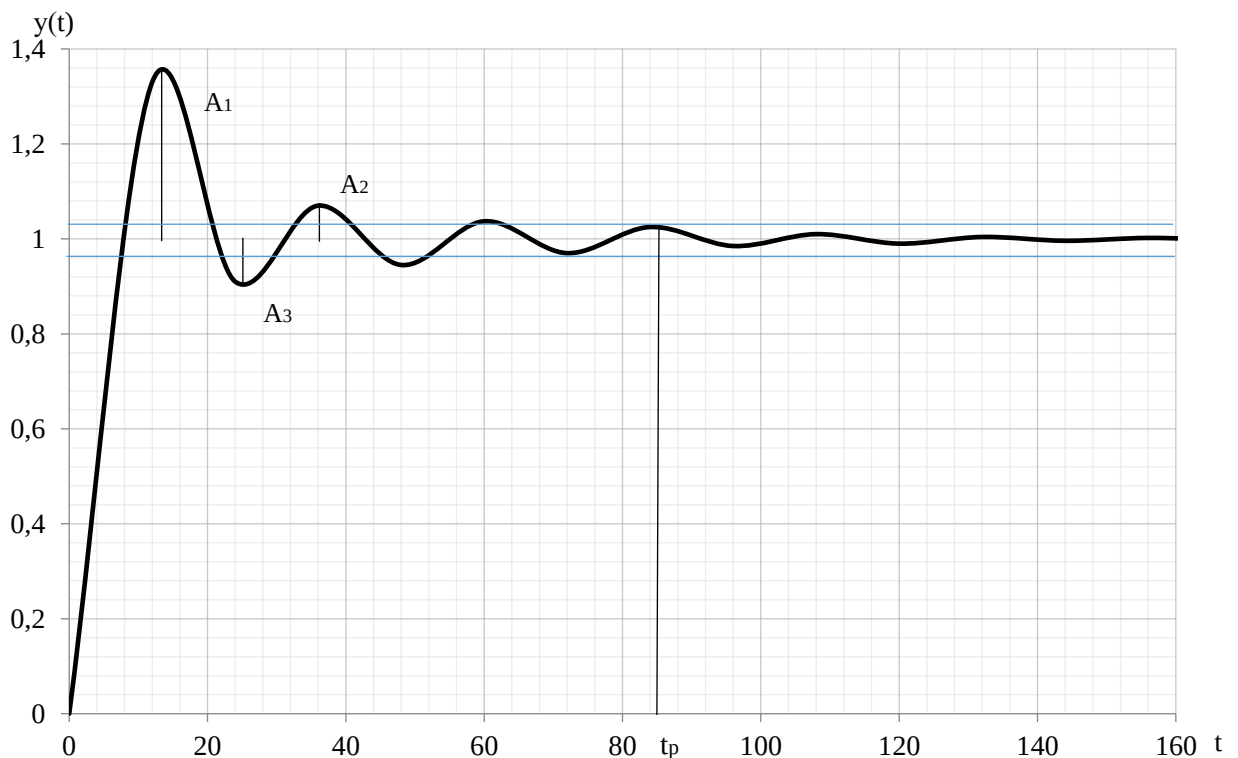


Рисунок 7.6 – Переходный процесс в системе по каналу задающего воздействия

С использованием графика определяются прямые оценки качества:

а) максимальная динамическая ошибка: $A_1=0,35$;

б) перерегулирование: $\sigma = \frac{A_3}{A_1} \cdot 100\% = \frac{0,09}{0,35} \cdot 100\% = 25,7\%$,

где $A_3 = 0,09$ – первое минимальное отклонение регулируемой величины;

в) динамический коэффициент регулирования R_d :

$$R_d = \frac{A_1 + y(\infty)}{K_{об}} \cdot 100\% = \frac{0,35 + 1}{1,1} \cdot 100\% = 122,7\%,$$

где $K_{об} = 1,1$ – коэффициент передачи объекта;

г) степень затухания переходного процесса: $\psi = 1 - \frac{A_2}{A_1} = 1 - \frac{0,075}{0,35} = 0,78,$

где $A_2 = 0,075$ - второй максимальный выброс регулируемой величины;

д) статическая ошибка: $\varepsilon_{ст} = y(\infty) = 0$;

е) время регулирования: $t_p = 87$ с.

Приложение А

Раздел (1)

Recording of interaction characteristic of liquid droplets during their collisions in gas and vapor-droplet streams

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ7Э	Соломатин Ярослав		

Консультант школы отделения (НОЦ): ИШЭ И.Н. Бутакова

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Шидловский Станислав Викторович	д.т.н.		

Консультант – лингвист отделения иностранных языков:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОИЯ, ШБИП	Даминова Екатерина Сергеевна	к.п.н.		

1 Research studies

1.1 Gas-vapor-droplet technologies

The development of areas of resource efficiency and energy conservation is one of the priorities of the energy strategy until 2030 [1].

One of the most important areas of energy conservation is the reduction of heat losses during the generation, transportation and use of energy. At the same time, in industrial heat energy generating plants, most of the heat losses are due to losses with stack gases (60-70%). Improving fuel efficiency requires the creation of new energy-efficient technologies.

Currently, multicomponent mixtures, in particular, gas-vapor-droplet heat transfer agents, are finding more and more applications in the energy, building industry, and agricultural sectors. Gas-vapor-droplet mixtures can act as a multi-component heat transfer agent in order to increase the efficiency of low- and medium-temperature thermotechnical systems. This reduces heat loss from the stack gases. Also gas-vapor mixtures can be a cheap alternative to vapor as a final product. In this case, they can be used in technological processes in which steam is used, but which at the same time allow the presence of combustion products.

The main difficulty in applying gas-vapor flows is to control the composition and structure of the gas-vapor mixture. In conditions of intensive phase transformations, chemical reaction and turbulent flows, such control is difficult. It is important to develop methods and obtain prognostic estimates of changes in the structure and composition of gas-vapor drops during the collisions of droplets. One of the main problems in creating such flows (especially high-temperature) based on stack gases, steam and water droplets, as well as other liquids, emulsions and suspensions, is difficult to control the drop priming by gases [2]. The actual task is creating a predictive mathematical models to establish the marginal conditions and characteristics of droplets priming in a large group of applications (in particular,

polydisperse extinguishing of fires with the use of sprayed water, mist or corresponding water vapor-droplet curtains; thermal or fire cleaning of liquids in the flow of combustion products or high-temperature air; creation the heat transfer agents based on stack gases, vapors and water droplets; thawing of bulk solids and processing of slagged surfaces heat-laden power equipment; ignition of droplets of liquid and suspension fuels). The high significance of the solution to this problem is due to the fact that the characteristics of entrainment of droplets and their evaporation in a gaseous medium differ significantly under different heat exchange conditions and concentrations [2].

The most typical of the above applications is the mixture of aerosol and gas flows. The task of predicting the characteristics of mixing (in particular, the entrainment of droplets of various sizes with gases) becomes more difficult under the conditions of phase transformations. The latter are especially intensively implemented at high (>1000 K) gas temperatures and small droplet sizes. However, the experimental results of studies of relevant processes at such temperatures are still very small.

The aim of the research is the experimental determination of the main characteristics of the interaction of liquid droplets in an aerosol composition under conditions corresponding to promising resource-efficient fuel technologies, as well as thermal purification, gas-vapor-droplet heat transfer agents.

1.2 Description of the experimental bench

In order to determine the main characteristics of the interaction of droplets of liquids in an aerosol composition, a stand was constructed, as shown in Figure 1.1.

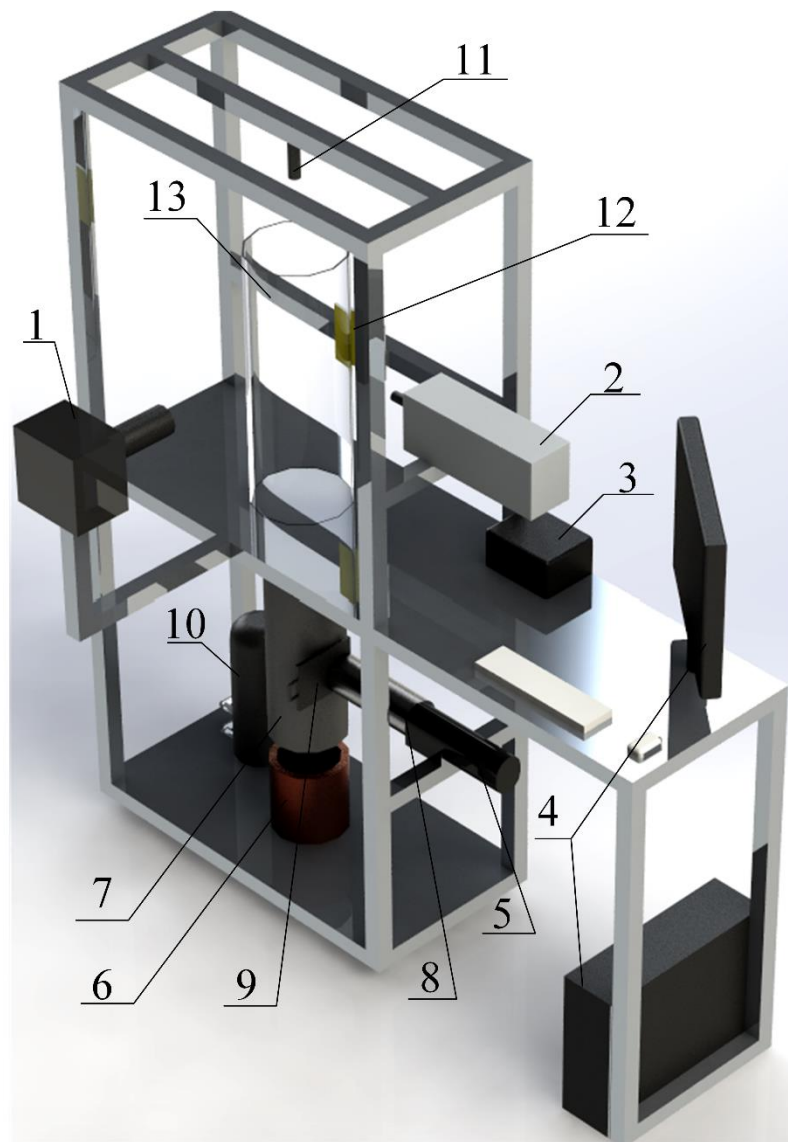


Figure 1.1 – The scheme of the experimental stand:

1 – high-speed video camera; 2 – laser generator; 3 – synchronizer; 4 – personal computer; 5 – air heater; 6 – cylinder made of heat-resistant metal (in which a combustible liquid is placed); 7 – path for supplying combustion products; 8 – supply path of the heated air flow; 9 – gate (necessary for separate supply of combustion products from heated air); 10 – water tank; 11 – injector device; 12 – spotlight; 13 – quartz glass cylinder.

By using this stand, the interaction conditions of droplets were studied. Two compressor-type aerosol generators (injection pressure up to 6 atm, flow rate up to 0.1 l/s) were used, the relative arrangement of which varied (counter-currently,

codirectionally, crosswise) for wider ranges of parameters droplets (sizes 0.1–1 mm, velocities 0.1–10 m / s, angles 0–90 °, relative concentration 0.001–0.002 m³ liquid droplets per 1 m³ gas); two high-speed video cameras were used (resolution 1152 × 864, recording frequency from 3000 to 100000 frames per second) with focusing in one registration area in order to obtain spatial images of colliding drops and increase the number of registered interactions of drops in each experiment; after conducting experiments with aerosol, additional clarifying experiments were performed (necessary in some cases due to the intersection of the trajectories of moving drops in the recording area in the case of aerosols) using capillaries generating successive drops of fixed sizes, shape and speed.

1.3 Description of research methods

In recent years, panoramic optical methods, cross-correlation complexes, high-speed photo and video recording systems have allowed to obtain unique experimental results and expand the understanding of the physics of processes in the large group of gas-liquid systems (films, drops, bubbles, aerosols, two-phase, multiphase and heterogeneous flows) [3–9]. Of particular note are optical contactless methods (in particular, “Particle Image Velocimetry” (PIV) [10–12], “Particle Tracking Velocimetry” (PTV) [13, 14], “Stereo Particle Image Velocimetry” (Stereo PIV) [15 , 16], “Interferometric Particle Imaging” (IPI) [17, 18] and “Shadow Photography” (SP) [19, 20]), which made it possible to obtain new information on the complex processes of mixing gas-vapor drops in the conditions of intensive phase transformations and chemical response.

1.3.1 PIV method

The method of digital tracer visualization (Particle Image Velocimetry or PIV) belongs to the class of contactless methods for measuring velocity in flows. This

method occupies a special place in the study of the structure of currents due to the ability to record instant spatial velocity distributions. This advantage is particularly important when studying streams containing large-scale vortex structures, information about which is partially lost when using single-point diagnostic methods. These currents include most of the shear flows, including jets, traces, and mixing layers. The use of field methods makes it possible to obtain information on the dynamics of structures, their scales, the calculation of differential characteristics, spatial and spatial-temporal correlations, as well as statistical characteristics of the flow. The scheme of the experimental stand using the “PIV” method is shown in Figure 1.2.

The measurement of the instantaneous field of the flow velocity in a given cross section is based on the measurement of the movement of impurity particles in the section plane for a fixed time interval. Small particles (tracer) are added to the flow of liquid or gas. In these experiments, the role of tracers was performed by titanium dioxide nanopowder (80–100 nm). The size, density and volume concentration of titanium dioxide are selected so that the effects associated with the two-phase flow and the buoyancy of the particles are minimal. The measuring area of the flow is the plane “cut out” by the light knife. Particles in the measuring plane of flow must be lit at least twice. Particle images are recorded on a photographic or electronic medium (digital camera). Subsequent image processing allows one to calculate particle displacements between the flashes of the light source and construct a two-component velocity field. The measured two-component values of the vectors are the projections of real (three-dimensional) vectors on a plane perpendicular to the optical axis of the equipment registering the particle images. To measure the three components of speed, as a rule, two recording modules are used, whose optical axes are oriented at a certain angle relative to each other.

When using Fourier transforms is the maximum of the correlation function, which determines the movement of tracers. Using the scale factor (determined at the

initial stage of the experiments at the time of the calibration of the optical system) and the known time delay, the velocity is recalculated in m/s.

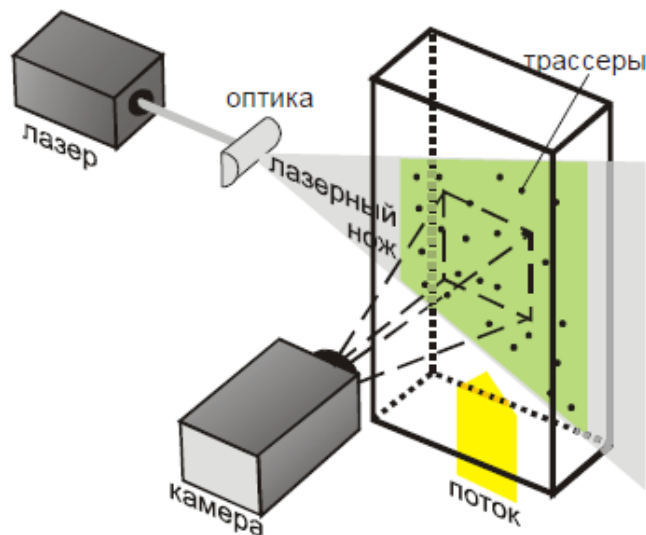


Figure 1.2 – The scheme of the experimental stand

A solid-state pulsed Nd:YAG laser is used as a radiation source. The pulse duration in such a laser is 4-10 nanoseconds. Among the advantages of this method are its non-contact, the ability to measure instantaneous velocity distributions and a wide range of measured velocities from zero to supersonic [21].

The PIV method was used to measure the speed of movement of water drops U_d and the air flow U_g . Air flow rates in the recording area were determined before injection of the sprayed liquid. Tracing particles were injected into the air stream at the bottom of the recording area.

1.3.2 PTV method

The Particle Tracking Velocimetry method was used to register the trajectory and speed of movement of each particular drop. This method is a development of PIV and is designed to calculate instant two-component velocity fields of tracing

particles in a gas or liquid flow. In contrast to the PIV method in PTV, the velocity vector is measured by the movements of individual tracers in the stream. The measured vector field has a resolution greater than in the PIV method, and the vector grid is irregular - with nodes at the points of position of the tracers. Using the PTV method, it is possible to provide reliable control of the speed and trajectories of movement of various marked elements of multiphase and multicomponent media, and to fix the speeds and trajectories of movement of liquid fragments during collisions of droplets.

1.3.3 SP method

The method of shadow photography allows you to determine the size of various spherical objects on monochrome images. When using the “SP” method, a high-frequency filtering procedure is applied to the original image, which allows you to select the boundaries of the images of the registered objects.

After high-frequency filtering, a binarization procedure is applied. Binarization allows you to cut off background noise and prepares the image for the next stage.

At the last stage of processing, a search for singly-connected regions is performed on the binarized field. As a result, the positions of objects and their radii are determined. If some identified objects are inside others or are non-circular, then the data is validated.

Among the advantages of the method are the following:

- 1) contactless;
- 2) the ability to measure particle velocity when combined with the “PTV” method;
- 3) measurement the speed and particle size of a single camera;
- 4) the system can be supplemented with a “PIV” system, which will allow measuring the velocity of the carrier phase;

5) identification algorithms do not require large computational resources and are easy to learn.

This method allows to determine the parameters of bubble and aerosol flows and flows with solid particles of a spherical shape and to study the processes of interaction of phases in multiphase flows [22].

1.3.4 Processing technique, recorded and calculated parameters

Cross-correlation complex based on Actual Flow software was used to process videograms with approaching drops through the use of a group of specialized optical methods.

The Tema Automotive and FastCam software was used to process the obtained videograms, which provided for the analysis of position coordinates, droplet shapes, their velocities, accelerations, angles, distances traveled and other parameters when they change over a wide range of values with high time discretization.

In accordance with the potential applications of the results of experimental studies of the processes of liquid droplet collisions in a gaseous medium, a list of the most significant factors, effects and processes that can significantly change not only the characteristics of the droplet collision itself, but also the mode, as well as the consequences, has been compiled. Below are listed these factors and effects, as well as the ranges of variation of the relevant parameters to account for the influence of the latter, with a focus on applications:

- 1) ratio of the sizes of droplets R_s and R_l . In typical aerosol technology, the characteristic droplet sizes can vary several times within the main range from 0.1 to 5 mm. As a result, it is advisable to vary the values of the ratio R_s and R_l from 0 to 1;
- 2) relative speed of the droplets before the collision U_{rel} . The most typical are collisions of droplets in an aerosol when moving in the same plane. In such

conditions, the motion vectors of droplets, as a rule, are co-directed or oppositely directed;

- 3) Weber number We , characterizing the ratio of inertial forces to surface tension forces. This parameter is often used to describe the effect of movement speeds and droplet sizes on the interaction parameters of the latter. In accordance with the experimental data of the last 50 years cited in reviews [23–25], we can distinguish the most typical range of variation We — from 0 to 200. Four basic modes of interaction are realized in this range: bounce, separation, coagulation, disruption;
- 4) angle of attack or interaction α_d . The angular impact parameter is calculated as the cosine of the angle of interaction. The variation of the angle between the paths of movement of the drops was carried out in the range from 0 to 90 °;
- 5) concentration of droplets in the composition of the aerosol γ_d . This parameter significantly affects the frequency of droplet collisions. Of interest is how they affect the mode of interaction of droplets and the characteristic consequences. The range of variation can be large enough to characterize all possible spray modes;
- 6) temperature range in the zone of collision of droplets, which depends on both the temperature of the gas medium (T_a) and liquid droplets (T_d). The most typical ranges of variation of these parameters in accordance with typical gas-vapor-droplet applications are: for T_a up to 1000 ° C, for T_d up to 100 ° C;
- 7) turbulent, transitional or laminar regime of aerosol movement. When typical spray and irrigation systems operate, different modes of movement of the aerosol as a whole and individual drops, as elements of the latter, can be provided. As a consequence, the Reynolds numbers for droplet aerosols can vary from a few dozen to several thousand. It is important for such a wide range to vary the characteristic values of Re ;
- 8) dimensionless parameters of interaction of droplets. Two types of interaction parameters are traditionally used: linear (B) and angular (β). The angular parameter was calculated using the formula $\beta = \cos(\alpha_d)$, and linear, taking into

account the distance between the centers of mass, $B=b/(R_{d1} + R_{d2})$. Typical range of variation of these parameters [23]: 0–1;

- 9) non-uniform droplet composition. For such cases, maps of interaction parameters are constructed using the Ohnesorge, Laplace, Reynolds, and capillarity numbers [24, 25]. The characteristic ranges of variation of Oh, La, Ca, Re on such maps may differ, but on the whole, traditionally they are compared with known data for water. In this case, one can estimate the effect of viscosity, surface tension, density, and other properties of the liquid on the transformation characteristics of the droplets. An analysis of the data [23–25] allows us to conclude that quite a lot of data was obtained for droplets of homogeneous liquids, solutions, and emulsion compositions. As a consequence, suspension formulations for study are attracting attention;
- 10) ratio of the initial surface area of the interacting droplets and their role: target, projectile. Very often, the results of processing experimental data on the study of the interaction of liquid droplets are summarized without focusing on the role of a drop. Experiments [26, 27] have shown that projectiles and targets can have not only different sizes and speeds before an impact, but also shapes. This factor should be taken into account when compiling data and especially on the effects of droplet collisions, in particular, the average number of new drops N and the surface area ratio S_1/S_0 .

During the experiments, the sizes of the generated droplets, their velocities, collision angles, concentration in the gas flow, and gas velocity were controlled. The registration scheme of collision parameters is shown in Figure 1.3.

The measured parameters were calculated: Weber numbers, Ohnesorge, Reynolds, capillarity, as well as dimensionless interaction parameters, reflecting the influence of the angle of attack (α_d) and the distance between the centers of mass of the drops (b).

Weber number:

$$We=2 \cdot \rho \cdot R_d \cdot U_{rel}^2 / \sigma. \quad (1.1)$$

Ohnesorge number:

$$Oh = \mu / (\rho \cdot \sigma \cdot 2 \cdot R_d \cdot 10^{-3})^{0.5}. \quad (1.2)$$

Reynolds number:

$$Re_2 = (\rho \cdot 2 R_d \cdot 10^{-3} \cdot U_{rel}) / \mu. \quad (1.3)$$

Capillarity number:

$$Ca = \mu \cdot U_{rel} / \sigma \quad (1.4)$$

According to the obtained parameters, maps of the regimes (bounce, separation, disruption, and coagulation) were constructed in the coordinate system $B(We)$, $\beta(We)$, $We(Oh)$, $Re(Oh)$, $We(Ca)$.

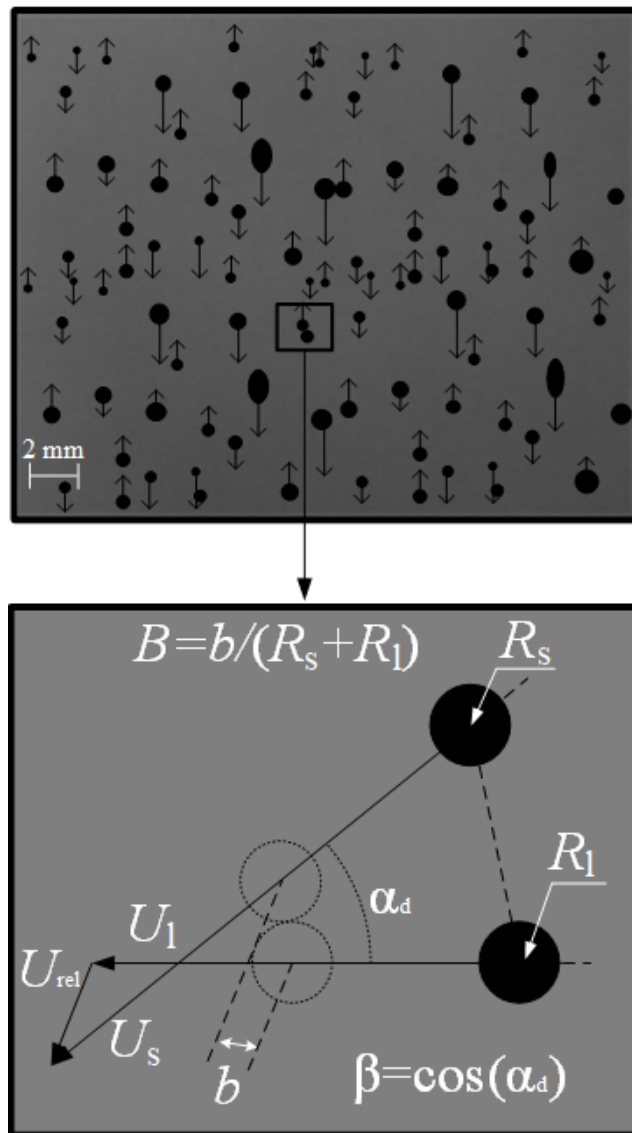


Figure1.3 – Registration scheme of interaction parameters

Systematic errors in determining the size of R_d and the speeds of U_g and U_d using panoramic optical methods, as well as the corresponding video recording stand, did not exceed 1.6 and 2.1%. The maximum random errors in determining the considered parameters were: $R_d - 2.1\%$, U_g and $U_d - 3.4\%$. The systematic error in α_d registration did not exceed 2.3%.

During the analyzing frames of videograms, probabilities were calculated (as the number of collisions with corresponding consequences with identical parameters to the total number of collisions): P_1 – coagulation, P_2 – separation, P_3 – disruption, P_4 – bounce. In sum, the probabilities P_1, P_2, P_3, P_4 were 1, since all registered collisions were taken into account (statistical analysis was performed when processing at least 100 droplet interactions under identical experimental conditions). For sampling frames with droplets approaching, a specialized algorithm was developed in the Mathematica software package. With its use, a sample of 500–1000 frames (from the initial 3000–5000 frames) was provided under identical experimental conditions to provide reliable collision statistics.

1.4 Research results

Three key factors can have the most large-scale and expected impact on the modes and consequences of the collisions of liquid droplets: size, speed, angle of attack. The first two are traditionally analyzed in the form of a general criterion – the Weber number. Figures 3 and 4 show curves illustrating the effect of these factors on the likelihood of each of the four interaction modes. When summarizing the results of the experiments, it became obvious that the role of the size and speed of movement of the droplets should be analyzed using appropriate ratios and differences, as shown in Figures 1.4 and 1.5. In addition to the three factors noted, the effects of changes in the shape of the surface of the droplet due to continuous transformation and the role of the droplets, in particular, the target and the projectile, have a significant effect. Using Figures 1.4 and 1.5, the differences between the

probabilities P_1 , P_2 , P_3 and P_4 are shown for the size and speed ratios of both less than 1 (the values of the corresponding parameters for the projectile are lower than for the target) and greater than 1 (the opposite is true). The greatest value of the experiments performed are the numerical results of studies on the dominance of certain effects of the interaction of droplets in the aerosol composition. If necessary, taking into account the established relative interaction probabilities (P_1 , P_2 , P_3 , P_4) from Figures 1.4, 1.5, it is possible to obtain parameter areas to ensure stable coagulation, rebound, expansion and crushing of droplets of different shapes and with different roles (target, projectile).

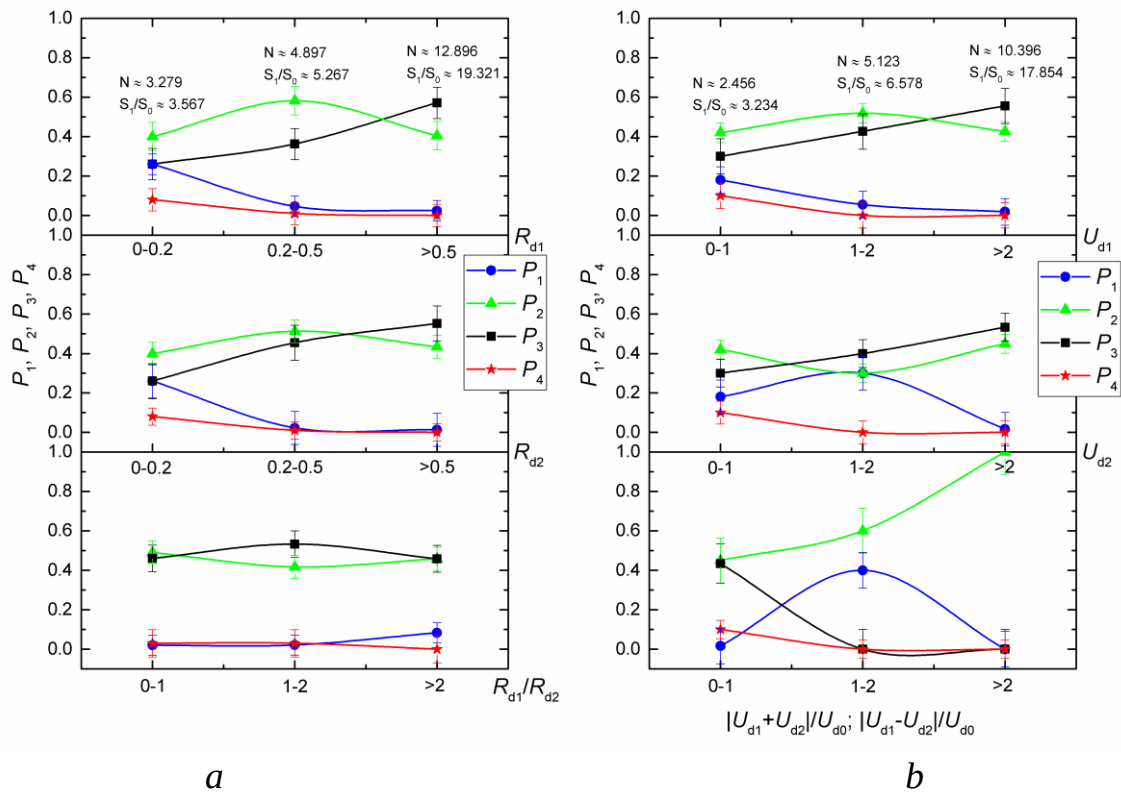


Figure 1.4 – Probabilities of realization of each of the four modes of interaction of droplets (P_1 – coagulation, P_2 – separation, P_3 – disruption, P_4 – bounce) when changing the ratio of their sizes (a) and relative speed before the impact (b)

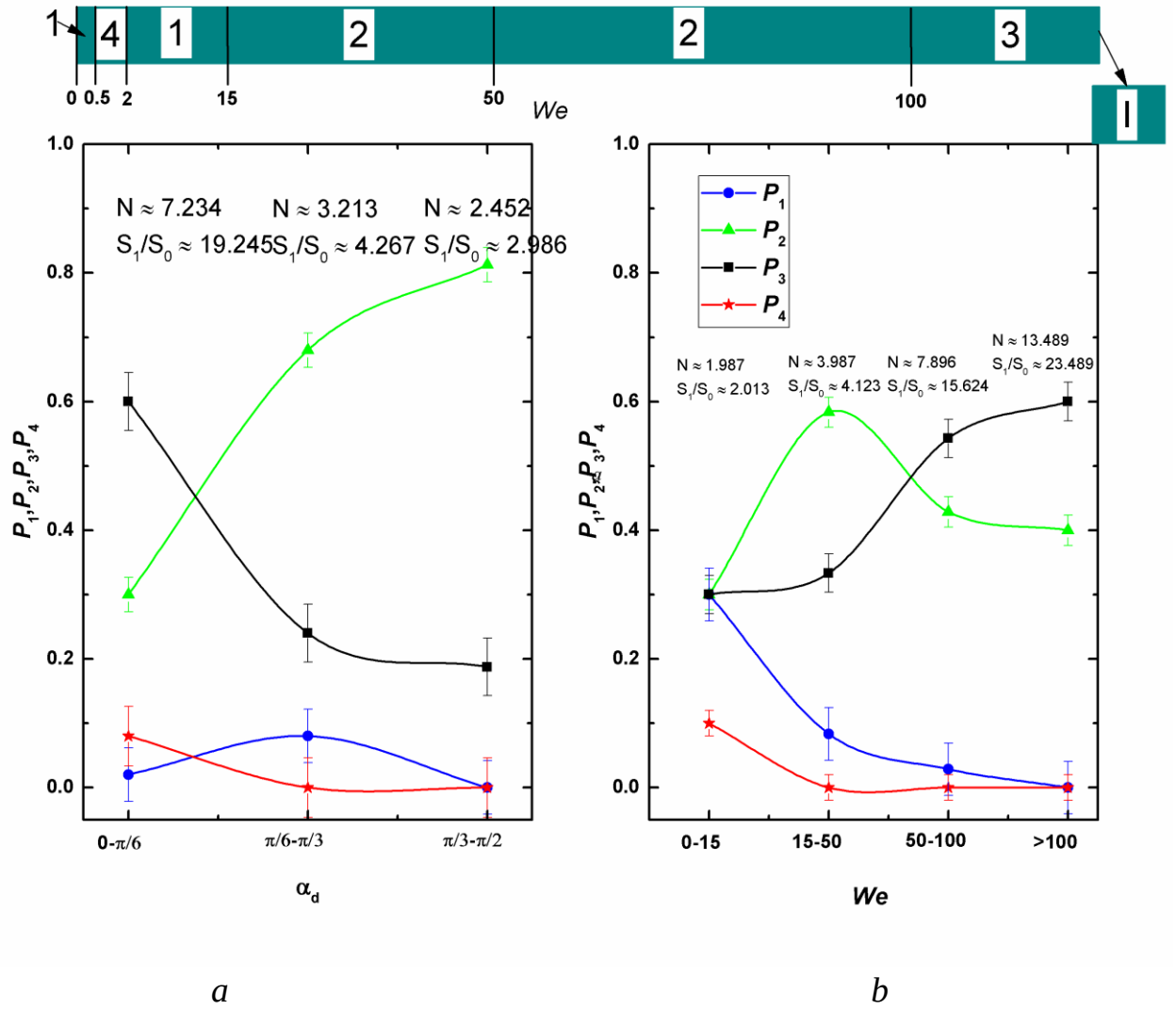


Figure 1.5 – Probabilities (P) for realizing each of the four interaction modes of droplets (P_1 – coagulation, P_2 – separation, P_3 – disruption, P_4 – bounce) when the angle of attack (between flight paths) (a) and Weber number (b) change.

Figures 1.6 – 1.8 show the results of studying the contribution of the previously poorly studied effects and factors, in particular, the relative concentration of droplets in the aerosol, the temperature in the region of droplet collisions, and the turbulence of the droplet stream. In general, the generalization can be noted that each of these factors changes the structure of the aerosol and intensifies the collisions of drops. In particular, it is clearly seen in Figure 1.6 that the number of collisions of droplets increases significantly with increasing relative concentration of the latter in the aerosol, but the probability of crushing the droplets, as you might expect, is

clearly not dominant (the trends are more complex due to the strong binding to the relative speed of interaction of droplets, as well as the relationship of their size). An increase in the concentration of droplets intensifies all modes of interaction, especially coagulation and disruption, as shown in Figure 1.6. Only at high values of We , the concentrations of crushing and scattering significantly predominate over bounce and coagulation. Using Figure 1.6, it is possible to predict the conditions under which the flow is rebuilt substantially in the disruption and coagulation mode and weakly in the separation and bounce mode.

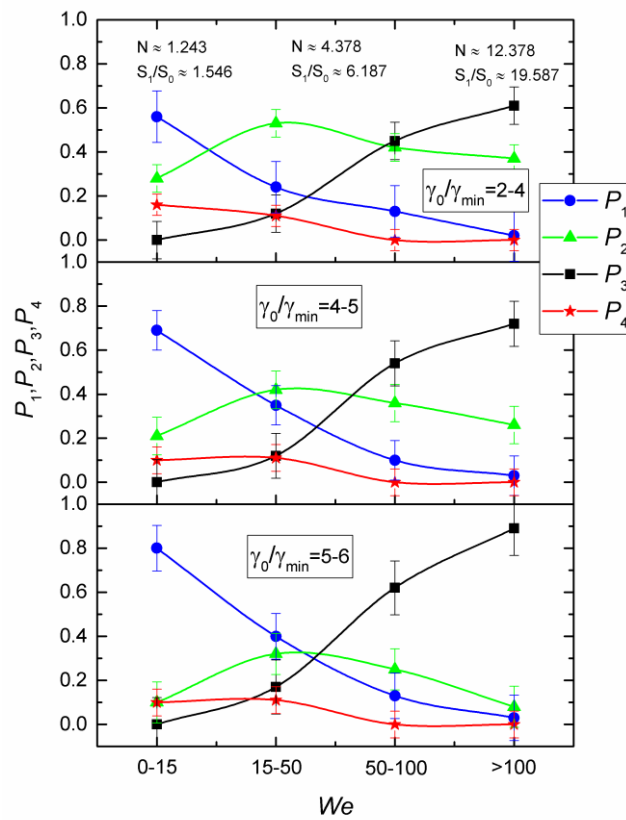


Figure 1.6 – The probabilities (P) of the realization of each of the four modes of interaction of droplets (P_1 – coagulation, P_2 – separation, P_3 – disruption, P_4 – bounce) when the relative concentration of droplets changes. $\gamma_0 = 10^{-4}$ is the scale of the relative concentration (m^3 of liquid droplets in $1 m^3$ of gas) before the interaction of the droplets.

If we detail the influence of the temperature factor in the area of droplet collision, which can vary both due to the different initial temperature of the droplets and due to the different temperature of the gas medium, then it can be noted that under conditions of heating the gas-droplet medium, the number of collisions in the coagulation mode and especially bounce increases and significantly reduces the number of interactions with separation and disruption of droplets. These trends are especially noticeable in the range of medium and small We values in Figure 1.7. This effect is due to the fact that the intensification of the heating of droplets in a gaseous medium promotes an increase in the vapor concentration. This leads to an increase in the pressure of the vapor-gas mixture acting on each of the droplets. Since the vector of injection of vapor from the surface of a drop is always opposite to the direction of its movement, this effect slows down the movement of the drops. As a result, kinetic energy is reduced. Only at high initial speeds of movement of drops, the factor of formation of a buffer vapor layer around liquid fragments cannot have a significant effect, since the linear rates of outflow of vapor, even under conditions of intensive vaporization, cannot exceed several tenths of a meter per second.

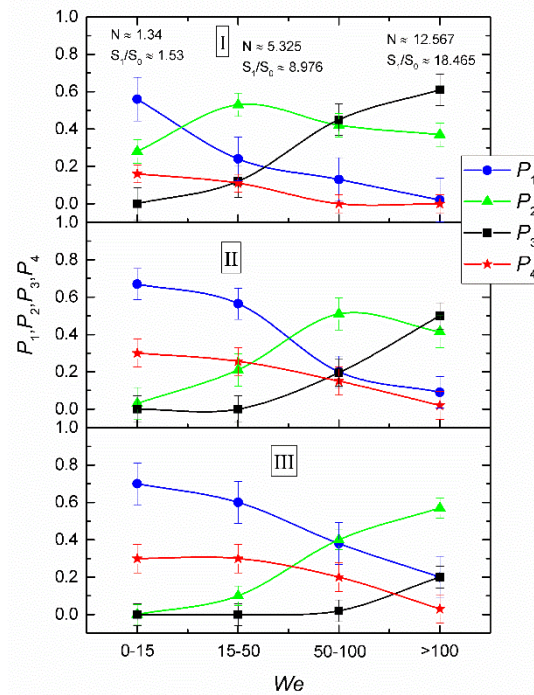


Figure 1.7 – The probabilities (P) of the realization of each of the four interaction modes of droplets (P_1 – coagulation, P_2 – separation, P_3 – disruption, P_4 – bounce) with a change in the temperature of the gas-vapor medium in the area of collisions: I – 20 °C; II – 200 °C; III – 500 °C.

Turbulization of the gas-vapor droplet flow leads to a significant violation of the trends in the probabilities P_1 , P_2 , P_3 , P_4 , as functions of We (Figure 1.8). In particular, at small values of the Reynolds number of gases (up to 1100), the expected trends of an increase in the probabilities of disruption and separation, a decrease in coagulation and bounce with an increase in We were recorded. At medium (2400) and high (2800) values of the Reynolds number of gases in Figure 1.8, a violation of the monotony of the change in the separation and disruption probabilities is seen, and for coagulation and bounce, the trends remain. This is most likely due to the fact that the turbulization of the gas-vapor droplet flow leads to a significant change not so much as the linear velocity of motion of the droplets, but with the velocities of the rotational motion. As a result, droplets interact during rotation more often in the disruption mode, especially with increasing speed of movement (Figure 1.8). Thus, even under conditions of strong turbulence, it is possible to ensure a stable structure of the gas-vapor-droplet stream (since the separation does not lead to an increase in the number of drops and a change in the size of the original ones).

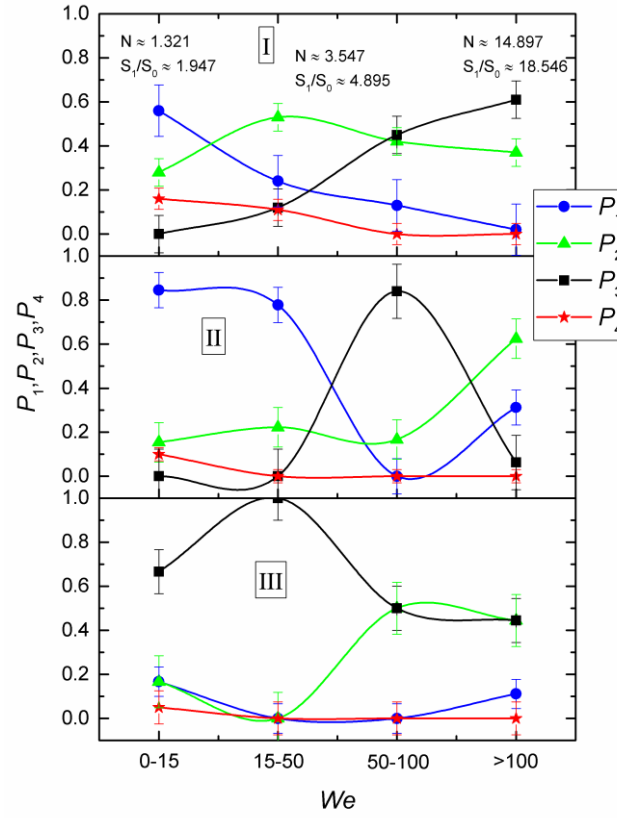


Figure 1.8 – The probabilities (P) of the realization of each of the four interaction modes of droplets (P_1 – coagulation, P_2 – separation, P_3 – disruption, P_4 – bounce) when the degree of turbulence of the aerosol stream changes: I – $Re \approx 1100$; II – $Re \approx 2400$; III – $Re \approx 2800$.