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

Школа Инженерная школа энергетики
Направление подготовки 13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника
Отделение (НОЦ) НОЦ И.Н. Бутакова

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Автоматическая система управления процессом сжигания эмульгированного топлива

УДК 681.51:662.61.063.61

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Б5В	Федоренко Роман Михайлович		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент, ИШФВП	Волков Роман Сергеевич	к.т.н		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент, ОСГН	Конотопский Владимир Юрьевич	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент, ООД, ШБИП	Сотникова Анна Александровна			

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор, ИШФВП	Стрижак Павел Александрович	д.ф.-м.н., профессор		

Томск – 2019 г.

Запланированные результаты обучения выпускника образовательной программы бакалавриата по направлению 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»

Код резуль-тата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
	Универсальные компетенции	
Р1	Осуществлять коммуникации в профессиональной среде и в обществе в целом, в том числе *на иностранном языке*, разрабатывать документацию, презентовать и защищать результаты *комплексной* инженерной деятельности.	Требования ФГОС (ОК-2, 12; ПК-7),, Критерий 5 АИОР (п. 2.11), согласованный с требованиями международных стандартов *EUR-ACE* и *FEANI*
Р2	Эффективно работать индивидуально и в коллективе, в том числе междисциплинарном, с делением ответственности и полномочий при решении *комплексных* инженерных задач.	Требования ФГОС (ОК-3, 7), Критерий 5 АИОР (п. 2.9), согласованный с требованиями международных стандартов *EUR-ACE* и *FEANI*
Р3	Демонстрировать *личную* ответственность, приверженность и следовать профессиональной этике и нормам ведения *комплексной* инженерной деятельности с соблюдением правовых, социальных, экологических и культурных аспектов.	Требования ФГОС (ОК-8, 9; ПК-4), Критерий 5 АИОР (пп. 2.12, 2.13), согласованный с требованиями международных стандартов *EUR-ACE* и *FEANI*
Р4	Анализировать экономические проблемы и общественные процессы, участвовать в общественной жизни с учетом принятых в обществе моральных и правовых норм.	Требования ФГОС (ОК-5, 8, 10, 14), Критерий 5 АИОР (п. 2.10), согласованный с требованиями международных стандартов *EUR-ACE* и *FEANI*
Р5	К достижению должного уровня экологической безопасности, энерго- и ресурсосбережения на производстве, безопасности жизнедеятельности и физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности.	Требования ФГОС (ОК-16; ПК-5, 12, 17), Критерий 5 АИОР (п. 2.12), согласованный с требованиями международных стандартов *EUR-ACE* и *FEANI*
Р6	Осознавать необходимость и демонстрировать *способность к самостоятельному обучению в течение всей жизни,* непрерывному самосовершенствованию в инженерной профессии, организации обучения и тренинга производственного персонала.	Требования ФГОС (ПК-23), Критерий 5 АИОР ((2.14), согласованный с требованиями международных стандартов *EUR-ACE* и *FEANI*
	Профессиональные компетенции	
Р7	Применять *базовые* математические, естественнонаучные, социально-экономические знания в профессиональной деятельности *в широком* (в том числе междисциплинарном) контексте в *комплексной* инженерной деятельности в производстве тепловой и электрической энергии.	Требования ФГОС (ПК-2, 3), Критерии 5 АИОР (пп.2.1-2.3), согласованные с требованиями международных стандартов *EUR-ACE* и *FEANI*

Р8	Анализировать научно-техническую информацию, ставить, решать и публиковать результаты решения задач *комплексного* инженерного анализа с использованием *базовых и специальных* знаний, нормативной документации, современных аналитических методов, методов математического анализа и моделирования теоретического и экспериментального исследования.	Требования ФГОС (ОК-1; ПК-2, 6, 7, 8), Критерий 5 АИОР (п. 2.4), согласованный с требованиями международных стандартов *EUR-ACE* и *FEANI*
Р9	Проводить предварительное технико-экономическое обоснование проектных разработок объектов производства тепловой и электрической энергии, выполнять *комплексные* инженерные проекты с применением *базовых и специальных* знаний, *современных* методов проектирования для достижения *оптимальных* результатов, соответствующих техническому заданию *с учетом* нормативных документов, экономических, экологических, социальных и других ограничений.	Требования ФГОС (ПК-9, 10, 11), Критерий 5 АИОР (п. 1.3), согласованный с требованиями международных стандартов *EUR-ACE* и *FEANI*
Р10	Проводить *комплексные* научные исследования в области производства тепловой и электрической энергии, включая поиск необходимой информации, эксперимент, анализ и интерпретацию данных, и их подготовку для составления обзоров, отчетов и научных публикаций с применением *базовых и специальных* знаний и *современных* методов.	Требования ФГОС (ПК-18, 19), Критерий 5 АИОР (п. 1.4), согласованный с требованиями международных стандартов *EUR-ACE* и *FEANI*
Р11	Использовать информационные технологии, использовать компьютер как средство работы с информацией и создания новой информации, осознавать опасности и угрозы в развитии современного информационного общества, соблюдать основные требования информационной безопасности.	Требования ФГОС (ОК-11, 15; ПК-1), Критерий 5 АИОР (п. 1.1), согласованный с требованиями международных стандартов *EUR-ACE* и *FEANI*
Р12	Выбирать и использовать необходимое оборудование для производства тепловой и электрической энергии, управлять технологическими объектами на основе АСУТП; использовать инструменты и технологии для ведения комплексной практической инженерной деятельности с учетом экономических, экологических, социальных и других ограничений.	Требования ФГОС (ПК-12, 25, 30), Критерий 5 АИОР (п. 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов *EUR-ACE* и *FEANI*

	Специальные профессиональные	
Р13	Участвовать в выполнении работ по стандартизации и подготовке к сертификации технических средств, систем, процессов, оборудования и материалов теплоэнергетического производства, контролировать организацию метрологического обеспечения технологических процессов теплоэнергетического производства, составлять документацию по менеджменту качества технологических процессов на производственных участках.	Требования ФГОС (ПК-15, 16, 20), Критерий 5 АИОР (п. 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов *EUR-ACE* и *FEANI*
Р14	Организовывать рабочие места, управлять малыми коллективами исполнителей, к разработке оперативных планов работы первичных производственных подразделений, планированию работы персонала и фондов оплаты труда, организовывать обучение и тренинг производственного персонала, анализировать затраты и оценивать результаты деятельности первичных производственных подразделений, контролировать соблюдение технологической дисциплины.	Требования ФГОС (ПК-12-14, 17, 21-24), Критерий 5 АИОР (п. 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов *EUR-ACE* и *FEANI*
Р15	Использовать методики испытаний, наладки и ремонта технологического оборудования теплоэнергетического производства в соответствии с профилем работы, планировать и участвовать в проведении плановых испытаний и ремонтов технологического оборудования, монтажных, наладочных и пусковых работ, в том числе, при освоении нового оборудования и (или) технологических процессов.	Требования ФГОС (ПК-25, 26), Критерий 5 АИОР (п. 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов *EUR-ACE* и *FEANI*
Р16	Организовывать работу персонала по обслуживанию технологического оборудования теплоэнергетического производства, контролировать техническое состояние и оценивать остаточный ресурс оборудования, организовывать профилактические осмотры и текущие ремонты, составлять заявки на оборудование, запасные части, готовить техническую документацию на ремонт, проводить работы по приемке и освоению вводимого оборудования.	Требования ФГОС (ПК-27-30), Критерий 5 АИОР (п. 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов *EUR-ACE* и *FEANI*

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

Школа Инженерная школа энергетики
Направление подготовки 13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника
Отделение (НОЦ) НОЦ И.Н. Бутакова

УТВЕРЖДАЮ:
Руководитель профиля
Стрижак П.А.

_____ _____
(Подпись) (Дата)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Бакалаврской работы

Студенту:

Группа	**ФИО**
5Б5В	Федоренко Роману Михайловичу

Тема работы:

Автоматическая система управления процессом сжигания эмульгированного топлива	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	06.05.2019 № 3503/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:	

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Процессы взрывного дробления и измельчения капель многокомпонентных топлив позволяют снизить затраты энергии на этапах прогрева, испарения и зажигания, способствуют повышению полноты выгорания топлива, а также снижению антропогенных выбросов. Целью выпускной квалификационной работы является проектирование автоматической системы управления процессом сжигания эмульгированного топлива. При разработке данной системы предусмотрено использование современных микропроцессорных средств автоматизации для управления процессом горения топлива.

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	1 Научно-исследовательская работа 2 Проектирование САУ процесса сжигания эмульгированного топлива 3 Разработка щита управления. 4 Расчет параметров настройки регулятора. 5 Разработка мнемосхемы проекта. 6 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение. 7 Социальная ответственность.
Перечень графического материала	1 Схемы структурная. 2 Схема функциональная. 3 Электрическая схема соединений щита управления. 4 Схема монтажная. 5 Общий вид щита управления.

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы

Раздел	**Консультант**
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Конотопский Владимир Юрьевич
Социальная ответственность	Сотникова Анна Александровна

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	

Задание выдал руководитель:

Должность	**ФИО**	**Ученая степень, звание**	**Подпись**	**Дата**
Доцент, ИШФВП	Волков Роман Сергеевич	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	**ФИО**	**Подпись**	**Дата**
5Б5В	Федоренко Роман Михайлович		

Реферат

Выпускная квалификационная работа содержит 100 с., 18 рис., 18 табл., 68 источников.

Ключевые слова: горение, эмульгированное топливо, микро-взрыв, вторичное распыление, автоматическая система управления, микропроцессорные технические средства автоматизации.

Объектом автоматизации является процесс сжигания эмульгированного топлива, в энергетической установке.

Цель работы – разработка автоматической системы управления процессом сжигания эмульгированного топлива на основе микропроцессорных средств автоматизации.

В процессе выполнения работы проводились экспериментальные исследования, анализ объекта автоматизации, составление структурной схемы автоматической системы управления процессом сжигания эмульгированного топлива, проектирование функциональной схемы, принципиальной электрической и монтажной схем, а также разработка чертежа общего вида щита автоматизации, выбор приборов и технических средств автоматизации с последующим составлением заказной спецификации, разработка мнемосхемы проекта.

В результате исследования разработана автоматическая система управления процессом сжигания эмульгированного топлива на основе современных микропроцессорных средств автоматизации.

Основным преимуществом разработанной системы является наличие программно-оперативного комплекса на базе SCADA-системы, который повышает качество регулирования и быстродействия системы, а также позволяет вовремя отреагировать на любую сложную ситуацию в процессе эксплуатации системы.

Оглавление

Введение 11
1. Научно-исследовательская работа 17
1.1 Объекты и методы исследования 17
1.2 Результаты и обсуждения 21
1.3 Основные комментарии и заключения 31
2. Разработка САУ процессом сжигания эмульгированного топлива 32
2.1 Выбор структуры автоматической системы управления 35
2.2 Разработка функциональной схемы 35
2.3 Выбор технических средств автоматизации 37
2.3.1 Выбор датчиков температуры 38
2.3.2 Выбор датчиков расхода 39
2.3.3 Выбор газоанализатора 43
2.3.4 Выбор регулирующего устройства 43
2.3.5 Выбор исполнительного механизма 48
2.3.6 Выбор блока управления исполнительным механизмом 49
3. Разработка щита управления системы автоматического управления 50
3.1 Разработка электрической схемы соединений щита управления 50
3.2 Разработка монтажной схемы системы автоматического управления 51
3.3 Разработка общего вида щита управления 55
4. Расчет параметров настройки регулятора 56
4.1 Идентификация объекта управления 56
4.2 Расчет параметров настройки регулятора 59
5. Разработка мнемосхемы проекта 66
6. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение 70
6.1 Планирование работ и оценка времени выполнения 70
6.2 Расчет сметы затрат на выполнение проекта 75
6.2.1 Расчет материальных затрат 75
6.2.2 Расчет затрат на заработную плату 75
6.2.3 Расчет затрат на социальный налог 76

6.2.4 Расчет затрат электроэнергию 76
6.2.5 Расчет амортизационных расходов 78
6.2.6 Расчет прочих расходов 78
6.2.7 Расчет общей себестоимости разработки 79
6.2.8 Расчет прибыли 79
6.2.9 Расчет НДС 79
6.3 Определение экономической эффективности проекта 80
7. Социальная ответственность 82
7.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности 82
7.1.1 Специальные правовые нормы трудового законодательства 82
7.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны 84
7.2 Производственная безопасность 84
7.2.1 Анализ вредных и опасных факторов 84
7.2.2 Обоснование мероприятий по снижению уровней воздействия опасных и вредных факторов 88
7.3 Экологическая безопасность 89
7.3.1 Анализ влияния объекта исследования на окружающую среду 89
7.3.2 Анализ влияния процесса исследования на окружающую среду 89
7.3.3 Обоснование мероприятий по защите окружающей среды 89
7.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях 90
7.4.1 Анализ вероятных ЧС 90
7.4.2 Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС 91
7.5 Заключение по разделу социальная ответственность 92
Заключение 93
Список использованных источников 94

Графический материал: на отдельных листах
ФЮРА.421000.020 С1 Схема структурная
ФЮРА.421000.020 С2 Схема функциональная

ФЮРА.421000.020 ЗС	Заказная спецификация
ФЮРА.421000.020 Э3	Схема принципиальная электрическая
ФЮРА.421000.020 С4	Схема монтажная
ФЮРА.421000.020 ВО	Общий вид щита управления

Введение

Традиционно исследователи топливных технологий сосредотачивают внимание на решении ограниченной, но в то же время наиболее значимой группы проблем [1]. В частности, активно проводятся исследования [1] для создания технологий, способствующих минимизации расхода топлива, повышению динамики процесса горения, снижению антропогенных выбросов при сжигании топлива, повышению полноты его выгорания, улучшению качества и в тоже время удешевлению процесса подготовки и распыления топлива.

Для повышения эффективности топливных технологий рациональным способом решения указанной проблемы может стать дробление капель топлив до характерных размеров уровня десятков и сотен микрон. Но как показали эксперименты [2–4], такие мелкие капли могут быть унесены из камеры сгорания при малых скоростях движения (вследствие высоких скоростей движения разогретых дымовых газов или встречного воздушного потока) или налипнуть на стенки. Поэтому дробление капель заранее (т.е. перед подачей в нагревательные камеры) может приводить к дополнительным технологическим сложностям и ограничениям. В таком случае целесообразно дробление капель в камерах сгорания в процессе нагрева. В этом направлении предпринимаются попытки разработки соответствующих технологий коллегами со всего мира. Наиболее привлекательным, с точки зрения стабильности реализации, требуемых расходов энергии и времени, представляется достижение условий взрывного вскипания капель и их распада (интенсивного дробления) с образованием топливного аэрозоля. В основном пока можно выделить лишь экспериментальные исследования (например, [5–12]) условий и характеристик взрывного вскипания капель жидкостей, эмульсий, растворов и суспензий, их последующего распада с образованием аэрозоля.

Одними из первых на разбрызгивание и взрывной распад вскипающих капель топлив обратили внимание исследователи из Японии [5–7]. Ими

показано, что определяющую роль могут играть межмолекулярные взаимодействия, а также количество и концентрации формирующихся пузырьков паров в каплях. В [5–7] установлено, что для вскипания и разрушения насыщенных газами CO_2 капель водных эмульсий требуется меньший перегрев и меньшее время нагрева. Это связано с тем, что растворенные газы CO_2 снижают количество энергии, требуемое для образования пузырей. Эти результаты позволяют объяснить причины более интенсивного прогрева и вскипания капель водных эмульсий. В [5–7] взрывной распад капель эмульсий реализовывался при высокой концентрации нефтепродукта и высоких значениях температуры. Именно в таких условиях роль CO_2, растворенного в капле, значительна в соответствии с заключениями [5–7]. Поэтому процессы вскипания и дробления капель водных эмульсий реализовывались за малые интервалы времени нагрева и завершались формированием большого аэрозольного облака с характерным запахом CO_2.

Также широкую известность получили статьи с результатами исследований процессов сжигания топливных аэрозолей в камерах сгорания двигателей и котлов (например, группа исследователей [8, 9]). Процессы дробления топливных струй и пленок в авиационных и автомобильных двигателях потоком окислителя исследованы в [10]. Акцент на эффектах самопроизвольного дробления неоднородных топливных капель сделан в [11, 12]. Однако исследованы лишь водные эмульсии, и методика исследования включала лишь использование инфракрасной съемки. На основании анализа данных [8–12] моно выделить существенное изменение площади поверхности испарения с учетом образующихся фрагментов, уменьшение суммарной длительности фазового перехода.

На процессы прогрева, испарения и зажигания капель многокомпонентных топлив может оказывать влияние ряд факторов [13–21]. В частности, в работах [13–15] экспериментально установлено, что на характеристики испарения, дробления и зажигания капель различных смесей

жидкостей при нагревании значительно влияет концентрация компонентов смеси, температура и скорость потока греющих газов. Также было установлено, что взрывное измельчение позволяет повысить скорость горения и снизить образование копоти, за счет увеличения интенсивности смешивания топлива с окружающими окисляющими газами. Процессы микро-взрывного распада являются одними из самых эффективных в области так называемого вторичного измельчения, т.е. уже после первичного распыления с применением форсуночных устройств. Результаты [13–15] показывают, что в результате взрывного дробления возможно в несколько раз уменьшить размеры капель топлив в разных частях камер сгорания. Такая схема считается удобной, так как можно проектировать ступенчатое измельчение капель топлив и оптимизировать процессы их выгорания.

Ещё одним способом интенсификации дробления и зажигания капель многокомпонентных топлив является добавление металлических частиц к топливу. В частности в [16, 17] экспериментально установлено, что введение металлических наночастиц в различные топлива или их смеси интенсифицирует процесс испарения, а также способствует возникновению микро-взрыва, благодаря которому значительно снижаются времена распада капель, а также повышается скорость их горения. Ещё одним способом улучшения эффектов микро-взрыва является увеличение давления греющей среды. В [18] экспериментально представлено, что повышение давления интенсифицирует возникновение микро-взрыва как для перемешанных многокомпонентных капель топлив, так и для капель эмульсий.

Результаты экспериментальных исследований [19] показывают, что на возникновение микро-взрыва также будет влиять схема формирования двухкомпонентных капель топлив. Установлено, что для капель, образованных в результате столкновения, вероятность возникновения пузырька в капле увеличивается с увеличением скорости столкновения, что в свою очередь повышает вероятность возникновения микро-взрыва. В [19]

также было установлено, что микро-взрыв позволяет значительно увеличить скорость выгорания топлива.

Поскольку в качестве одного из компонентов эмульгированного топлива используется вода, для интенсификации процесса прогрева капли может использоваться графит. В [20] представлено, что добавление твердого непрозрачного включения графита к капле воды при высокотемпературном нагреве позволяет повысить скорость ее испарения на межкомпонентной границе, а также добиться эффекта взрывного разрушения. Было установлено, что взрывное дробление капли воды происходит в том случае, если давление паров жидкости превышает давление, контролируемое силами поверхностного натяжения и окружающей среды [20]. В работе [21] экспериментально установлено, что использование водных суспензий с добавлением графита позволяет снизить время испарения исследуемой капли до 50% по сравнению с каплей чистой воды, было определено, что взрывное измельчение капли суспензии позволяет в несколько раз увеличить площадь поверхности испарения. Однако пока не исследовалось, как добавление твердых частиц в состав капель эмульсий или неперемешанных жидкостей может повлиять на характеристики прогрева и микро-взрывного распада капель перспективных топлив, а также их зажигания.

Комбинация различных подходов к возникновению и улучшению микро-взрыва может значительно снизить времена прогрева до распада многокомпонентных капель, повысить значения ключевых характеристик (количество образующихся мелких фрагментов топлива) взрывного дробления, горения и зажигания.

Особого внимания заслуживают работы, посвященные механизмам микро-взрывного дробления многокомпонентных капель. В [22] опытным путем было установлено, что возникновению микро-взрыва предшествует образование одного или двух пузырей внутри капли в близи ее центра, что способствует более полной фрагментации капель. На образование пузырей непосредственное влияние оказывает разница волатильности компонентов,

для образования пузыря внутри капли требуется, чтобы капля прогрелась до температуры кипения менее волатильного компонента [23]. Исследования [24] показали, что на образование пузырьков внутри капли с ее последующим разрушением оказывает влияние степень перегрева, было определено, что разрушение происходит вследствие расширения пустот внутри капли и снижения её поверхностного натяжения из-за перегрева. Также в настоящее время в качестве одного из механизмов распада выделяют высокие скорости конвективных течений на границе двух компонентов, вследствие чего происходит разрыв межфазной границы и по следующему цепному механизму полный распад капли [25].

Однако большинство современных экспериментальных исследований [26–28] посвящено исследованию явления микровзрыва двухжидкостных капель с использованием различных держателей и подложек, однако такой подход накладывает ряд ограничений на условия разрушения капель. Для подложек [29–31], например, можно отметить влияние неровностей поверхности нагрева на процесс теплообмена, что может способствовать интенсификации процесса прогрева капли и оказывать значительное влияние на процессы фазовых превращений; неравномерный подвод теплоты, т.к. капля лежит на подложке, тепловой поток подводится лишь с одной стороны, возникает высокая разница температур внутри капли между границами «подложка – капля» и «капля – окружающая среда», что интенсифицирует взрывное разрушение капли из-за перепада температур; гидрофобные и гидрофильные свойства подложки также накладывают свои ограничения, т.к. капля даже под влиянием высокой температуры может не сформироваться, а просто растечься; «скачки» капли по поверхности подложки (капля может выскакивать за пределы исследуемой области, что может затруднять регистрацию быстропротекающих процессов распада); влияние теплофизических свойств и формы подложки на процесс прогрева капли (в зависимости от материала и формы изменяется коэффициент теплоотдачи, что влияет на тепловой поток). Для держателей [32–34] значимую роль

играет влияние размеров и формы последних на размеры исследуемой капли; влияние теплофизических свойств материала держателя на скорость и режим распада исследуемой капли; влияние гидрофильных и гидрофобных свойств держателя на форму капли и, как следствие, площадь контакта с держателем, что оказывает существенное влияние на скорость протекания процессов фазовых превращений, также гидрофильные и гидрофобные свойства держателя могут затруднять варьирование концентрации смешиваемых компонентов в широком диапазоне.

Указанные выше ограничения методик затрудняют применение полученных результатов исследований в реальных газопарокапельных технологиях, где, нагрев капель жидкости осуществляется высокотемпературной среде без использования вспомогательных приспособлений (держателей, подложек) [35, 36]. Серьезным ограничением для вышеперечисленных методик является тот факт, что регистрируемый процесс нагрева и распада исследуемой кали не ограничен во времени (распад капель на держателе или подложке может занимать длительное время), хотя в реальных технологиях время прогрева и взрывного дробления строго ограничивается размерами камеры сгорания и температурой среды [37]. Важно изучить вопрос взрывного дробления капель жидкости без использования держателей с целью приближения условий нагрева капли к существующим технологиям.

Цель данной работы – экспериментальное исследование микровзрыва двухкомпонентных капель и капель эмульсий без использования держателей при высокотемпературном нагреве (с учетом доминирующих в реальных топливных технологиях механизмов нагрева – конвективного и радиационного), а также разработка автоматической системы управления процессом сжигания эмульгированного топлива.

1. Научно-исследовательская работа

Взрывное дробление и измельчение капель многокомпонентных топлив и топливных эмульсий позволяет снизить затраты энергии на этапах прогрева, испарения и зажигания [1], а также способствует большей полноте выгорания топлива [38], снижению расхода топлива [39], снижению антропогенных выбросов [40]. С помощью эффектов взрывного дробления возможно добиться получения мелкодисперсного аэрозоля, что позволяет многократно увеличить площадь поверхности испарения, тем самым минимизировать затраты энергии и времени для технологий, связанных с повышением эффективности сжигания жидких и суспензионных топлив [41–43]. К сожалению, до сих пор не выявлены условия и не разработана теория управления процессами фазовых превращений для указанных выше топлив.

1.1 Объекты и методы исследования

При проведении экспериментальных исследований в качестве материалов были использованы: вода, рапсовое масло и дизельное топлива. В качестве исследуемых капель выступали двухкомпонентные капли [32] и капли эмульсий [44]. Выбранные материалы горючих жидкостей обусловлены, в первую очередь, их распространённым применением в технологиях зажигания жидких и суспензионных топлив. Дизельное топливо – широко распространенное топливо для дизельных двигателей внутреннего сгорания, которые повсеместно используются в различных видах транспорта и техники из-за своей надежности, эффективности и экономичности. Рапсовое масло – широко распространенное биотопливо (из рапсового масла изготавливают биодизель). Типичными концентрациями данных горючих жидкостей в перспективных технологиях являются от 90 до 100%.

Использование комбинации горючей жидкости (дизельного топлива или рапсового масла) совместно с водой позволяет достичь новых эффектов измельчения и зажигания топлив: значительно увеличивается площадь поверхности испарения, снижаются времена распада и времена задержки

зажигания за счет значительного снижения размеров капель топлива. В таблице 1.1 приведены теплофизические свойства использованных в экспериментах горючих и негорючих жидкостей.

Таблица 1.1 – Типичные свойства горючего и негорючего компонентов

Компонент	Плотность, кг/м^3	Кинематическая вязкость, сСт	Температура воспламенения, $^\circ$C	Теплота сгорания, МДж/кг	Температура кипения, $^\circ$C	Теплота парообразования, МДж/кг
Вода	997	0,96	–	–	–	–
Рапсовое масло	920	75	260	42,1	204	0,209
Дизельное топливо	820	15	300	42,4	240…347	0,210

На рис. 1.1 представлена схема регистрации процессов микровзрыва двухкомпонентных капель без использования держателя при высокотемпературном нагреве. В качестве нагревательной системы была использована муфельная печь (предельная температура нагрева 1200 °C). Температура печи фиксировалась с помощью системы, состоящей из комплекса сбора данных National Instruments и малоинерционных термопар. Муфельная печь находилась в вертикальном положении. Процесс фрагментации капель регистрировался с помощью высокоскоростной видеокамеры (частота съемки до 10^5 кадров в секунду). Пространство в камере муфельной печи подсвечивалось снизу с помощью прожектора.

Методика проведения экспериментов предполагала несколько этапов. На держателе, представленном на рисунке, при помощи дозаторов формировалась исследуемая двухкомпонентная капля заданного размера. Затем капля сбрасывалась вниз, свободно падая в потоке высокотемпературных газов. Высокоскоростная камера регистрировала быстропротекающие процессы распада двухкомпонентных капель. Обработка видеокадров осуществлялась с использованием программного обеспечения Phantom Camera Control. Частота съемки при поведении

экспериментов составляла 5400 кадров в секунду, температура в печи варьировалась в диапазоне 800…1100 ^{0}C, а диаметр исследуемых капель от 0,62 до 1,34 мм.

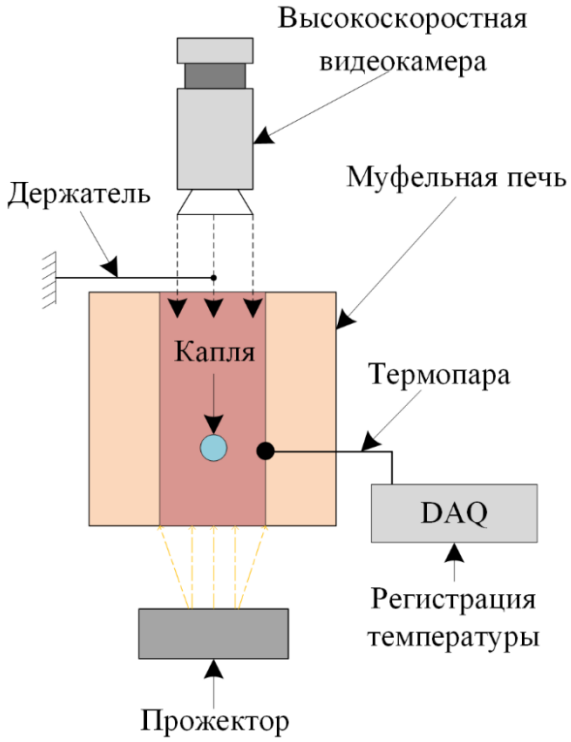


Рисунок 1.1 – Схема экспериментального стенда

Во время свободного падения капля подвергалась двум совместным видам нагрева: радиационному $q_{\text{рад}} = \varepsilon_d \cdot \sigma \cdot (T_a^4 - T_s^4) + \varepsilon_a \cdot \sigma \cdot T_a^4$, где ε_d – степень черноты поверхности капли, σ – коэффициент Стефана-Больцмана, ε_a – степень черноты воздуха, T_a – температура воздуха, T_s – температура поверхности капли, и конвективному $q_{\text{конв}} = \alpha \cdot (T_a - T_s)$, где α – коэффициент теплоотдачи. В таблице 1.2 приведены тепловые потоки, подводимые к исследуемой капле во всем диапазоне исследуемых температур.

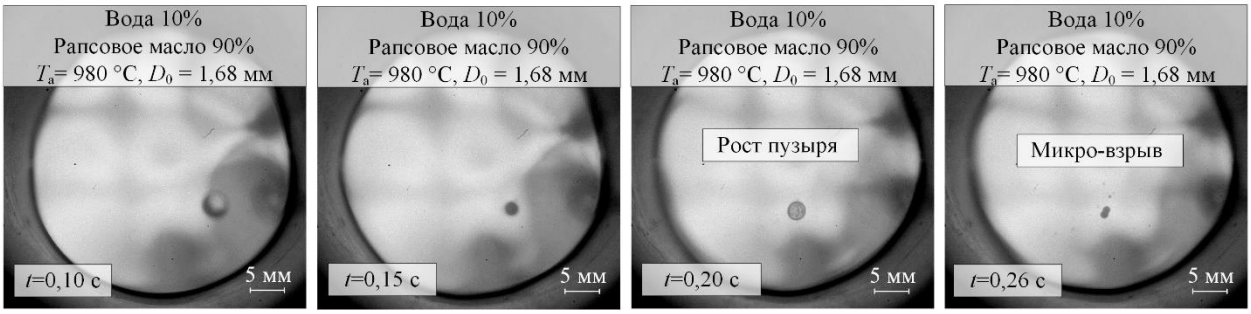
В реальных установках по сжиганию жидких нефтесодержащих отходов температура сжигания составляет 800…1200 °C. При этом скорость подаваемого в камеру сгорания воздуха, составляет свыше 50 м/с [41].

С помощью высокоскоростной видеокамеры выполнялась регистрация процессов прогрева и измельчения (распада) двухкомпонентных капель и капель эмульсий. На рис. 1.2 представлены типичные видеокадры процессов разрушения двухкомпонентной капли (рис. 1.2*а*) и капли эмульсии (рис. 1.2*б*). Полученные видеозаписи взрывного дробления капель анализировались с использованием программного обеспечения Phantom Camera Control. По полученным видеофрагментам определялись времена разрушения исследуемых капель, их размеры, а также другие регистрируемые параметры.

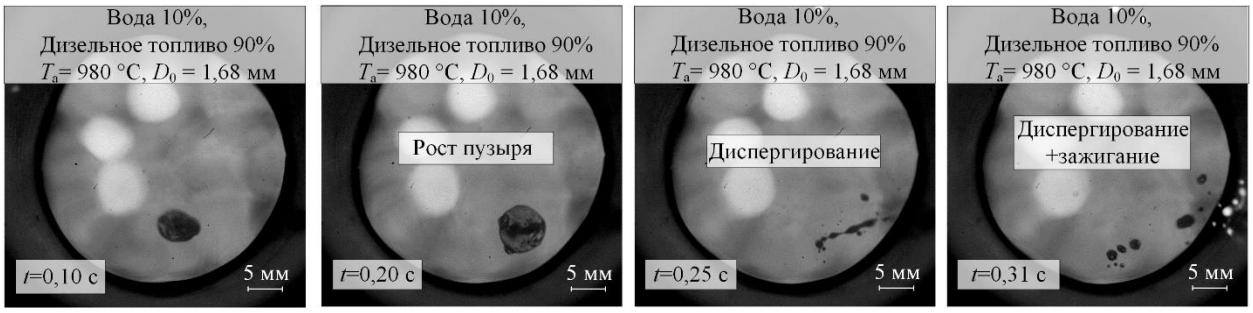
Таблица 1.2 – Тепловые потоки, подводимые к исследуемой капле, при разных температурах нагрева

$T_а$, °C	800	850	900	950	1000	1050	1100
$q_{конв}$, кВт/м^2	179,51	198,80	219,19	240,80	263,74	288,22	314,45
$q_{рад}$, кВт/м^2	74,91	89,96	107,16	126,70	148,79	173,64	201,47
$q_{сум}$, кВт/м^2	254,43	288,76	326,35	367,49	412,53	461,86	515,92

При обработке видеозаписей для определения размера исследуемой капли и последствий ее разрушения вводился масштабный коэффициент, в качестве определяющего размера выступал диаметр муфельной печи ~ 50 мм. Во время обработки видеофрагментов регистрировался диаметр капли D в течение всего процесса нагрева, и определялось изменение отношения площадей исследуемой капли во времени $(D/D_0)^2$, где D_0 – начальный диметр капли, который определялся, исходя из начального объема капли ($V=\pi D_0^3/6$). Также в процессе обработки видеофрагментов отслеживалась динамика изменения размера пузырей пара внутри исследуемой капли (рис. 1.3), регистрировался радиус пузыря (R_{bubble}) в течение времени его существования.



(*а*)



(*б*)

Рисунок 1.2 – Типичные видеокадры процессов дробления исследуемых капель: (*а*) – двухкомпонентные капли; (*б*) – капли эмульсий

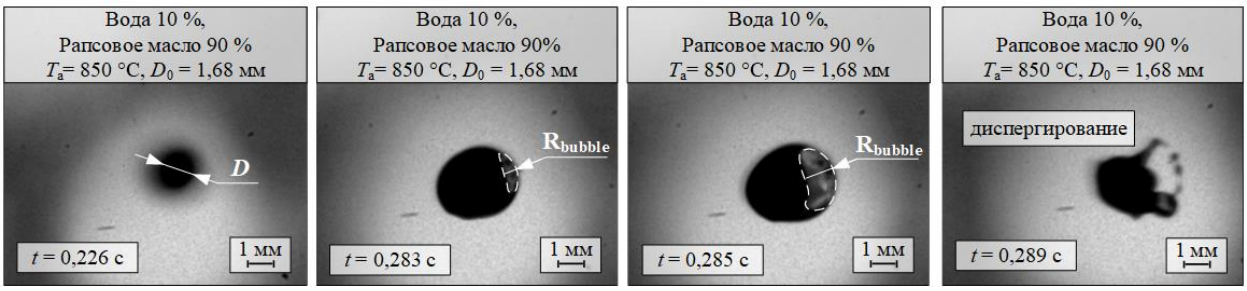


Рисунок 1.3 – Динамика изменения размера пузыря в процессе нагрева капли

1.2 Результаты и обсуждения

В ходе проведения экспериментальных исследований выделены два варианта последствий нагрева исследуемых капель, которые характеризуются хорошо известными режимами распада капель [44–46]: диспергирование (фрагментация капли) и микровзрыв (полное разрушение родительской капли).

Каждый из представленных вариантов последствий характеризовался рядом особенностей. Для первого варианта процессы зарождения пузырьков

реализовывались практически локально. Разрушение (схлопывание) пузырьков сопровождалось отрывом частей капли. При увеличении температуры греющей среды реализовывался второй вариант, при котором парообразование в объеме капли было настолько интенсивным, что пузыри формировались во всем объеме. Однако во втором случае вначале капля прогревалась, никаких изменений с поверхностью капли практически не происходило, а затем регистрировался громкий хлопок, характеризующийся мгновенным дроблением капли. Образовывался мелкодисперсный аэрозоль с четко детектируемыми парами.

Влияние ключевых факторов на времена распада двухкомпонентных капель

На рис. 1.4 представлена зависимость времён распада от температуры газовой среды для двух составов неоднородных капель: 1 – 10 % вода, 90 % рапсовое масло, 2 – 10 % вода, 90 % дизельное топливо, начальный объем исследуемых капель составлял 2,5 мкл (D_0 = 1,68 мм). Температура варьировалась от 850 °С до 1050 °С, предельные температуры обусловлены тем, что при температурах ниже 850 °С дробления капли не наблюдалось. Во всем диапазоне исследованных температур для исследуемых капель режимом дробления был микро-взрыв. Основной закономерностью, выявленной в ходе проведения экспериментов по варьированию температуры, являлось то, что с увеличением температуры газовой среды времена распада уменьшались. При увеличении температуры возрастает тепловой поток, подводимый к капле. С увеличением температуры греющей среды времена существования капель уменьшаются нелинейно. Данный эффект связан с нелинейными (экспоненциальными) зависимостями скоростей испарения горючих и негорючих компонентов от температуры [47]. Представленные результаты демонстрируют, что при увеличении температуры от 850 до 1050 °С для капель на основе дизельного топлива времена распада снижаются на 50%, а для капель на основе рапсового масла – на 12 %.

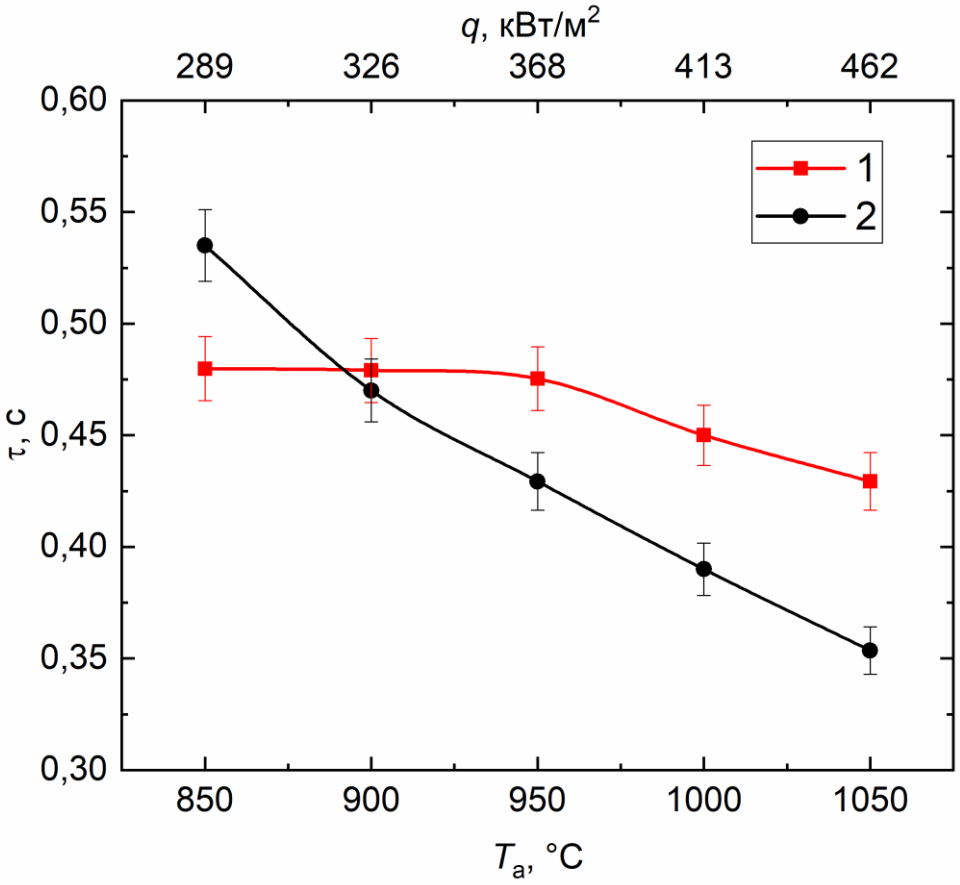


Рисунок 1.4 – Зависимость времен распада неоднородных капель от температуры греющей среды: 1 – 10 % – вода, 90 % – рапсовое масло; 2 – 10 % – вода, 90 % – дизельное топливо

Также исследовалось влияние концентрации горючей жидкости на времена распада двухкомпонентных капель. На рис. 1.5 представлены зависимости времен прогрева двухкомпонентных капель до условий взрывного распада от концентрации горючей жидкости η для двух составов: вода, рапсовое масло; вода, дизельное топливо. Начальный объем исследуемых капель составлял 2,5 мкл (D_0 = 1,68 мм), варьирование концентраций осуществлялось в широком диапазоне от 3% до 97%. Показано, что минимальные времена распада соответствуют максимальной разнице объемных концентраций горючего и негорючего компонента. При увеличении концентрации горючего компонента от 3% до 97% времена

распада двухжидкостной неперемешанной капли снижаются на 5…15 %. Что соответствует представленным ранее результатам [48].

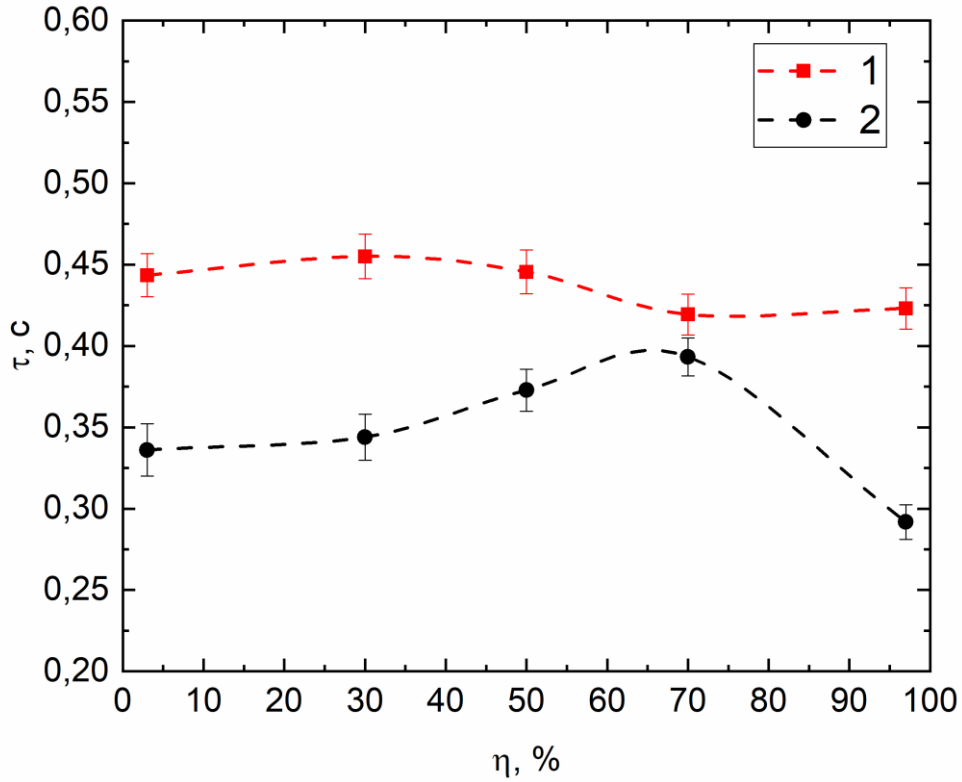


Рисунок 1.5 – Зависимость времен распада неоднородных капель от концентрации горючей жидкости (T_a = 950 °С): 1 – вода, рапсовое масло; 2 – вода, дизельное топливо

На рис. 1.6 представлены зависимости времен прогрева двухкомпонентных капель до условий взрывного распада от размеров капель. В проведенных экспериментах начальный радиус капли варьировался в диапазоне от 0,62 мм до 1,34 мм. Предельные размеры обусловлены возможностями их формирования и дальнейшего падения в потоке высокотемпературных газов. Капли радиусом меньших размеров уносило к стенкам муфельной печи, а большие капли большего не успевают прогреваться в полете. Показано, что с увеличением размеров капель времена распада увеличиваются. Для большего объёма капли необходимо затратить большее время для прогрева. Исходя из полученных данных при

варьировании начального радиуса двухкомпонентной капли от 0,62 мм до 1,34 мм, времена распада капель на основе рапсового масла увеличиваются на 26%, а для капель на основе дизельного топлива – на 15%. Полученная зависимость продлена в область меньших размеров с целью приближения полученных результатов к реальным парогазокапельным технологиям.

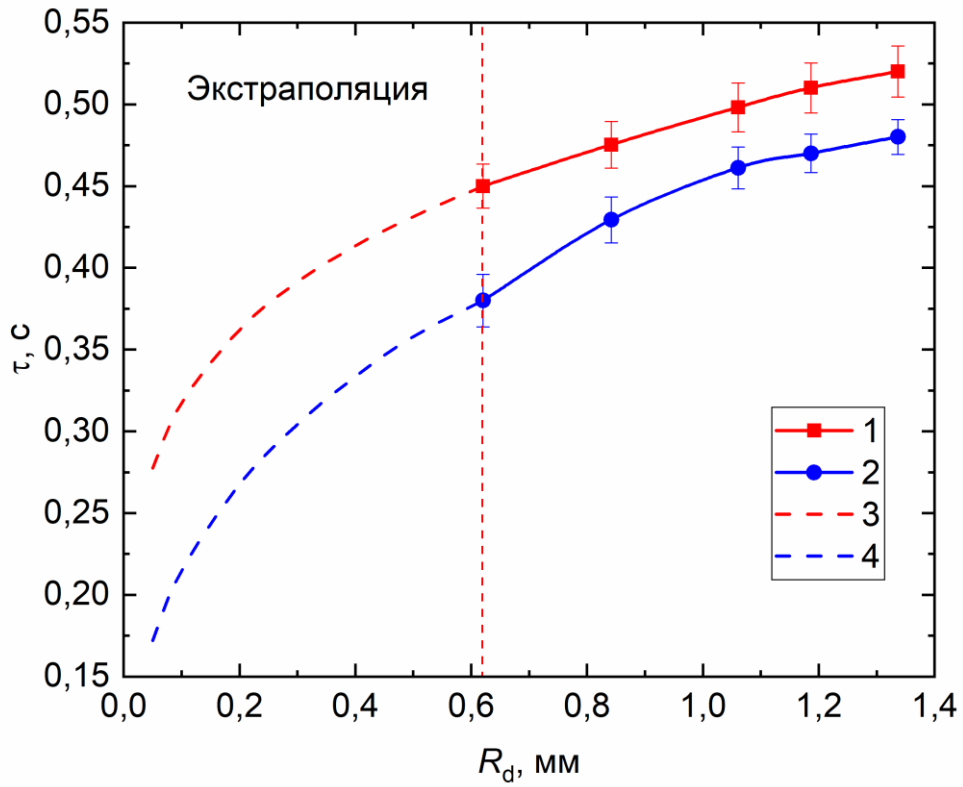


Рисунок 1.6 – Зависимость времен распада неоднородных капель от начального размера капель (T_a = 950 °C): 1 – 10 % – вода, 90 % – рапсовое масло; 2 – 10 % – вода, 90 % – дизельное топливо; 3 – экстраполяция для капель на основе рапсового масла: $\tau = 0{,}492 \cdot R_d^{0{,}191}$; 4 – экстраполяция для капель на основе дизельного топлива: $\tau = 0{,}446 \cdot R_d^{0{,}308}$

Влияние ключевых факторов на времена распада капель эмульсий

На рис. 1.7 представлена зависимость времён начала процесса диспергирования от температуры газовой среды для двух составов капель эмульсий: 10 % – вода, 90 % – рапсовое масло; 10 % – вода, 90 % – дизельное топливо. Начальный объем исследуемых капель составлял 2,5 мкл.

Зафиксировать полные времена распада капель в диапазоне температур от 800 °С до 1000 °С не удалось, поскольку капля эмульсии за время полета в разогретой газовой среде не успевает полностью раздробиться. В экспериментах были зафиксированы лишь частные случаи, полного распада капли (при T_a свыше 1000 °С).

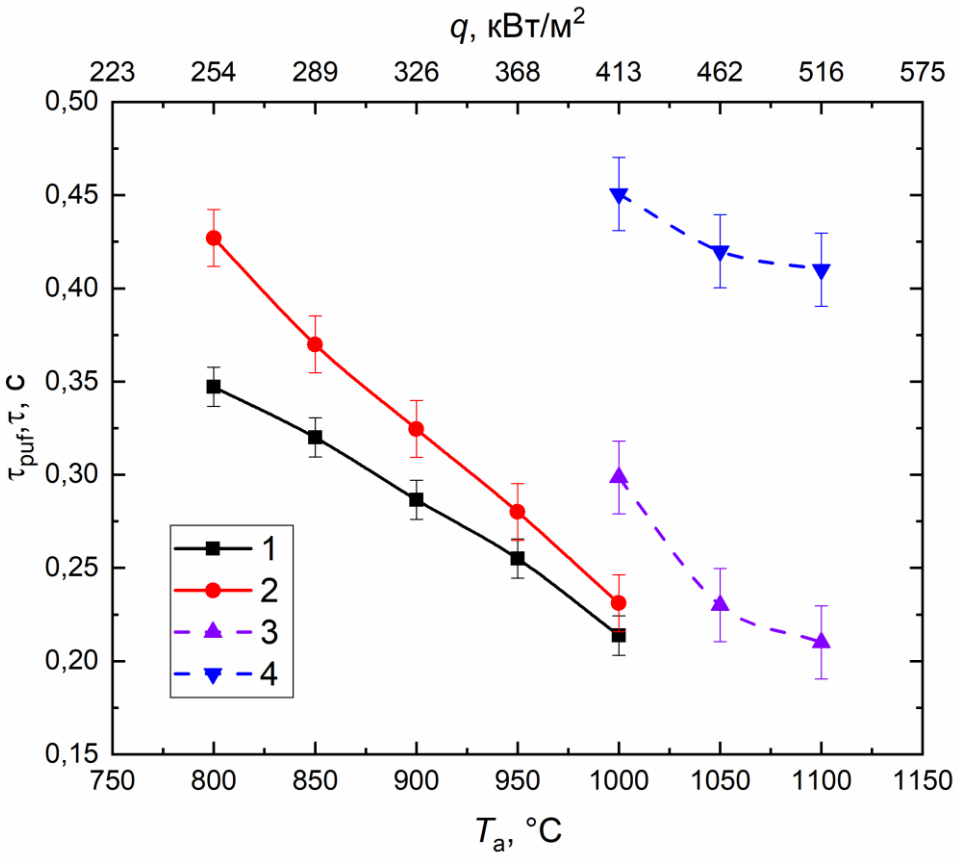


Рисунок 1.7 – Зависимость времен существования капель эмульсий от температуры греющей среды: 1 – времена начала диспергирования 10 % – вода, 90 % – дизельное топливо; 2 – времена начала диспергирования 10 % – вода, 90 % – рапсовое масло; 3 – времена разрушения 10 % – вода, 90 % – дизельное топливо; 4 – времена разрушения 10 % – вода, 90 % – рапсовое масло

Основной закономерностью, выявленной в ходе проведения экспериментов по варьированию температуры, являлось то, что с увеличением температуры газовой среды от 800 °С до 1000 °С времена

начала процесса диспергирования уменьшаются: для капель на основе дизельного топлива на 60 %, а для капель на основе рапсового масла на 80 %. Времена полного распада капель эмульсии при варьировании температуры от 1000 °С до 1100 °С уменьшаются для капель на основе дизельного топлива на 40 %, а для капель на основе рапсового масла на 10 %. Это обусловлено тем, что при увеличении температуры от 800 до 1100 °С возрастает тепловой поток, подводимый к капле, возрастает практически в два раза.

Эксперименты с эмульсионными составами 90% Вода, 10% Рапсовое масло; 90% Вода, 10% Дизельное топливо были проведены при широком варьировании температур (800…1100 °С), режимов распада не зафиксировано. Скорее всего, что не хватает времени на достаточный прогрев капли во время полета. Минимальные времена распада при нагреве на держателе и подложке составляли порядка 10 секунд для данных составов, если учесть тепловой поток, то он соответствовал температуре около 1150 °С.

Особенности формирования вторичных капель

На рис. 1.8 представлена динамика изменения отношения площадей поверхности исследуемых капель в процессе прогрева (D_0 = 1,68 мм). На начальном этапе прогрева двухжидкостных неперемешанных капель происходит значительный рост капли за счет образования большого количества пузырей внутри капли, далее происходит схлопывание с образованием мелкодисперсного аэрозоля (размеры вторичных много меньше размера исходной капли) и интенсивное испарение образующихся фрагментов. Иногда перед микро-взрывом происходит процесс диспергирования, сопровождающийся ростом парового пузыря и отрывом частей капли. При малых концентрациях горючего компонента основным режимом распада было диспергирования. На начальном этапе капля интенсивно прогревается и увеличивается в размерах, далее происходит

схлопывание с отрывом частей капли, процесс повторяется до полного распада на мелкие фрагменты.

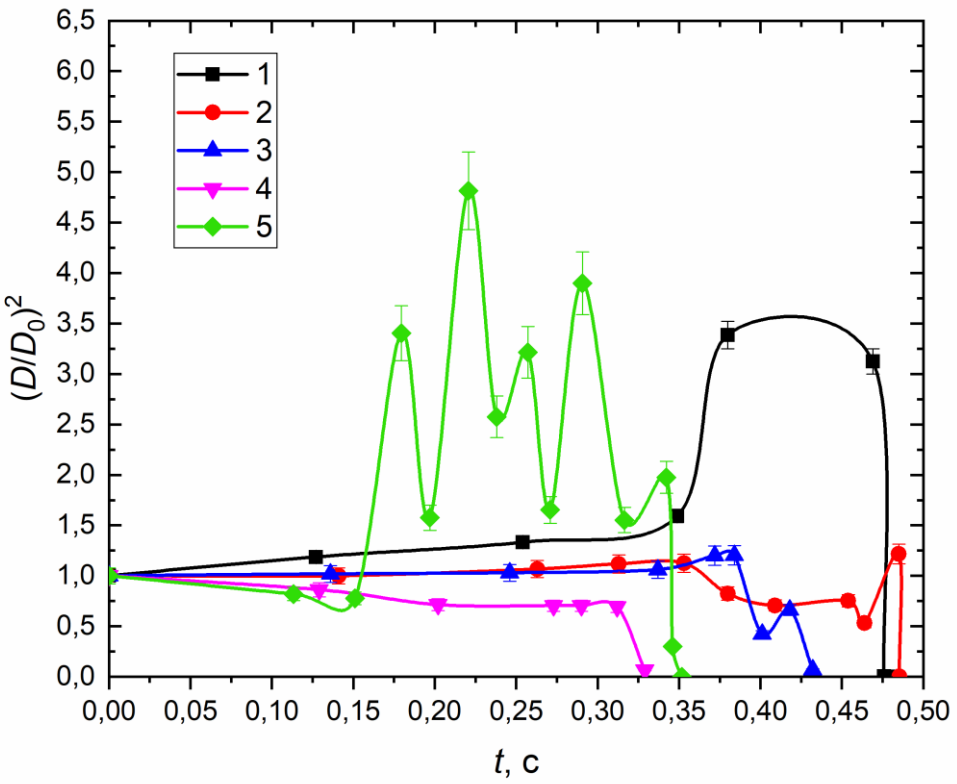


Рисунок 1.8 – Динамика изменения отношения площадей поверхности исследуемых капель в процессе прогрева: 1 – двухкомпонентная капля: 10 % – вода, 90 % – дизельное топливо; 2 – двухкомпонентная капля: 10 % – вода, 90 % – рапсовое масло; 3 – двухкомпонентная капля: 97 % – вода, 3 % – рапсовое масло; 4 – капля эмульсии: 10 % – вода, 90 % – рапсовое масло; 5 – капля эмульсии: 10 % – вода, 90 % – дизельное топливо

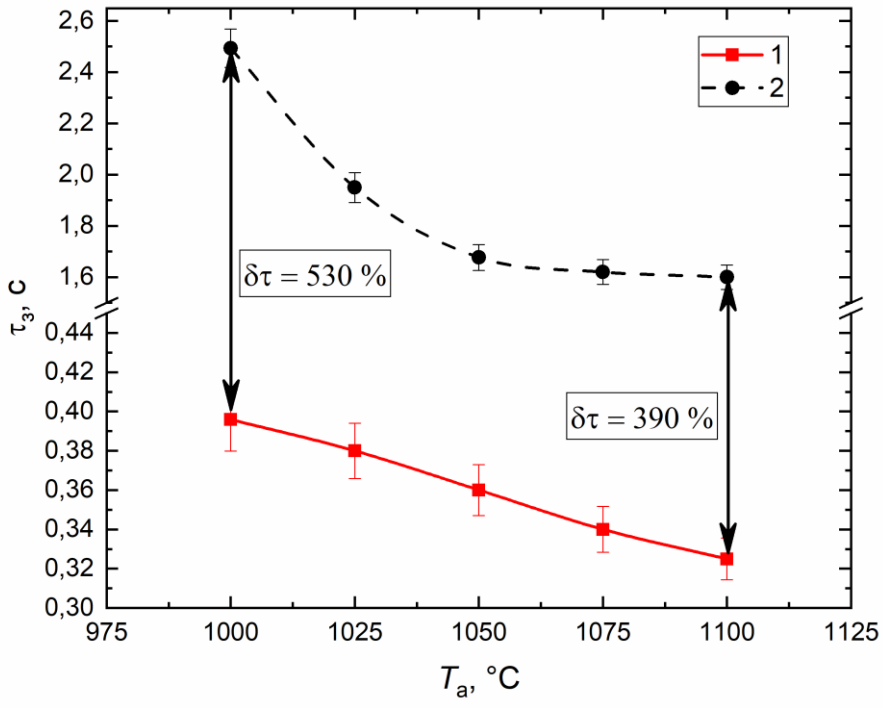
Для капель эмульсий процессы микро-взрыва происходят иначе. На первом этапе прогрева родительская капля начинает постепенно испаряться, после чего в течение некоторого промежутка времени незначительно увеличивается в размерах, затем капля взрывается с образованием мелкодисперсного аэрозоля. Процесс диспергирования для капель эмульсий происходят следующим образом: на начальном этапе капля незначительно испаряется и интенсивно прогревается, после чего происходит рост парового

пузыря, вследствие чего капля значительно увеличивается в размерах. На следующем этапе происходит схлопывание пузыря с отрывом частей капли, процесс многократно повторяется до полного распада капли на более мелкие фрагменты, которые интенсивно испаряются в высокотемпературной среде.

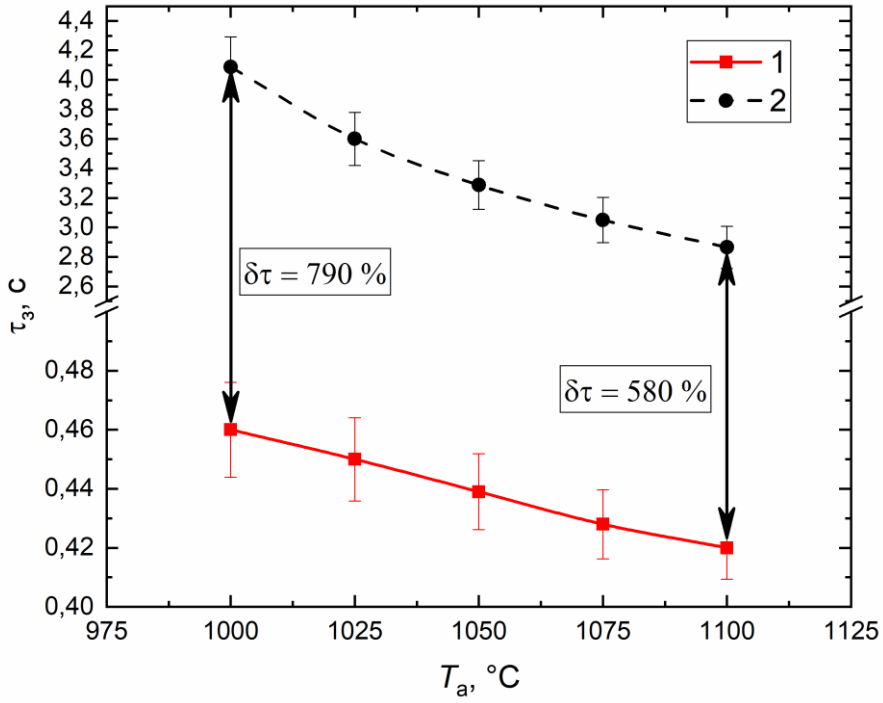
Влияние фактора измельчения капель на характеристики их зажигания

Для развития технологий зажигания жидких топлив важным параметром является время задержки зажигания. Зажигание вторичных капель или аэрозольного облака происходило при их контакте со стенками муфельной печи, при контакте исходной капли со стенками муфельной печи зажигания не наблюдалось, каплю, как правило, просто разрывало на мелкие фрагменты. Зажигание вторичных капель наблюдалось лишь при температурах свыше 950 °C, вторичные капли после контакта с разогретыми стенками муфельной печи интенсивно испарялись в высокотемпературной среде. При обработке видеофрагментов были выявлено, что при микро-взрыве зажигание аэрозольного облака носит цепной характер, в то время как при диспергировании зажигание носит лишь локальный характер (зажигаются лишь отдельные фрагменты). Для однородных капель топлив в условиях проведенных экспериментов зажигания не было выявлено, капля горючей жидкости просто интенсивно испарялась в потоке раскаленных газов.

На рис. 1.9 представлено сравнение времен задержки зажигания однородных и неоднородных капель для двух составов при интенсивном нагреве. Полученные результаты демонстрируют, что процессы микро-взрывного дробления позволяют снизать времена задержки зажигания капель топлив более чем в 5 раз.



(*а*)



(*б*)

Рисунок 1.9 – Сравнение времен задержки зажигания неоднородных и однородных капель: (*а*) – капли на основе дизельного топлива (1 – неоднородная капля: 10 % – вода, 90 % – дизельное топливо; 2 – однородная капля); (*б*) – капли на основе рапсового масла (1 – неоднородная капля: 10 % – вода, 90 % – рапсовое масло; 2 – однородная капля)

1.3 Основные комментарии и заключения

I. По результатам проведенных исследований установлены два режима дробления исследуемых капель. В частности, для двухкомпонентных неперемешанных капель микро-взрыв являлся основным режимом дробления родительской капли во всем диапазоне исследованных температур (850…1050 °C), а диспергирование наблюдалось лишь при малых концентрациях горючего компонента (3 %), в обоих случаях наблюдалось увеличение размеров родительской капли. Для перемешанных капель эмульсий процессы полного распада капли были зафиксированы лишь при температурах свыше 1000 °C, процесс микро-взрыва характеризовался постепенным испарением и незначительным увеличением в размерах родительской капли.

II. Из исследованных факторов наибольшее влияние на итоговые характеристики процесса разрушения неоднородных капель оказывают температура греющей среды и соотношение концентраций компонентов. Так при увеличении температуры от 850 °C до 1050 °C времена распада двухкомпонентных неперемешанных капель уменьшаются до 50 %. Времена начала процесса диспергирования для капель эмульсий с увеличением температуры газовой среды от 800 °C до 1000 °C уменьшаются до 80 %. Времена полного распада капель эмульсии при варьировании температуры от 1000 °C до 1100 °C уменьшаются до 40 %. При повышении концентрации горючего компонента от 3 % до 97 % время разрушения двухжидкостной неперемешанной капли сокращается до 15 %.

III. Микро-взрыв двухжидкостных капель позволяет значительно снизить инерционность зажигания топлив, что делает полученные результаты важными для развития топливных технологий.

2. Разработка САУ процессом сжигания эмульгированного топлива

В данной работе в качестве объекта автоматизации выступает установка по сжиганию эмульгированного топлива. В качестве прототипа данной установки выступает установка для сжигания жидких нефтеотходов «Вихрь-1», имеющая высокий КПД и позволяющая утилизировать горючие отходы с содержанием минеральных примесей и влаги до 60 % [49, 50].

Процесс сжигания осуществляется в турбобарботажной камере сгорания. Процесс горения в такой камере характеризуется следующими признаками [51]:

1. Процесс сжигания осуществляется в цилиндрической или узкой кольцевой камере при большой кратности обмена в тонком слое, приводимом во вращательное турбулентное движение. Слой топлива быстро прогревается и частично распыляется на более мелкие, чем при других способах, капли.

2. Процесс ведется при пониженном количестве первичного воздуха и при большой его скорости. Барботажные элементы объединены в коллекторные блоки.

3. Подача вторичного воздуха в камеру сгорания осуществляется над слоем отходов тангенциально с пересечением ее рабочего сечения. Недоиспарившиеся капли, вынесенные из слоя под действием центробежной силы, сепарируются на стенках камеры сгорания, что исключает механическую неполноту сгорания.

4. Процесс сжигания ведется при повышенном значении коэффициента избытка воздуха, что в определенных пределах позволяет изготавливать турбобарботажные горелки без футеровки и водяного охлаждения корпуса.

Схема установки приведена на рисунке 2.1.

Максимальная производительность установки составляет 200 кг/ч, коэффициент избытка воздуха α = 1,4…1,9; закрутка «вторичного» воздуха осуществляется со скоростью свыше 50 м/с, диаметр печи 0,5 м. Материал печи – нержавеющая сталь 1Х18Н9Т. Корпус цельнометаллический без

футеровки и водяного охлаждения. Процесс сжигания ведется при температуре 800…1100 °С [51].

Основные технические характеристики установки приведены в таблице 2.1.

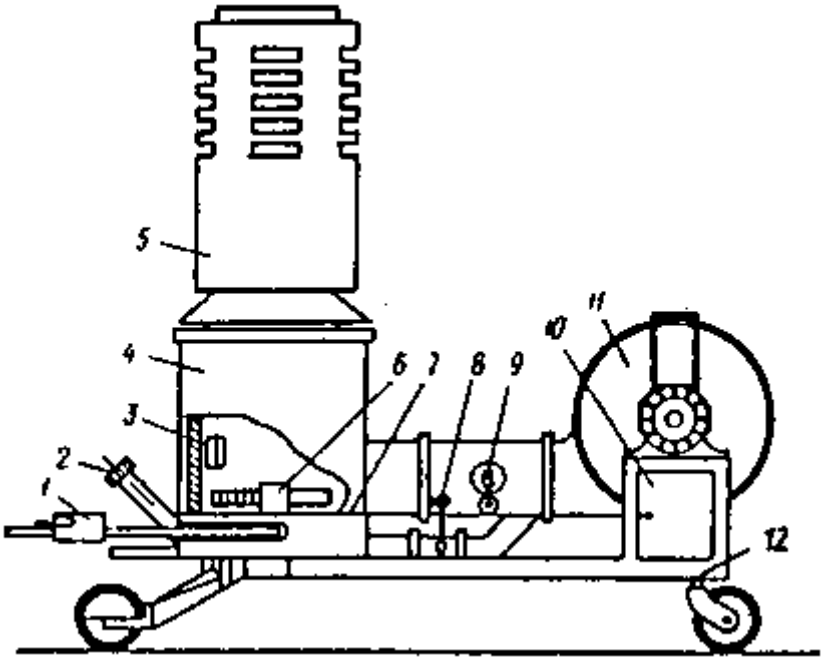


Рисунок 2.1 – Установка для сжигания эмульгированного топлива:
1 – регулятор подачи топлива; 2 – запальный патрубок; 3 – отверстия для подачи «вторичного» воздуха; 4 – камера сгорания; 5 – труба; 6 – турбобарботажная крестовина; 7 – днище горелки; 8 – шибер «первичного» воздуха; 9 – шибер «вторичного» воздуха; 10 – энергоблок; 11 – вентилятор; 12 – шасси

Таблица 2.1 – Характеристики работы турбобарботажной установки

Характеристики процесса и установки	Значение
Высота слоя топлива, см	0,2…3,0
Коэффициент избытка воздуха	1,4…1,9

Продолжение таблицы 2.1

Характеристики процесса и установки	Значение
Количество первичного воздуха, % от общего расхода	5…10
Скорость выхода первичного воздуха, м/с	более 50
Характер подачи вторичного воздуха	По внутренней и наружной сторонам кольцевой камеры
Допустимое содержание в топливе, %:	
влаги	60
твердых минеральных примесей	15
Размер частиц твердых примесей, мкм	0…2000
Характеристики процесса и установки	Значение
Суммарная площадь сечения барботажных отверстий, % от общей площади ванны	менее 0,1
Рекомендуемые к сжиганию углеводороды	От ЛВЖ до тяжелых мазутов ($t_{кип}$ = 30…360 °С)

Основной задачей при регулировании процесса горения является поддержание материального и энергетического баланса. При соблюдении этих требований тепловые потери сводятся к минимуму и достигается максимальное значение КПД установки.

Утилизация теплоты уходящих газов осуществляется благодаря контактному теплообменнику, установленному на выходе из камеры сгорания.

На основании описанных свойств системы и параметров установки произведем выбор структуры САУ.

2.1 Выбор структуры автоматической системы управления

Наиболее типичными системами регулирования процесса горения являются АСР типов «топливо-воздух», «тепло-воздух» с параллельным воздействием на воздух, «тепло-воздух» с последовательным воздействием на воздух [52].

В данной работе регулирование процесса горения осуществляется по схеме «топливо-воздух», поскольку данная система является наиболее простой. Основной задачей при реализации данной схемы является поддержание требуемого коэффициента избытка воздуха для нормального протекания процесса горения.

АСР по схеме «топлива-воздух» является одной из наиболее простых систем регулирования нагрузки. Данная система включается два контура:

1) малоинерционные входные сигналы по расходам топлива и воздуха, отрабатываются в переходных режимах работы;

2) инерционный контур, корректирующий работу АСР в стационарном режиме по содержанию кислорода в дымовых газах.

Структурная схема системы автоматического управления процессом сжигания эмульгированного топлива представлена на листе с шифром ФЮРА.421000.020 С1.

2.2 Разработка функциональной схемы

Функциональная схема систем автоматизации технологических процессов является основным техническим документом, определяющим структуру и характер систем автоматизации технологических процессов, а также оснащения их приборами и средствами автоматизации [53].

Объектом управления в системах автоматизации технологических процессов является совокупность основного и вспомогательного

оборудования вместе с встроенными в него запорными и регулирующими органами, а также энергии, сырья и других материалов. Определяемых особенностями используемой технологии.

При разработке функциональных схем автоматизации технологических процессов должны быть решены следующие задачи:

- получение первичной информации о состоянии технологического процесса и оборудования;

- стабилизация технологических параметров процесса;

- контроль и регистрация технологических параметров процессов и состояния технологического оборудования.

Технологическое оборудование и коммуникации при разработке функциональных схем должны изображаться, как правило упрощенно, без указания отдельных технологических аппаратов и трубопроводов вспомогательного назначения. Однако изображенная таким образом технологическая схема должна давать ясное представление о принципе ее работы и взаимодействии со средствами автоматизации.

На технологических трубопроводах показывают только ту регулирующую и запорную арматуру, которая непосредственно участвует в работе системы автоматизации или необходима для определения относительного расположения отборных устройств и первичных измерительных преобразователей.

Внутри контуров условных обозначений технологического оборудования или рядом с ними необходимо приводить поясняющие надписи.

Была разработана функциональная схема АСР процесса сжигания эмульгированного топлива. Схема представлена на листе с шифром ФЮРА.421000.020 С2.

На первом этапе разработки функциональной схемы были определены измерительные каналы (1…9) и каналы управления (10…15). Для измерения температуры в камере сгорания используется канал 1, а для температуры

уходящих газов канал 2. В топке установлены 4 датчика температуры для контроля распределения температурного поля. По измеренной температуре определяется эффективность процесса горения. С помощью каналов 3 и 4 определяется температура до и после теплообменника, с помощью чего оценивается количество теплоты, отданное дымовыми газами. Расход топлива измеряется с помощью расходомера 5, расходы первичного и вторичного воздуха с помощью расходомеров 6 и 7, соответственно. Канал 8 предназначен для измерения расхода воды, поступающей на теплообменник, а содержание кислорода в дымовых газах определяется с помощью газоанализатора 9. Каналы 1-9 формируют сигналы об измеряемой величине и с помощью аналоговых сигналов информация передается на контроллер.

Каналы 10-15 предназначены для формирования управляющих сигналов. С помощью каналов 10, 13 регулируется расход топлива, поступающий в камеру сгорания, расход воздуха, поступающий в камеру сгорания, регулируется с помощью каналов 12, 14, с помощью каналов 13, 14 контроллер получает информацию о положении выходного вала исполнительного механизма. Канал 11 предназначен для формирования дискретного сигнала, который служит для запуска горелки. С помощью канала 15 передается сигнал на включение и выключение дымососа.

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.

2.3 Выбор технических средств автоматизации

Система автоматического управления технологическим процессом должна проектироваться с использованием технических средств автоматизации, серийно выпускаемых отечественными предприятиями. Предпочтение должно отдаваться унифицированным системам и

однотипным техническим средствам, обеспечивающим взаимозаменяемость, простоту сочетания друг с другом и удобство компоновки на щитах.

Важными параметрами при выборе первичных измерительных преобразователей являются: диапазон измерений и характеристики выходного сигнала. Также необходимо ограничивать количество технических средств, устанавливаемых на щитах, минимальным набором, обеспечивающим выполнение требуемых функций.

Решения по выбору технических средств автоматизации приведены в заказной спецификации, представленной на листе с шифром ФЮРА.421000.020 ЗС.

2.3.1 Выбор датчиков температуры

В разрабатываемой автоматической системе управления процессом сжигания эмульгированного топлива регистрируется температура в камере сгорания, температура уходящих дымовых газов, а также температура до и после подогревателя воды. Для измерения температуры в камере сгорания используются четыре датчика температуры. Главным требованием для датчиков температуры, используемых для измерения температуры в камере сгорания, является диапазон измерения (800…1100 °С). Рассмотрим характеристики нескольких термоэлектрических преобразователей, выпускаемых отечественными производителями «Метран» и «Овен» [54, 55].

Таблица 2.2 – Основные технические характеристики термоэлектрических преобразователей для измерения температуры в камере сгорания

Наименование	Тип	Диапазон измерения	Выходной сигнал	Класс допуска	Цена, руб.
Метран-288-Exia	ТНН (N)	-50…1200 °С	4…20 мА	2	от 12800
Метран-2700	ТПП (S)	-40…1200 °С	4…20 мА	2	от 15700
Овен ДТПК 155	ТХА (K)	-200…1200 °С	-	2	от 7200

Выберем датчик типа Метран-288-Exia (длина монтажной части составляет 100 мм), поскольку выходным сигналом данного датчика является унифицированный токовый сигнал, а также то, что он дешевле, чем Метран-2700. Овен ДТПК 155 является наиболее привлекательным с точки зрения цены, однако использование данного датчика требует установки измерительного преобразователя. Выберем 4 термопары типа Метран-288-Exia.

Для измерения температуры воды до и после теплообменника, а также температуры дымовых газов на выходе из камеры сгорания требуется три датчика температуры. Рассмотрим характеристики нескольких термоэлектрических преобразователей.

Таблица 2.3 – Основные технические характеристики термоэлектрических преобразователей для измерения температуры

Наименование	Тип	Диапазон измерения	Выходной сигнал	Класс допуска	Цена, руб.
Овен ДТПК075Е	ХА (K)	-40…800 °С	4…20 мА	2	от 10000
Метран-2700	ХА (K)	-50…200 °С	4…20 мА	2	от 15700
Метран-252	ХК (L)	-40…600 °С	-	2	от 2700

Выберем датчик типа Овен ДТПК075Е (длина монтажной части 60 мм), поскольку выходным сигналом данного датчика является унифицированный токовый сигнал, а также он обладает не высокой ценой. Выберем три датчика типа Овен ДТПК075Е.

2.3.2 Выбор датчиков расхода

Для измерения количества сжигаемого топлива необходимо установить расходомер в магистрали подачи топлива. Датчики расхода работают по разному принципу и имеют разные характеристики. В рамках данной работы рассмотрим 3 расходомера [56, 57], работающих по разному принципу:

- электромагнитный расходомер фирмы «Endress+Hauser» типа Promag 53P;

- кориолисовый расходомер фирмы «Endress+Hauser» типа Proline Promass 80F;

- ультразвуковой расходомер ГК «Новые технологии» типа РУС-1.

Технические характеристики электромагнитного расходомера типа Promag 53P представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Технические характеристики электромагнитного расходомера типа Promag 53P

Наименование	Значение
Токовый выход	0…20 или 4…20 мА
Импульсный частотный выход	верхнее значение частоты 2...1000 Гц,
Интерфейс	RS-485, MODBUS
Питание	220 В AC или 24 В DC
Потребляемая мощность	15 Вт
Нормальные рабочие условия	температура среды: +80 °C
Измерение расхода	до 9600 $м^3$/ч

Технические характеристики кориолисового расходомера типа Proline Promass 80F представлены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Технические характеристики расходомера Proline типа Promass 80F

Наименование	Значение
Токовый выход	4-20 мА; импульсно-частотный

Продолжение таблицы 2.5

Наименование	Значение
Питание	220 АС
Потребляемая мощность	15 Вт
Диапазон измерения	до 3200 т/ч
Рабочая температура	минус 50 до плюс 350 ˚С
Рабочее давление	0…300 бар

Технические характеристики ультразвукового расходомера типа РУС-1 представлены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Технические характеристики ультразвукового расходомера фирмы «Новые технологии» типа РУС-1

Наименование	Значение
Токовый выход	4…20 мА
Интерфейс	RS-485
Питание	220 В
Потребляемая мощность	17 Вт
Рабочие условия	-40…+180 °С
Измерение расхода	до 11 $м^3$/ч

Проведя анализ технических характеристик преобразователей расхода, делаем вывод о том, что расходомер типа РУС-1 подходит для нашей системы по диапазону расхода. Цена данного расходомера согласно прайс-листу составляет 30000 рублей.

Для определения расхода воздуха, поступающего в камеру сгорания требуется установка расходомеров в трубопроводе подачи воздуха рассмотрим 4 расходомера [58–60], работающих по разному принципу:

- вихревой расходомер фирмы «Vortex» типа RWG;
- вихревой расходомер фирмы «Vortex» типа RWG;
- кориолисовый расходомер фирмы «Rosemount» типа Rosemount 205 ICFA;
- струйный расходомер VA 420.

Технические характеристики данных технический средств измерения расхода представлены в таблице 2.7.

Таблица 2.7 – Основные технические характеристики средств измерения расхода воздуха

Наименование	Диапазон измерения, $м^3/ч$	Температура измеряемой среды, °С	Максимальное давление среды	Выходной сигнал	Цена, руб.
Vortex RNG	40…29920	-28…150	17,2 бар	4…20 мА; HART	от 14000
Vortex RWG	40…1008	-28…150	17,2 бар	4…20 мА; HART	от 10000
Rosemount 205 1CFA	до 1000	-184…677	25 МПа	4…20 мА; HART	-
VA 420	до 1450	-30…80	16 бар	4…20 мА	от 5000

Проведя анализ технических характеристик преобразователей расхода, делаем вывод о том, что расходомер типа Vorte RWG подходит для измерения расхода первичного воздуха, а расходомер типа Vorte RNG подходит для измерения расхода вторичного воздуха, поступающего в систему. Данные приборы подходят по диапазону измерения и погрешности измерения.

2.3.3 Выбор газоанализатора

Для контроля качества процесса горения в системе предусмотрена установка газоанализатора для контроля содержания кислорода в дымовых газах. Рассмотрим два типа газоанализаторов [61, 62]:

- газоанализатор фирмы «АГАВА» типа АКГ-МП-2П;
- газоанализатор фирмы «ЭКСИС» типа МАГ-6 Т-8-В-16А.

Технические характеристики данных технический средств измерения расхода представлены в таблице 2.8.

Таблица 2.8 – Основные технические характеристики газоанализаторов

Наименование	Измеряемые газы	Количество каналов измерения	Выходной сигнал	Цена, руб.
МАГ-6 Т-8-В-16А	аммиак; диоксид азота; диоксид серы; диоксид углерода; кислород; метан; монооксид углерода; сероводород.	1	4…20, 0…5, 0…20 мА; RS-232, RS-485 и USB	21500
АКГ-МП-2П	аммиак; диоксид азота; диоксид серы; диоксид углерода; кислород; метан; монооксид углерода; сероводород.	2	4…20, 0…5, 0…20 мА; RS 232, RS-485 и Ethernet	11900

Проведя анализ технических характеристик преобразователей расхода, делаем вывод о том, что газоанализатор типа АКГ-МП-2П подходит для измерения содержания кислорода в дымовых газах. Выбор обусловлен его ценой, а также резервным измерительным каналом.

2.3.4 Выбор регулирующего устройства

В качестве регулирующего устройства используется микропроцессорный контроллер. В рамках данной работы рассмотрим 3 контроллера от различных производителей, таких как: «ОВЕН»; «ЭлеСи»; «Siemens» [63–65]. Для реализации задачи необходимо 14 аналоговых входов, 6 дискретных входов, интерфейсные порты, а также 8 дискретных

выходов. Также необходимо учитывать цену контроллера. Проведем сравнение характеристик контроллеров этих производителей. Для начала рассмотрим ПЛК фирмы «Siemens», цена которого составляет 59000 рублей. Применяется для решения задач автоматизации среднего уровня. Исполнение контроллера блочно-модульное. Технические характеристики S7-200 приведены в таблице 2.9.

Таблица 2.9 – Технические характеристики контроллера S7-200

Центральные процессоры	CPU 221	CPU 222	CPU 224	CPU 224XP	CPU 226
1	2		3	4	5
Объем памяти программ (EEPROM), КБ (вкл/выкл редактирование в режиме RUN)	4		8 / 12	12 / 16	16 / 24
Объем памяти данных, КБ	2		8	10	
Время выполнения инструкций	0,2 мкс				
Арифметика с плавающей запятой	Поддерживается				
ПИД-регулирование	Поддерживается				
Скоростной счет, кГц	4x30		6x30	4x30 +2x200	6x30
Импульсные выходы, кГц	2x20			2x100	2x20
	только в моделях с транзисторными выходными каскадами				
Количество таймеров / счетчиков / флагов	256/256/256				
Часы	Опциональный картридж		Встроенные		
Макс. кол-во входов-выходов системы	6 DI + 4 DO	40 DI + 38 DO; 8(0)AI + 2(4)AO	94 DI + 74 DO; 28(0)AI+7(14)AO	94 DI + 74 DO; 30(2)AI + 8(15)AO	128 DI + 120 DO; 28(0)AI + 7(14)AO
Выходной ток встроенного блока питания	180 мА		280 мА		400 мА

Продолжение таблицы 2.9

Центральные процессоры	CPU 221	CPU 222	CPU 224	CPU 224XP	CPU 226
1	2		3	4	5
Кол-во встроенных портов RS 485	1		2		
Кол-во модулей расширения, не более	–	2	7		

ПЛК63 компании «ОВЕН» предназначен для управления технологическим процессом непосредственно с лицевой панели контроллера с помощью встроенного текстового монохромного дисплея – для конфигурирования вывода и задания значения параметров программы, информации о ходе процесса и сигнализации и 9 кнопок управления - для управления индикацией задания значения параметров.

Встроена батарея бесперебойного питания, позволяющая выполнять программу при пропадании питания, и переводить выходные элементы в безопасное состояние. Данный ПЛК в основном применяется для локальных систем автоматизации, в частности для котельных и различных небольших установок.

Имеется 5 различных типов выходных элементов, которые можно выбрать при заказе контроллера, а также универсальные аналоговые входы для подключения широкого спектра датчиков и встроенные интерфейсы RS – 485, RS – 232. В качестве выходных устройств выбираем 5 цифроаналоговых преобразователей, с аналоговым выходным сигналом 0…10 В. В таблице 2.10 приведена характеристика контроллера.

Таблица 2.10 – Технические характеристики ОВЕН ПЛК63

Наименование контроллера	ОВЕН 63
Питание	
Напряжение питания	~220 В, 50 Гц; 24 В
Потребляемая мощность, для переменного тока, ВА	18
Параметры встроенного вторичного источника питания, выходное напряжение, В	24±3
Цифровые (дискретные) входы	
Количество входов	8
Аналоговые входы	
Количество аналоговых входов	8
Разрядность АЦП, бит	15
Среда программирования	Xcos

Контроллер «Элсима» производства компании «Элеси» предназначен для работы в малых системах автоматизации с количеством входных-выходных сигналов не более 100. Алгоритм работы контроллера определяется управляющей программой, разрабатываемой пользователем в соответствии с требованиями к системе управления, создаваемой с использованием контроллера. Контроллер представляет собой функциональное законченное изделие, имеющее необходимое количество входных и выходных каналов, конфигурируемых на различные виды входных и выходных сигналов, включая:

- дискретный вход сигналов различной полярности относительно общего проводника;

- дискретный выход сигналов типа "Общий коллектор" и "Сухой контакт";

- вход непрерывных сигналов, представленных напряжением постоянного тока, постоянным током, термопреобразователями и импульсными сигналами;

- выход непрерывных сигналов, представленных напряжением постоянного тока и постоянным током.

При необходимости, для увеличения количества сигналов, контроллер позволяет подключать модули удаленного ввода-вывода серии Элсима и аналогичные. Основная область применения – малые системы автоматического и автоматизированного управления технологическими процессами в областях, таких как, управление климатическим оборудованием, управление малыми станками и механизмами, автоматизация котельных и других отраслях. Контроллер обеспечивает непрерывный необслуживаемый режим работы в условиях естественной вентиляции. В таблице 2.11 приведены технические характеристики контроллера Элсима-М01.

Таблица 2.11 – Технические характеристики контроллера Элсима-М01

Процессор	
Тип процессора	Cortex ARM8
Тактовая частота	300 МГц
Память	
Объем оперативной памяти RAM	128 Мбайт
Объем flash-памяти	128 Мбайт
Объем энергонезависимой памяти	32 Кбайт
Поддержка microSD	до 32 Гбай
Коммуникации	
Кол-во портов Ethernet	2 (протоколы Modbus TCP/IP, NTP)
Кол-во портов RS-485	1 (протокол Modbus RTU
Кол-во портов USB	2
Электрические параметры (зависят от исполнения)	
Напряжение питания от источника постоянного тока	20…28 В
Встроенный источник питания датчиков	+24 В
Потребляемая мощность, не более	7 Вт

Продолжение таблицы 2.11

Ввод/вывод	
Дискретных входов	20 шт.
Количество гальванически развязанных групп	2 группы
Количество дискретных выходов тип "Открытый коллектор" (одна группа)	4 шт.
Количество гальванически разделенных групп дискретных выходов, тип "Реле"	2 группы
Количество дискретных выходов, тип "Реле", в одной группе	2 шт.
Количество универсальных аналоговых входов	4 шт.
Количество аналоговых выходов	2 шт.
Количество групп аналоговых выходов	1 группа
Механические характеристики	
Материал корпуса	Металлический
Размеры, ШхВхГ, мм	160x116x59
Масса, кг, не более	0,4
Монтаж	На горизонтальную DIN-рейку
Охлаждение	Естественное
Средняя наработка на отказ ч., не менее	80000
Средний срок службы, не менее, лет	12
Окружающая среда	
Рабочая температура, ˚С	-40…+60
Температура пуска изделия, ˚С	0…+60
Температура хранения, ˚С	-40…+50
Влажность, % (при температуре +40 °С)	50…95
Атмосферное давление, кПА (мм рт. ст.)	84,0…106,7 (630…800)

Проведя анализ технических характеристик, сделаем выбор в пользу контроллера Элсима-М01 с тремя модулями расширения (для модуля удаленного ввода-вывода аналоговых сигналов Элсима-А01 и один модуль удаленного ввода-вывода дискретных сигналов Элсима-D01). Данный контроллер полностью удовлетворяет требованиям системы, а также обладает не высокой ценой 33436 руб.

2.3.5 Выбор исполнительного механизма

Исполнительный механизм выбираем исходя из вида регулирующего органа и крутящего момента [53].

Выбираем ИМ типа МЭО-16/12,5-0,25-Р-99 [66] с номинальным значением момента на выходном валу 16 Н·м, номинальное значение

полного хода 0,25 об., номинальное значение времени полного хода 12,5 с. Данный исполнительный механизм снабжен датчиком положения выходного вала и функцией ручного управления. Питание данного исполнительного механизма осуществляется от сети переменного тока 220 В. Цена составляет 19000 рублей.

Для регулирования расхода воздуха выбираем ИМ типа МЭОФ-630/25-0,25-Р-97 [66] с номинальным значением момента на выходном валу 630 Н·м, номинальное значение полного хода 0,25 об., номинальное значение времени полного хода 25 с. Данный исполнительный механизм снабжен датчиком положения выходного вала и функцией ручного управления. Питание данного исполнительного механизма осуществляется от сети переменного тока 220 В. Цена составляет 56400 рублей.

2.3.6 Выбор блока управления исполнительным механизмом

В качестве блока управления исполнительным механизмом будем использовать интеллектуальный блок серии БУЭР1-30-02, выполняющий пуск, реверс и останов однофазных электродвигателей.

Блоки типа БУЭР, выпускаются ЗАО «Волмаг» и являются аналогами известных пускателей типа ПБР. Блоки данного типа позволяют работать в режиме повторно-кратковременного включения. В состав блока входит микропроцессор, два интерфейсных канала RS-485, поддерживающих протокол Modbus, и преобразователь питания.

Выберем два блока БУЭР1-30-02.

3. Разработка щита управления системы автоматического управления

3.1 Разработка электрической схемы соединений щита управления

Схема соединений показывает все устройства и элементы, входящие в состав изделия. На схеме изображаются все устройства и элементы, входящие в схему, а также соединения между ними. Устройства изображаются в виде прямоугольников, элементы – в виде условных графических изображений, установленных в ЕСКД. Около условных графических обозначений устройств и элементов указывают позиционные обозначения, присвоенные им на принципиальной схеме. На схеме необходимо указывать обозначения выводов(контактов) элементов, нанесенные на изделие или установленные в документации изделия. Проводам, жгутам, кабелям на схеме присваиваются порядковые номера. Нумерация проводится в пределах изделия отдельно для кабелей и проводов. Допускается сквозная нумерация в пределах изделия.

Для разработки схемы необходимо выполнить ряд действий:

1) нанести на схему технические средства автоматизации с соответствующими стандартами;

2) произвести соединение проводок с клеммами устройств по требованиям завода изготовителя оборудования;

3) произвести нумерацию проводников.

При выполнении схемы используем развернутые изображения элементов технических средств. Расположение графического текстового материала выбрано для облегчения чтения этого чертежа. Электрическая схема соединений выполнена с применением условных графических изображений.

Линии связи состоят только из горизонтальных и вертикальных отрезков и имеют минимальное число взаимных пересечений. Расстояние между соседними параллельными линиями не менее 5 мм.

Для однозначной записи в сокращенной форме сведений об элементах и устройствах применяются условно буквенные обозначения согласно ЕСКД ГОСТ 2.710-81. Прописные буквы, а также цифры латинского алфавита присвоены элементам схемы согласно их назначению. На основании принятых обозначений составлен перечень элементов.

В данном разделе была разработана электрическая схема соединений АСР процесса сжигания эмульгированного топлива, которая приведена на листах с шифром ФЮРА.421000.020 Э3.

Питание устройств внутри щита осуществляется с помощью блока питания 24 В. Для ввода аналоговых сигналов в щите предусмотрены разделительные преобразователи ET-422, которые обеспечивают гальваническую развязку цепей контроллера и полевых цепей, сигнал с которых поступает на соответствующие блоки контроллера. Для ввода дискретных сигналов служат устройства защиты дискретных каналов ввода/вывода от помех BZ2-24DC. Для выдачи управляющих сигналов используются релейные выходы, а также реле.

3.2 Разработка монтажной схемы системы автоматического управления

Монтажная документация предназначена для выполнения монтажных работ. Эту документацию также используют в процессе эксплуатации, наладке, ремонте и выполнения профилактических работ. Для сложных систем автоматизации отдельно выполняют монтажные схемы щитов, пультов, внешних электрических и трубных проводок. Монтажные схемы внешних электрических проводок приведены на листе с шифром ФЮРА.421000.020 С4.

Монтажная документация, разрабатываемая в процессе проектирования систем автоматического регулирования, включает в себя:

1) монтажную документацию щитов и пультов;

2) монтажную документацию внешних электрических и трубных проводок.

Монтажные схемы, показывают каким образом соединены между собой клеммы или выводы технических средств, расположенных:

1) на конструкции;

2) за пределами конструкций.

Для разработки монтажной документации используются следующие материалы:

1) функциональная схема;

2) принципиальная электрическая схема;

3) техническая документация заводов изготовителей средств автоматизации и других средств;

4) общие виды щитовых и других конструкций.

В данной работе необходимо разработать монтажную схему автоматической системы регулирования процесса сжигания эмульгированного топлива, для этого нужно выполнить следующие этапы:

- нанести на монтажную схему технические средства автоматизации, в соответствии с принятыми обозначениями;

- выбрать проводки для соединения технических средств;

- произвести нумерацию проводников в соответствие с электрической схемой;

- выполнить подключения средств измерения и управления в шкаф автоматизации.

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

Датчики температуры и исполнительный механизм изображены монтажными символами в соответствии с заводскими инструкциями. При этом, внутри монтажных символов указаны номера зажимов и подключение

к ним жил кабелей, причем, изображены только использующиеся клеммы. Маркировка жил нанесена вне монтажного символа.

Щит автоматизации изображен в виде прямоугольника в нижней части чертежа. В прямоугольнике показаны блоки зажимов, а также подключенные к ним жилы кабелей и провода с соответствующей маркировкой.

Первичные преобразователи, внещитовые приборы и шкаф управления соединены между собой электрическими линиями связи, выполненными с помощью электрических кабелей, проводов и жгутов проводов.

Присвоены порядковые номера средств системы автоматизации. Проводники, подключаемые к зажимам и клеммам технических средств, маркированы в соответствии с электрической схемой.

К внешним электрическим и трубным проводкам относят такие проводки, которые расположены за пределами щитов и пультов.

Целью проектирования внешних и внутренних электрических и трубных проводок является создание монтажной документации, необходимой и достаточной для прокладки трубных и электропроводок, коммутации токоведущих жил и труб к техническим средствам автоматизации и вспомогательным элементам, проверки проводок и ввода их в эксплуатацию.

Для информационных линий выбираем кабели типа КРВГ производства «Камкабель» [67] сечением 1 мм^2. Все технические средства подключаются сначала к соединительным коробкам КСК-16 и КСК-8 с помощью кабелей КРВГ 4×1, а далее собираются в единые кабели КРВГЭ 19×1,5 и КРВГЭ 10×1,5 соответственно, которые уже подключаются в щит автоматизации.

Для связи контроллера с блоком управления используются кабели симметричной парной скрутки, использующиеся для связи по интерфейсу RS-485, КИПЭВ 2×2×0,6 в общем экране из алюмолавсановой ленты с контактным проводником. Кабель соответствует строгим требованиям

пожарной безопасности, не поддерживает горение при условии одиночной прокладки.

Выбранные кабели, а также их технические характеристики представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Характеристики проводов и кабелей электропроводки САУ

№ линии	Марка	Кол-во жил	Номинальное сечение, мм^2	Диаметр, мм
1-8, 10-13, 15, 16, 19-25	КРВГ	4	1	10,7
9	КРВГЭ	10	1,5	13,3
14	КРВГЭ	19	1,5	15,9

Для защиты кабелей, которые необходимо протянуть на большие расстояния, применяем защитные трубы. В качестве защиты кабелей выбираем стальные электросварные тонкостенные трубы по ГОСТ 10704-91, которые следует применять в сухих и влажных помещениях, а также при открытой и скрытой прокладке в жарких, пыльных пожароопасных помещениях. Для кабелей линий питания защитные трубы не выбираются, так как кабели изначально бронированные.

При определении внутреннего диаметра защитной трубы, необходимой для данной конкретной проводки, учитываем диаметр кабеля, проходящего в ней. Причем для удобства протяжки кабелей через трубы, внутренний диаметр должен быть в 1,5 раза больше диаметра кабеля. Таким образом, защитные трубы выбираем по внешнему диаметру с учетом толщины стенки из стандартного ряда.

Тогда для кабелей КРВГ 4х1

$$D \geq 1{,}5 \cdot 10{,}7 = 16{,}05,$$

выбираем защитную трубу диаметром D = 18 мм с толщиной стенки δ = 1 мм.

Для кабеля КРВГЭ 10х1,5

$$D \geq 1{,}5 \cdot 13{,}3 = 19{,}95,$$

выбираем защитную трубу диаметром D = 20 мм с толщиной стенки δ = 1,2 мм.

Для кабеля КРВГЭ 19х1,5

$$D \geq 1{,}5 \cdot 15{,}9 = 23{,}85,$$

выбираем защитную трубу диаметром D = 26 мм с толщиной стенки δ = 1,4 мм.

Схема монтажная внешних электрических проводок, представлена на листе с шифром ФЮРА.421000.020 С4.

3.3 Разработка общего вида щита управления

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, линий связи между ними (трубная и электрическая коммутация) и т.п.

Щиты устанавливаются в производственных и специальных щитовых помещениях: операторских, диспетчерских, аппаратных 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, в том числе степень защиты от прикосновения к токоведущим частям, в операторском помещении применим для монтажа средств автоматизации разрабатываемой системы регулирования шкаф TE 8000 производства компании Rittal [68].

В данном случае для размещения средств автоматизации используем щит высотой 2000 мм, шириной 800 мм и глубиной 800 мм TE 8000. Фасадная сторона щитов (шкафных и панельных с каркасом) разбита на два функциональных поля. Разбивка выполнена на основе рационального

распределения приборов, органов управления и сигнальной арматуры. Высота шкафа позволяет без труда получить доступ ко всем узлам.

Чертеж общего вида одиночного щита содержит вид спереди, вид на внутренние плоскости, перечень составных частей.

Блоки контроллера монтируются в верхней части щита управления. Все остальные блоки, входящие в состав системы предназначены для монтажа на рейку DIN-35 В нижней части панели щита расположены сборники клеммных колодок.

Общий вид щита представлен на листе с шифром ФЮРА.421000.020 ВО.

4. Расчет параметров настройки регулятора

4.1 Идентификация объекта управления

Идентификация объекта управления предназначена для получения математической модели объекта управления. В инженерной практике применяют активную идентификацию. При активной идентификации на объект подаются заранее известные возмущающие воздействия и регистрируется выходная величина.

В данной работе для получения кривой разгона была использована динамическая модель изменения температуры в камере сгорания, составленная на базе экспериментальных исследований, проведенных на реальном объекте. Кривая разгона приведена на рисунке 4.1.

На полученной кривой разгона определяем динамические параметры объекта, такие как: постоянная времени; запаздывание, коэффициент передачи.

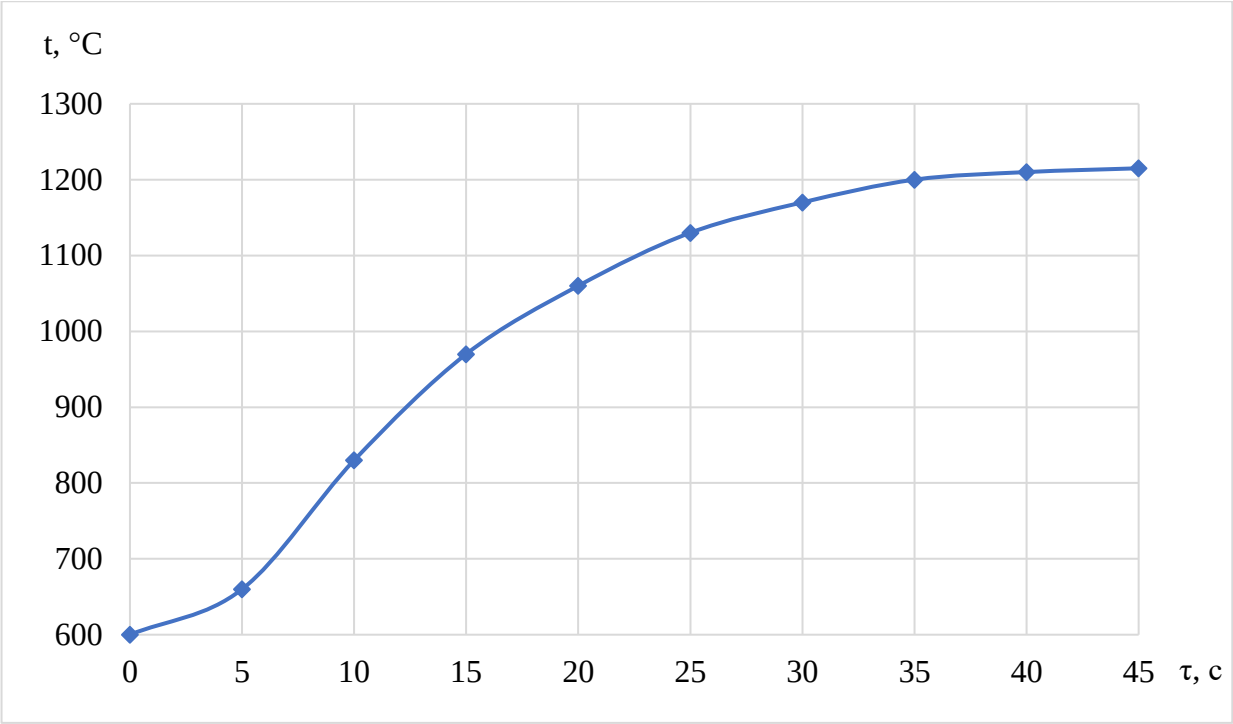


Рисунок 4.1 – Кривая разгона объекта управления

Передаточная функция для кривой представляет собой апериодическое звено с запаздыванием:

$$W(P) = \frac{k}{(TP+1)} e^{-P\tau}, \tag{4.1}$$

где k – коэффициент усиления;

P – оператор Лапласа;

τ – время запаздывания;

T – постоянная времени.

Решение уравнения 4.1 при нулевых начальных условиях представляет собой:

$$\begin{cases} h(t) = 0 & 0 \le t \le \tau, \\ h(t) = h(\infty)\left[1 - e^{-\frac{t-\tau}{T}}\right] & t > \tau. \end{cases} \tag{4.2}$$

В данной системе два неизвестных: значения времени запаздывания τ и постоянная времени T.

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

$$T = -\frac{t_A - \tau}{\ln(1-h_A)}, \quad (4.3)$$

$$\tau = \frac{t_Б \ln(1-h_A) - t_A \ln(1-h_Б)}{\ln(1-h_A) - \ln(1-h_Б)}, \quad (4.4)$$

где t_A и $t_Б$ – значение времени при соответствующих точках на кривой;
h_A и $h_Б$ – значение ординат при точках А и Б.

Определяем расположение на кривой точек А и Б и находим необходимые неизвестные параметры.

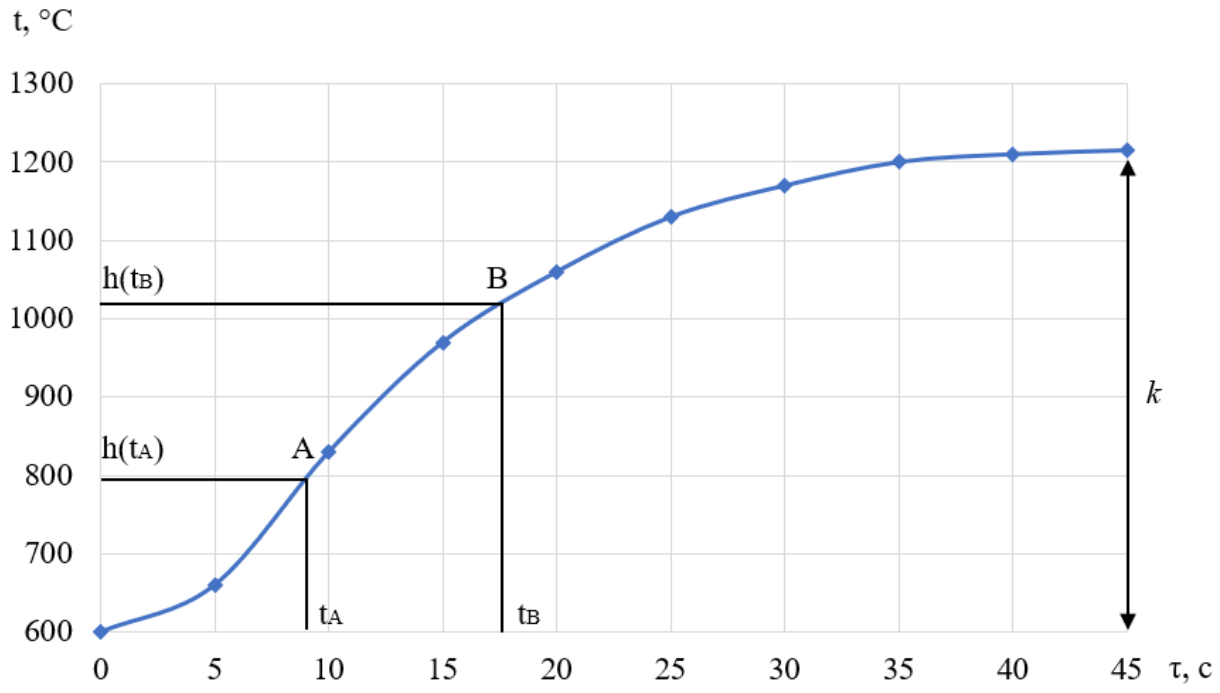


Рисунок 4.2 – Определение точек на кривой разгона для расчета параметров регулятора, где τ – время, t – температура в камере сгорания

Для наглядности и точности производится аппроксимация кривой по методу Орманна. Определяется время $t_В$ 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:

$$\tau = 0{,}5(3t_A - t_B), \quad (4.5)$$

$$T = \frac{t_B - \tau}{1.2} = 1{,}25(t_B - t_A). \quad (4.6)$$

Определяем значения по кривой разгона:

$$\tau = 0{,}5(3 \cdot 9 - 17{,}5) = 4{,}8 \text{ с},$$

$$T = 1{,}25(17{,}5 - 9) = 10{,}6 \text{ с}.$$

Передаточная функция имеет вид:

$$W(P) = \frac{610}{(10{,}6P+1)} e^{-4{,}8P}.$$

4.2 Расчет параметров настройки регулятора

На рисунке 4.3 представлен вид структурной схемы системы регулирования.

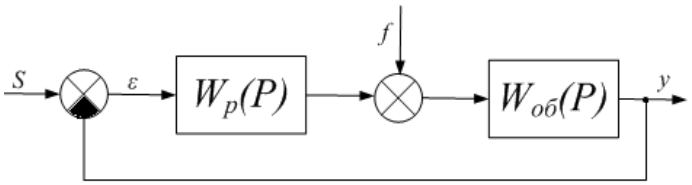


Рисунок 4.3 – Структурна схема системы регулирования

Расчет системы производится для степени устойчивости равной ψ=0,75.

Определяем значение степени колебательности:

$$m = -\frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \ln(1 - \psi) = -\frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \ln(1 - 0{,}75) = 0{,}221. \quad (4.7)$$

Передаточная функция объекта регулирования описывается формулой:

$$W(P) = \frac{610}{(10{,}6P+1)} e^{-4{,}8P}.$$

Полученные расширенные частотные характеристики объекта представлены в таблице 4.1 в виде листинга расчета. Полученные значения представлены для диапазона частот 0…0,34 $с^{-1}$, с шагом по частоте в 0,01 $с^{-1}$.

Таблица 4.1 – Расширенные частотные характеристики объекта

ω, $с^{-1}$	$Re_{об}(m,ω)$	$Im_{об}(m,ω)$	$A_{об}(m,ω)$
0,00	610,000	0,000	610,000
0,01	619,975	-97,584	627,608
0,02	606,744	-197,612	638,114
0,03	570,345	-292,278	640,875
0,04	514,120	-374,529	636,075
0,05	443,788	-439,594	624,652
0,06	365,893	-485,611	608,026
0,07	286,379	-513,292	587,777
0,08	209,752	-525,030	565,378
0,09	138,888	-523,950	542,046
0,1	75,254	-513,201	518,689
0,11	19,297	-495,558	495,934
0,12	-29,186	-473,274	474,173
0,13	-70,752	-448,076	453,628
0,14	-106,113	-421,237	434,397
0,15	-136,017	-393,662	416,498
0,16	-161,173	-365,980	399,898
0,17	-182,228	-338,615	384,535
0,18	-199,747	-311,844	370,332
0,19	-214,220	-285,838	357,203
0,2	-226,063	-260,698	345,063
0,21	-235,630	-236,475	333,830
0,22	-243,218	-213,188	323,425
0,23	-249,078	-190,832	313,778
0,24	-253,422	-169,390	304,820
0,25	-256,428	-148,837	296,493
0,26	-258,250	-129,142	288,740
0,27	-259,015	-110,275	281,513
0,28	-258,834	-92,203	274,766
0,29	-257,801	-74,894	268,460
0,3	-255,998	-58,320	262,557
0,31	-253,496	-42,452	257,026
0,32	-250,356	-27,264	251,836
0,33	-246,633	-12,733	246,961
0,34	-242,374	1,162	242,377

Параметры настройки ПИ-регулятора рассчитываются как:

$$\frac{K_P}{T_u} = -\frac{\omega\cdot(m^2+1)\cdot Im_{об}(m,\omega)}{A^2_{об}(m,\omega)}, \quad (4.8)$$

$$K_p = -\frac{m\cdot Im_{об}(m,\omega)+Re_{об}(m,\omega)}{A^2_{об}(m,\omega)}, \quad (4.9)$$

где T_u – постоянная интегрирования регулятора,

K_P – коэффициент передачи регулятора.

Полученные значения представлены в таблице 4.2 в виде листинга расчета.

Таблица 4.2 – Значение параметров ПИ – регулятора

ω, $с^{-1}$	$K_р$	$K_р/T_и$
0,00	-0,001639	0,000000
0,01	-0,001519	0,000003
0,02	-0,001383	0,000010
0,03	-0,001231	0,000022
0,04	-0,001066	0,000039
0,05	-0,000888	0,000059
0,06	-0,000699	0,000083
0,07	-0,000501	0,000109
0,08	-0,000293	0,000138
0,09	-0,000079	0,000168
0,1	0,000142	0,000200
0,11	0,000367	0,000232
0,12	0,000595	0,000265
0,13	0,000825	0,000297
0,14	0,001056	0,000328
0,15	0,001286	0,000357
0,16	0,001514	0,000384
0,17	0,001738	0,000408
0,18	0,001959	0,000429
0,19	0,002174	0,000446
0,2	0,002382	0,000459
0,21	0,002583	0,000467
0,22	0,002776	0,000470
0,23	0,002958	0,000468
0,24	0,003130	0,000459
0,25	0,003291	0,000444
0,26	0,003440	0,000422
0,27	0,003576	0,000394
0,28	0,003698	0,000359
0,29	0,003807	0,000316

Продолжение таблицы 4.2

ω, $с^{-1}$	$K_р$	$K_р/T_и$
0,3	0,003901	0,000266
0,31	0,003979	0,000209
0,32	0,004043	0,000144
0,33	0,004090	0,000072
0,34	0,004121	-0,000007

Для удобства и визуализации строится зависимость от полученных параметров, представленная на рисунке 4.4. Полученная кривая на рисунке, является линией для степени затухания равной 0,75. Все значения параметров настройки, которые будут лежать на этой кривой, будут обеспечивать заданную степень затухания.

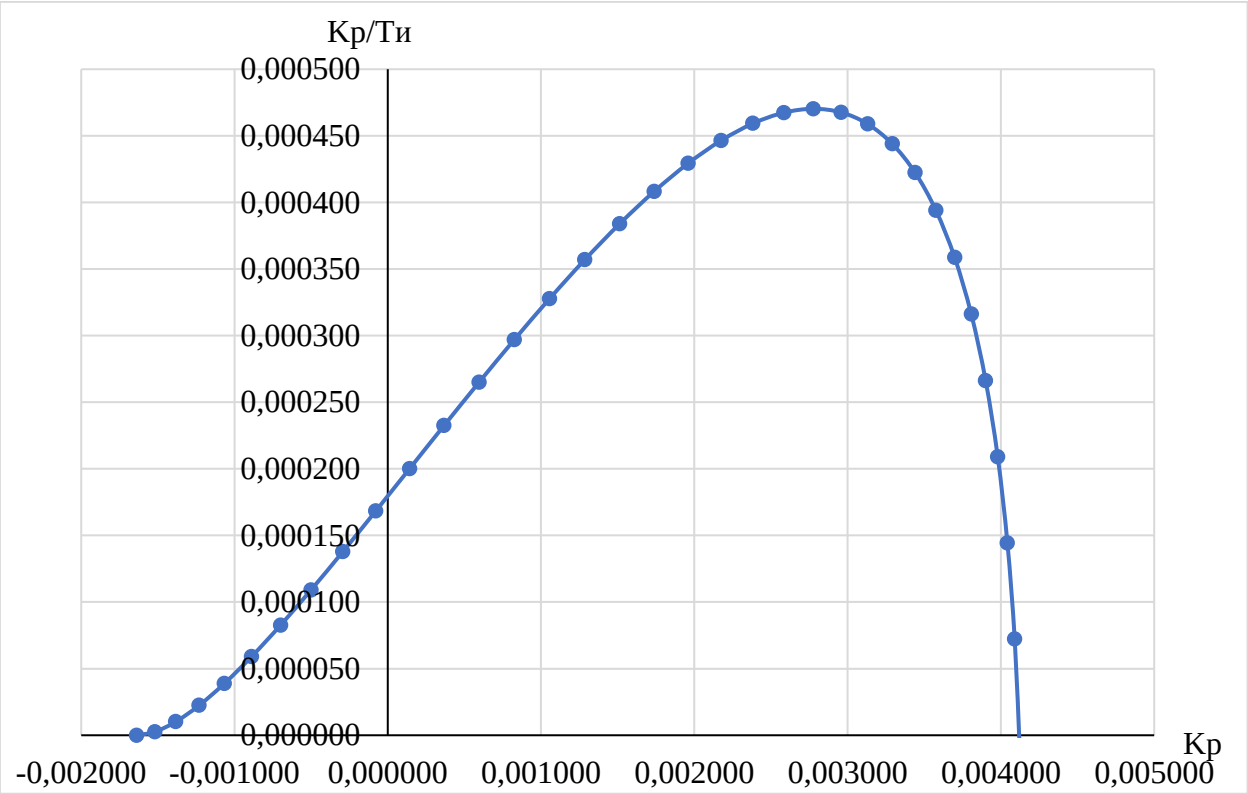


Рисунок 4.4 – Параметры настройки ПИ-регулятора

В качестве критерия качества используется первая интегральная оценка. Минимальное значение этой оценки соответствует точке с

максимальным значением соотношения $К_р/Т_и$ на линии заданного запаса устойчивости.

Из таблицы 4.2 определяем:

max $\left(\frac{K_P}{T_u}\right)$= 0,00047, K_P=0,00296, резонансная частота ω= 0,23 $с^{-1}$.

Определяем значение постоянной интегрирования:

$$T_u = \frac{K_P}{K_P/T_u} = 6{,}3 \text{ с.} \quad (4.10)$$

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

Передаточная функция будет иметь вид:

$$W(P) = \frac{W_{об}(P)\cdot W_p(P)}{1+W_{об}(P)\cdot W_p(P)}, \quad (4.11)$$

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 4.5 представлен график вещественной частотной характеристики.

Переходная характеристика системы связана с вещественной частотной характеристикой системы выражением:

$$y(t) = \frac{2}{\pi}\cdot\int_0^{\infty}\frac{Re(\omega)}{\omega}\cdot\sin(\omega\cdot t)\cdot d\omega, \quad (4.12)$$

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 4.5 определяем это значение.

Конечный вид уравнения для определения переходного процесса системы имеет вид:

$$y(t) = \frac{2}{\pi} \cdot \int_0^{0,5} \frac{Re(\omega)}{\omega} \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot d\omega.$$

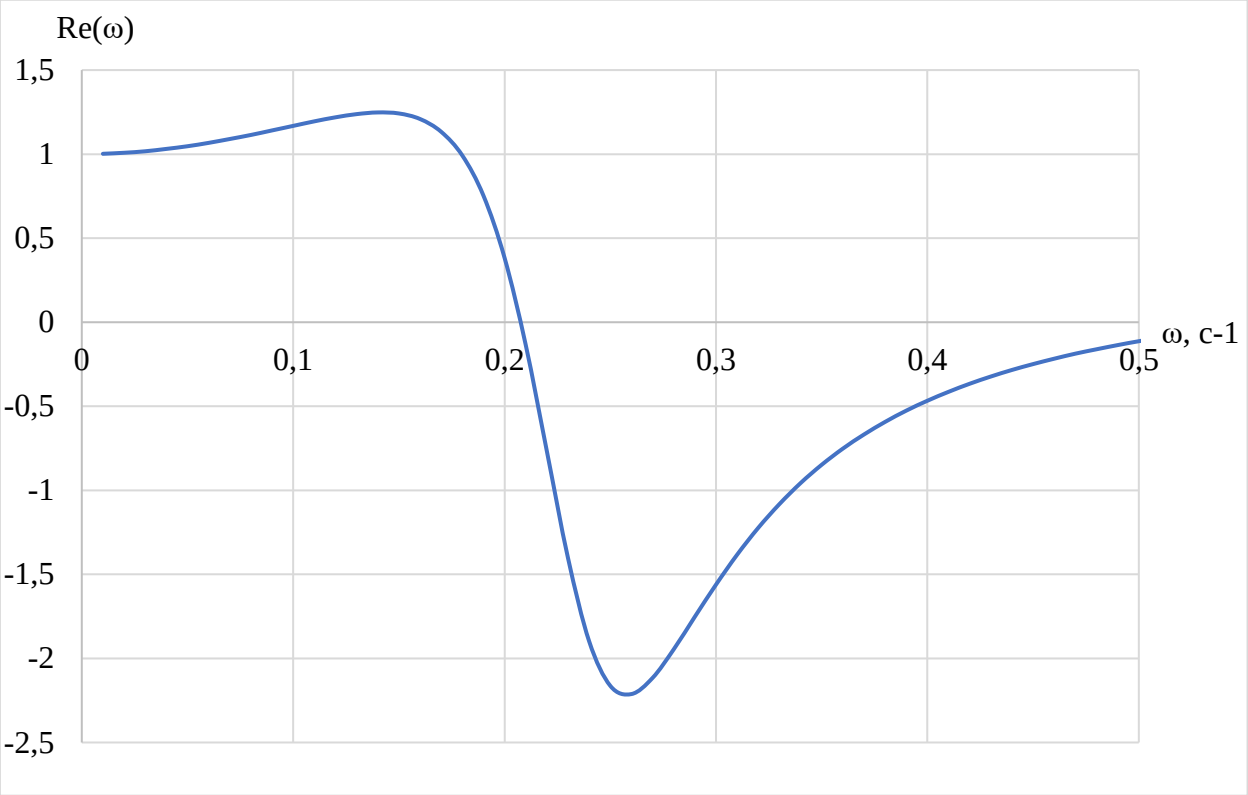


Рисунок 4.5 – Графическое представление вещественной частотной характеристики системы

На рисунке 4.6 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, предъявленным к системе.

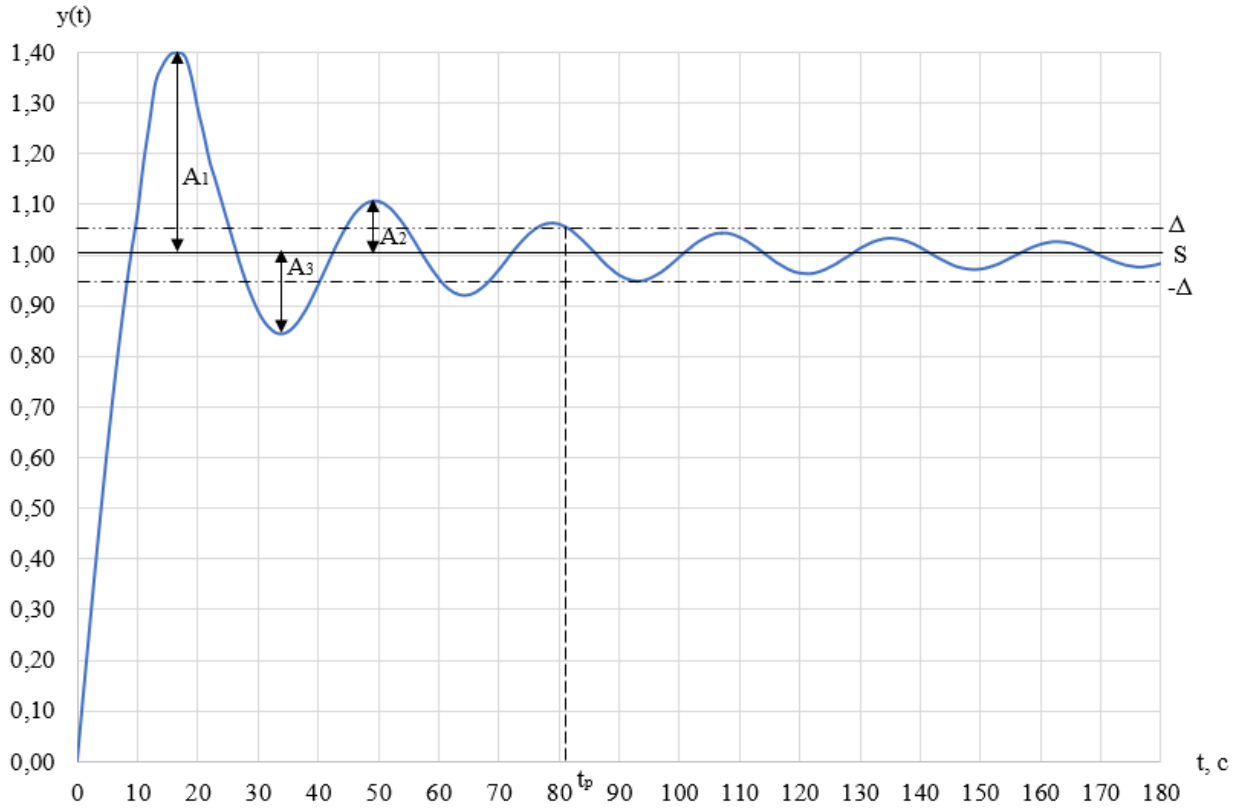


Рисунок 4.6 – Переходный процесс в системе по каналу задающего воздействия

С использованием графика определяются прямые оценки качества:

1) максимальная динамическая ошибка: A_1=0,4;

2) перерегулирование: $\sigma = \frac{A_3}{A_1} \cdot 100 = \frac{0,16}{0,4} \cdot 100 = 40\%$,

где A_3 = 0,16 – первое минимальное отклонение регулируемой величины;

3) динамический коэффициент регулирования $R_Д$:

$$R_Д = \frac{A_1 + y(\infty)}{K_{об}} \cdot 100 = \frac{0,4+1}{610} \cdot 100 = 0,23\%,$$

где $K_{об}$ = 610 – коэффициент передачи объекта;

4) степень затухания переходного процесса: $\psi = 1 - \frac{A_2}{A_1} = 1 - \frac{0,09}{0,4} = 0,77$,

где A_2 = 0,08 – второй максимальный выброс регулируемой величины;

5) статическая ошибка: $\varepsilon_{СТ} = y(\infty) = 0$;

6) время регулирования: $t_p = 82$ с.

5. Разработка мнемосхемы проекта

Мнемосхема представляет собой совокупность сигнальных устройств и сигнальных изображений оборудования и внутренних связей контролируемого объекта. Размещаются мнемосхемы на диспетчерских пультах, операторских панелях или выполняются на персональном компьютере. Мнемосхемы наглядно изображают структуру системы и облегчают оператору запоминание оператором схем объектов, взаимосвязь между параметрами, назначение приборов и органов управления. Требования, предъявляемые к мнемосхеме, устанавливает предприятие, для которого она предназначена. В данной работе схема разрабатывалась в соответствие с общими требованиями:

1) мнемосхема должна состоять из элементов, которые необходимы для управления и контроля объекта;

2) отдельные элементы или группы элементов, наиболее существенные для контроля и управления, должны выделяться размерами, формой, цветом;

3) элементы мнемосхемы должны быть понятными и интуитивными, хорошо видимыми.

Исходя из этих принципов была разработана мнемосхема процесса сжигания эмульгированного топлива в камере сгорания. Разработанная мнемосхема приведена на рисунке 5.1

В центральной части мнемосхема содержит условное изображение технологического процесса с указанием ключевых параметров. В левом верхнем углу расположена панель переключения режима управления, а также ползунок регулирования мощности установки, с помощью которого задается расход топлива. В нижней части расположена панель управления, с помощью

которой оператор может осуществлять включение и выключение основных агрегатов.

На мнемосхеме серый цвет ламп обозначает отключенное состояние, зеленый – включенное, желтый цвет сигнализирует аварию, красный сигнал означает опасность.

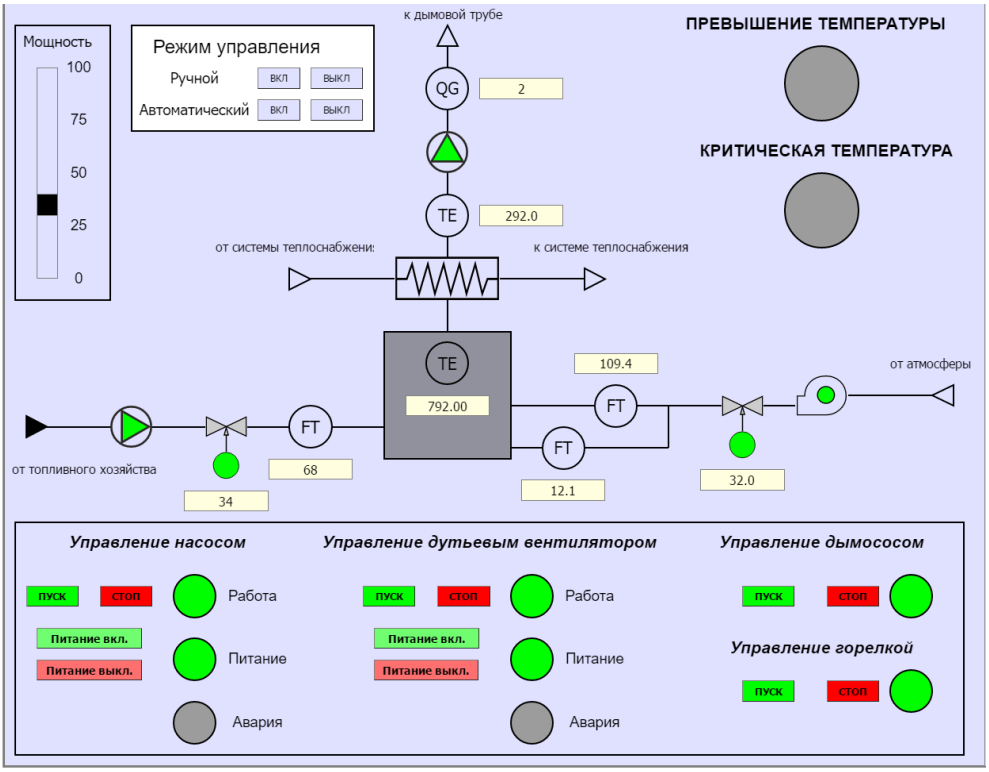


Рисунок 5.1 – Главное окно мнемосхемы

Помимо основного окна в системе присутствует окно, отображающее параметры теплообменника и окно, отображающее тренд изменения температуры в камере сгорания.

Кроме ламп на схеме используется индикация на самом объекте. Зеленый цвет насоса, вентилятора или дутьевого вентилятора означает, что оборудование запущено, серое – остановлено. Зеленый цвет клапана сигнализирует о том, что клапан открыт, а серый – закрыт. Вся сигнальная аппаратура связана с соответствующей переменной, значение которой определяет цвет индикатора.

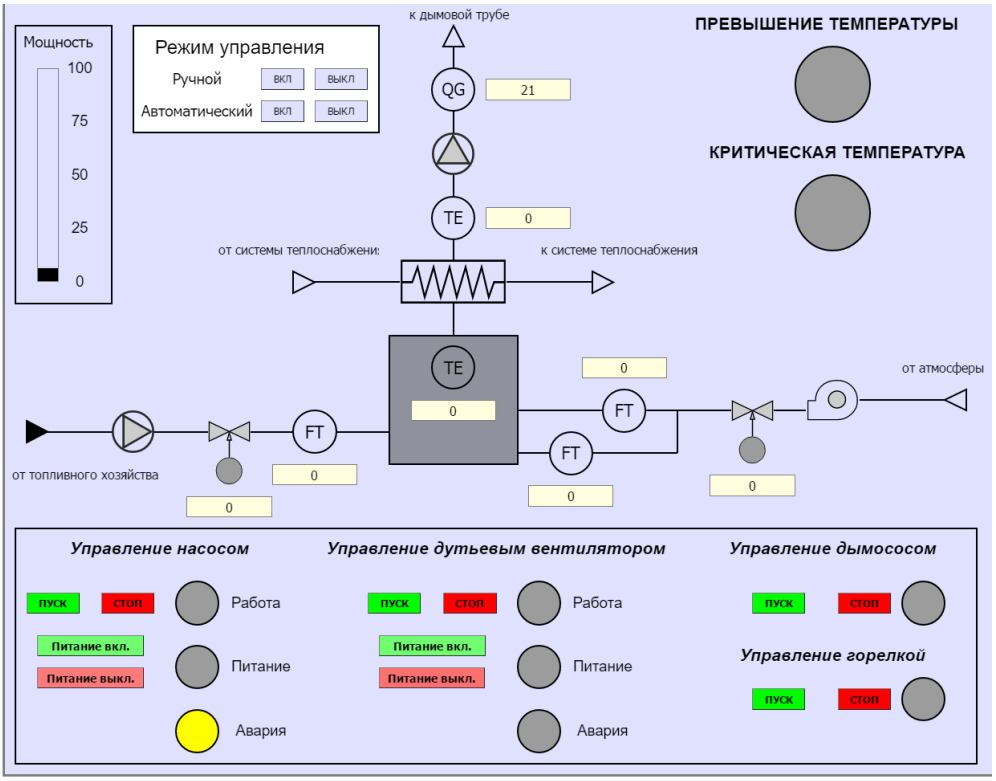


Рисунок 5.2 – Тестирование главного окна мнемосхемы в ручном режиме

Заключение

В результате выполнения выпускной квалификационной работы была разработана автоматическая система управления процессом сжигания эмульгированного топлива. Спроектированная система является двухуровневой. Полевой уровень включает датчики измерения температуры и расхода, а также запорную арматуру и исполнительные механизмы. На среднем уровне располагается контроллер.

В ходе выполнения дипломного проекта была разработана проектная документация: схема структурная, схема функциональная, схема принципиальная электрическая, схема монтажная и общий вид щита.

Проведены экспериментальные исследования взрывного дробления и измельчение капель эмульгированных топлив, а также влияние данных процессов на характеристики зажигания топлива. Исследовано влияние температуры греющей среды, размеров капель, а также концентрации горючей жидкости на характеристики данных процессов.

В пояснительной записке к выпускной квалификационной работу содержится подробное описание выбора основного оборудования, этапов разработки конструкторской документации и мнемосхемы. Кроме того, произведен расчет параметров настройки регулятора и определены прямые оценки качества, выполнены разделы «Социальная ответственность» и «Менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение».

Список использованных источников

1. Sazhin S. S. Modelling of fuel droplet heating and evaporation: Recent results and unsolved problems //Fuel. – 2017. – Т. 196. – С. 69-101.
2. Strizhak P. A., Volkov R. S. The integral characteristics of the deceleration and entrainment of water droplets by the counter flow of high-temperature combustion products //Experimental Thermal and Fluid Science. – 2016. – Т. 75. – С. 54-65.
3. Volkov R. S., Strizhak P. A. Motion of water droplets in the counter flow of high-temperature combustion products //Heat and Mass Transfer. – 2018. – Т. 54. – №. 1. – С. 193-207.
4. Kuznetsov G. V., Piskunov M. V., Strizhak P. A. How to improve efficiency of using water when extinguishing fires through the explosive breakup of drops in a flame: Laboratory and field tests //International Journal of Thermal Sciences. – 2017. – Т. 121. – С. 398-409.
5. Suzuki Y. et al. Visualization of aggregation process of dispersed water droplets and the effect of aggregation on secondary atomization of emulsified fuel droplets //Proceedings of the Combustion Institute. – 2011. – Т. 33. – №. 2. – С. 2063-2070.
6. Tarlet D., Josset C., Bellettre J. Comparison between unique and coalesced water drops in micro-explosions scanned by differential calorimetry //International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2016. – Т. 95. – С. 689-692.
7. Watanabe H. et al. The characteristics of puffing of the carbonated emulsified fuel //International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2009. – Т. 52. – №. 15-16. – С. 3676-3684.
8. Yin Z., Nau P., Meier W. Responses of combustor surface temperature to flame shape transitions in a turbulent bi-stable swirl flame //Experimental Thermal and Fluid Science. – 2017. – Т. 82. – С. 50-57.
9. Nau P. et al. Infrared absorption spectrometer for the determination of temperature and species profiles in an entrained flow gasifier //Applied optics. – 2017. – Т. 56. – №. 11. – С. 2982-2990.

10. Warncke K. et al. Experimental and numerical investigation of the primary breakup of an airblasted liquid sheet //International Journal of Multiphase Flow. – 2017. – Т. 91. – С. 208-224.
11. Tarlet D., Allouis C., Bellettre J. The balance between surface and kinetic energies within an optimal micro-explosion //International Journal of Thermal Sciences. – 2016. – Т. 107. – С. 179-183.
12. Tarlet D. et al. Distribution of thermal energy of child-droplets issued from an optimal micro-explosion //International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2014. – Т. 77. – С. 1043-1054.
13. Hoxie A., Schoo R., Braden J. Microexplosive combustion behavior of blended soybean oil and butanol droplets //Fuel. – 2014. – Т. 120. – С. 22-29.
14. Pan K. L. et al. On droplet combustion of biodiesel fuel mixed with diesel/alkanes in microgravity condition //Combustion and Flame. – 2009. – Т. 156. – №. 10. – С. 1926-1936.
15. Hou S. S. et al. Microexplosion and ignition of droplets of fuel oil/bio-oil (derived from lauan wood) blends //Fuel. – 2013. – Т. 113. – С. 31-42.
16. Javed I., Baek S. W., Waheed K. Effects of dense concentrations of aluminum nanoparticles on the evaporation behavior of kerosene droplet at elevated temperatures: The phenomenon of microexplosion //Experimental Thermal and Fluid Science. – 2014. – Т. 56. – С. 33-44.
17. Li H. et al. Experimental investigation on microexplosion of single isolated burning droplets containing titanium tetraisopropoxide for nanoparticle production //Proceedings of the Combustion Institute. – 2017. – Т. 36. – №. 1. – С. 1011-1018.
18. Wang C. H., Law C. K. Microexplosion of fuel droplets under high pressure //Combustion and Flame. – 1985. – Т. 59. – №. 1. – С. 53-62.
19. Wang C. H. et al. On the burning and microexplosion of collision-generated two-component droplets: miscible fuels //Combustion and flame. – 2003. – Т. 134. – №. 3. – С. 289-300.

20. Kuznetsov G. V., Piskunov M. V., Strizhak P. A. Evaporation, boiling and explosive breakup of heterogeneous droplet in a high-temperature gas //International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2016. – Т. 92. – С. 360-369.
21. Legros J. C., Lutoshkina O., Piskunov M. Vaporization of water droplets with non-metallic inclusions of different sizes in a high-temperature gas //International Journal of Thermal Sciences. – 2018. – Т. 127. – С. 360-372.
22. Wang C. H., Liu X. Q., Law C. K. Combustion and microexplosion of freely falling multicomponent droplets //Combustion and flame. – 1984. – Т. 56. – №. 2. – С. 175-197.
23. Li S. et al. Quantitative observation on characteristics and breakup of single superheated droplet //Experimental Thermal and Fluid Science. – 2017. – Т. 80. – С. 305-312.
24. Volkov R. S., Strizhak P. A. Using Planar Laser Induced Fluorescence to explore the mechanism of the explosive disintegration of water emulsion droplets exposed to intense heating //International Journal of Thermal Sciences. – 2018. – Т. 127. – С. 126-141.
25. Sazhin S. S. et al. A simple model for puffing/micro-explosions in water-fuel emulsion droplets //International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2019. – Т. 131. – С. 815-821.
26. Watanabe H. et al. The characteristics of puffing of the carbonated emulsified fuel //International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2009. – Т. 52. – №. 15-16. – С. 3676-3684.
27. Tarlet D. et al. Distribution of thermal energy of child-droplets issued from an optimal micro-explosion //International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2014. – Т. 77. – С. 1043-1054.
28. Kuznetsov G. V., Piskunov M. V., Strizhak P. A. Evaporation, boiling and explosive breakup of heterogeneous droplet in a high-temperature gas //International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2016. – Т. 92. – С. 360-369.

29. Lemoine F., Castanet G. Temperature and chemical composition of droplets by optical measurement techniques: a state-of-the-art review //Experiments in fluids. – 2013. – Т. 54. – №. 7. – С. 1572.
30. Castanet G., Labergue A., Lemoine F. Internal temperature distributions of interacting and vaporizing droplets //International Journal of Thermal Sciences. – 2011. – Т. 50. – №. 7. – С. 1181-1190.
31. Castanet G. et al. Evaporation of closely-spaced interacting droplets arranged in a single row //International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2016. – Т. 93. – С. 788-802.
32. Strizhak P. A. et al. Evaporation, boiling and explosive breakup of oil–water emulsion drops under intense radiant heating //Chemical Engineering Research and Design. – 2017. – Т. 127. – С. 72-80.
33. Piskunov M. V., Strizhak P. A. Using Planar Laser Induced Fluorescence to explain the mechanism of heterogeneous water droplet boiling and explosive breakup //Experimental Thermal and Fluid Science. – 2018. – Т. 91. – С. 103-116.
34. Kuznetsov G. V., Piskunov M. V., Strizhak P. A. Evaporation, boiling and explosive breakup of heterogeneous droplet in a high-temperature gas //International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2016. – Т. 92. – С. 360-369.
35. Kalogirou S. A. Seawater desalination using renewable energy sources //Progress in energy and combustion science. – 2005. – Т. 31. – №. 3. – С. 242-281.
36. Shannon M. A. et al. Science and technology for water purification in the coming decades //Nanoscience and technology: a collection of reviews from nature Journals. – 2010. – С. 337-346.
37. Kontorovich A. E., Epov M. I., Eder L. V. Long-term and medium-term scenarios and factors in world energy perspectives for the 21st century //Russian Geology and Geophysics. – 2014. – Т. 55. – №. 5-6. – С. 534-543.
38. Ismael M. A. et al. The effect of fuel injection equipment on the dispersed phase of water-in-diesel emulsions //Applied energy. – 2018. – Т. 222. – С. 762-771.

39. Mazlan N. A. et al. Effects of different water percentages in non-surfactant emulsion fuel on performance and exhaust emissions of a light-duty truck //Journal of cleaner production. – 2018. – Т. 179. – С. 559-566.
40. Seifi M. R. et al. Statistical evaluation of the effect of water percentage in water-diesel emulsion on the engine performance and exhaust emission parameters //Energy. – 2019.
41. Ithnin A. M. et al. An overview of utilizing water-in-diesel emulsion fuel in diesel engine and its potential research study //Journal of the Energy Institute. – 2014. – Т. 87. – №. 4. – С. 273-288.
42. Ocampo-Barrera R., Villasenor R., Diego-Marin A. An experimental study of the effect of water content on combustion of heavy fuel oil/water emulsion droplets //Combustion and flame. – 2001. – Т. 126. – №. 4. – С. 1845-1855.
43. Huang L. W., Chen C. H. Droplet ignition in a high-temperature convective environment //Combustion and flame. – 1997. – Т. 109. – №. 1-2. – С. 145-162.
44. Mura E. et al. Study of the micro-explosion temperature of water in oil emulsion droplets during the Leidenfrost effect //Experimental Thermal and Fluid Science. – 2012. – Т. 43. – С. 63-70.
45. Mura E. et al. Effect of Dispersed Water Droplet Size in Microexplosion Phenomenon Forwater in Oil Emulsion //Atomization and sprays. – 2010. – Т. 20. – №. 9.
46. Буланов Н. В. Взрывное вскипание диспергированных жидкостей //Екатеринбург: Изд-во УрГУПС. – 2011.
47. Antonov D. V., Volkov R. S., Strizhak P. A. An explosive disintegration of heated fuel droplets with adding water //Chemical Engineering Research and Design. – 2018. – Т. 140. – С. 292-307.
48. Antonov D. V., Piskunov M. V., Strizhak P. A. Breakup and explosion of droplets of two immiscible fluids and emulsions //International Journal of Thermal Sciences. – 2019. – Т. 142. – С. 30-41.
49. Лотош В. Е. Переработка отходов природопользования //Екатеринбург: Полиграфист. – 2007. – С. 101. – 232 с.

50. Бахонина Е. И. Современные технологии переработки и утилизации углеводородсодержащих отходов. Сообщение 1. Термические методы утилизации и обезвреживания углеводородсодержащих отходов //Башкирский химический журнал. – 2015. – Т. 22. – №. 1.
51. Пальгунов П. П., Сумароков М. В. Утилизация промышленных отходов. – Стройиздат, 1990. – 352 с.
52. Андык, В. С. Автоматизированные системы управления технологическими процессами на тэс : учебник для вузов / В. С. Андык. — Москва : Издательство Юрайт, 2018. — 407 с.
53. Волошенко А. В., Горбунов Д. Б. Проектирование функциональных схем систем автоматического контроля и регулирования: учебное пособие //Томск: Изд-во ТПУ. – 2008. – 108 с.
54. Метран. Каталог продукции 2018. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://mtn.nt-rt.ru свободный. – Загл. с экрана.
55. Овен. Каталог продукции. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.owen.ru/catalog свободный. – Загл. с экрана.
56. Каталог продукции ОАО «Endress+Hauser». – М.: Изд-во «Endress+Hauser», 2013. – 215 с.
57. Расходомер ультразвуковой РУС-1. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.nponauka.com/produktsiya/raskhodomery/ultrazvukovoj-raskhodomer-rus-1.html свободный. – Загл. с экрана.
58. CS Instruments. Каталог. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.cs-instruments.com/ru/downloads/catalogue/ свободный. – Загл. с экрана.
59. Badger Meter Россия. Каталог продукции. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://badgermeter.ru/index.php/product/manufacturer свободный. – Загл. с экрана.
60. Emerson. Контрольно-измерительные приборы. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.emerson.ru/ru-ru/automation/measurement-instrumentation свободный. – Загл. с экрана.

61. Агава. Контрольно-измерительные приборы. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.kb-agava.ru/kontrolno_izmeritelnye_pribory/ свободный. – Загл. с экрана.
62. Умные КИП от АО «Эксис». Каталог. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.eksis.ru/catalog/ свободный. – Загл. с экрана.
63. SIMATIC S7-200 Руководство по эксплуатации. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.ste.ru/siemens/contr.html свободный. – Загл. с экрана.
64. ПЛК63 Руководство по эксплуатации. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.owen.ru/uploads/rie_plk63_1001.pdf свободный. – Загл. с экрана.
65. ЭлеСи. Продукция. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://elesy.ru/products.aspx свободный. – Загл. с экрана.
66. Механизмы исполнительные электрические однооборотные. Руководство по эксплуатации. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.zeim.ru/production/docs/re/53.pdf свободный. – Загл. с экрана.
67. Электронный каталог продукции «Камкабель». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://kamkabel.ru/production/ свободный. – Загл. с экрана.
68. Новый системный каталог продукции Rittal. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.rittal.com/ru-ru/ebook/ru_cat35/index.html свободный. – Загл. с экрана.