

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа энергетики
 Направление подготовки 13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника
 Отделение школы (НОЦ) НОЦ И.Н. Бутакова

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
АСУ ТП горения гелеобразного топлива в камере сгорания перспективной энергогенерирующей установки

УДК: 658.512.4.011.56:662.758:662.61

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ03	Плешко Андрей Олегович		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ИШФВП	Глушков Дмитрий Олегович	к.ф.-м.н., доцент		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП ТПУ	Спицына Любовь Юрьевна	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ООД ТПУ	Сечин Александр Иванович	д.т.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель профиля ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор НОЦ И.Н. Бутакова	Стрижак Павел Александрович	д.ф.-м.н., профессор		

Планируемые результаты освоения выпускником образовательной программы магистратуры по направлению 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»

Код компетенции	Наименование компетенции
Универсальные компетенции	
УК(У)-1	Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий
УК(У)-2	Способен управлять проектом на всех этапах его жизненного цикла
УК(У)-3	Способен организовывать и руководить работой команды, вырабатывая командную стратегию для достижения поставленной цели
УК(У)-4	Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном(ых) языке(ах), для академического и профессионального взаимодействия
УК(У)-5	Способен анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия
УК(У)-6	Способен определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки
Общепрофессиональные компетенции	
ОПК(У)-1	Способен формулировать цели и задачи исследования, выявлять приоритеты решения задач, выбирать критерии оценки
ОПК(У)-2	Способен применять современные методы исследования, оценивать и представлять результаты выполненной работы
Профессиональные компетенции	
ПК(У)-1	Способен использовать глубокие естественнонаучные, математические и инженерные знания при предварительном анализе, проектировании, синтезе, ресурсоэффективной эксплуатации автоматизированных и автоматических систем управления теплоэнергетическими процессами, а также систем теплотехнических измерений и регистрации
ПК(У)-2	Способен разрабатывать комплекты проектной, конструкторской и эксплуатационной документации для сложных систем теплотехнических измерений и управления
ПК(У)-3	Способен интегрировать знания различных областей для разработки мероприятий по совершенствованию технологии производства, обеспечению экономичности, надежности и безопасности эксплуатации, ремонта и модернизации энергетического, теплотехнического и теплотехнологического оборудования
ПК(У)-4	Способен применять и совершенствовать фундаментальные и прикладные знания по современным динамично изменяющимся теплоэнергетическим технологиям, принципам, методам и системам их управления для прорывных научно-исследовательских работ
ПК(У)-5	Способен применять знания нетехнических ограничений инженерной деятельности, разрабатывать мероприятия по безопасности жизнедеятельности персонала и населения, предотвращать экологические нарушения
ПК(У)-6	Способен проводить теоретические и экспериментальные научные исследования термодинамических и физико-химических процессов в теплоэнергетике, а также систем их контроля и управления, интерпретировать, давать практические рекомендации по внедрению результатов исследований в производство, критически их интерпретировать, публично представлять и обсуждать результаты научных исследований

ПК(У)-7	Способен руководить коллективом специалистов различных направлений и квалификаций, действовать в нестандартных ситуациях, принимать организационно-управленческие решения и нести за них ответственность при организации работ, разрабатывать мероприятия по предотвращению экологических нарушений
ПК(У)-8	Способен проектировать и организовывать учебный процесс по образовательным программам с использованием современных образовательных технологий

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	<ol style="list-style-type: none"> 1. Экспериментальные исследования. 2. Проектирование АСУ горения гелеобразного топлива, а также АСПТ. 3. Разработка конструкторской и схемотехнической документации. 5. Расчет параметров настройки регулятора. 6. Мнемосхема АСУ. 7. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение. 8. Социальная ответственность.
Перечень графического материала	<ol style="list-style-type: none"> 1. Схема структурная. 2. Схема функциональная. 3. Схема электрическая соединений щита управления. 4. Схема электрическая соединений щита пожаротушения. 5. Схема монтажная внешних проводок. 6. Общий вид щита управления. 7. Сборочный чертеж щита пожаротушения.
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Спицына Любовь Юрьевна
Социальная ответственность	Сечин Александр Иванович
Иностранный язык	Пташкин Александр Сергеевич
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
Экспериментальные исследования (Characteristics of ignition and combustion of gel fuel particles heated in a high-temperature air medium)	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	07.02.22
---	----------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ИШФВП	Глушков Дмитрий Олегович	к.ф.-м.н., доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ03	Плешко Андрей Олегович		

Реферат

Выпускная квалификационная работа содержит 144 страницы, 37 рисунков, 37 таблиц, 69 источников, 2 приложения.

Ключевые слова: гелеобразное топливо, криогель, загуститель, программируемый логический контроллер, мнемосхема.

Цель работы – разработка автоматизированной системы управления испытательным стендом ракетного двигателя, предназначенного для сжигания перспективного гелеобразного топлива, а также разработка системы пожаротушения.

Объектом автоматизации является испытательный стенд ракетного двигателя, предназначенного для сжигания перспективного гелеобразного топлива.

В результате выполнения магистерской диссертации разработана автоматизированная система управления технологическим процессом горения гелеобразного топлива, а также система пожаротушения на основе микропроцессорных устройств. Выполнен комплекс экспериментов по исследованию процессов зажигания и горения гелеобразных топлив, состоящих из жидких и твердых горючих отходов.

Основными преимуществами разработанной системы являются наличие системы пожаротушения и 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. Использование в составе гелеобразного топлива жидких и твердых горючих отходов оказывает положительный экологический эффект.

Обозначения и сокращения

АСУ ТП – автоматизированная система управления технологическим процессом;

АСПТ – автоматическая система пожаротушения;

АРМ – автоматизированное рабочее место оператора;

ПВС – поливинилловый спирт;

ЖРД – жидкостный ракетный двигатель;

ДУ – двигательная установка;

ЭВМ – электронно-вычислительная машина;

КТС – комплекс технических средств;

ПЛК – программируемый логический контроллер;

ПК – персональный компьютер;

КС – камера сгорания;

SCADA – комплекс программ, необходимый для разработки и обеспечения работы системы сбора, обработки, архивирования информации в реальном времени;

ГПТ – газовое пожаротушение;

АСР – автоматическая система регулирования.

Оглавление

Введение.....	12
1 Научно-исследовательская работа	13
1.1 Цель и задачи исследования	13
1.2 Экспериментальная методика.....	13
1.2.1 Топливные составы.....	13
1.2.2 Экспериментальный стенд.....	15
1.3 Результаты и их обсуждение.....	18
1.4 Выводы.....	27
2 Проектирование АСУ ТП горения гелеобразного топлива в камере сгорания перспективной энергогенерирующей установки.....	29
2.1 Системный анализ объекта автоматизации.....	29
2.2 Техническое задание на проектирование системы управления.....	31
2.3 Разработка структуры комплекса технических средств	37
2.4 Разработка структурной схемы системы управления	39
2.5 Разработка функциональной схемы системы управления.....	40
2.6 Составление опросных листов на приборы и средства автоматизации	42
2.7 Выбор технических средств системы управления, составление спецификации	43
2.7.1 Выбор оборудования АРМ оператора	44
2.7.2 Выбор датчиков температуры	45
2.7.3 Выбор датчиков давления.....	46
2.7.4 Выбор датчиков расхода	47
2.7.5 Выбор газоанализатора.....	48
2.7.6 Выбор исполнительного механизма	49
2.7.7 Выбор электрического пускового устройства	49
2.7.8 Выбор программируемого логического контроллера.....	50
2.8 Разработка электрических схем соединений щитов.....	51
2.9 Составление перечней элементов щитов.....	53

2.10 Проектирование схемы внешних проводок	54
2.11 Разработка общего вида щита управления и сборочного чертежа щита пожаротушения.....	55
2.12 Разработка фрагментов информационного, математического и программного обеспечений.....	57
2.13 Разработка экранных форм мнемосхем SCADA-системы.....	60
3 Расчет параметров настройки регулятора	63
3.1 Идентификация объекта управления	63
3.2 Выбор структурной схемы системы управления.....	65
3.3 Параметрический синтез системы управления.....	66
3.4 Построение переходных процессов и оценка качества работы системы.....	68
3.4.1 Расчет, построение и оценка качества переходного процесса в замкнутой АСР по каналу регулирующего воздействия	68
3.4.2 Расчет, построение и оценка качества переходного процесса в замкнутой АСР по каналу возмущения	72
3.5 Вывод по разделу Расчет параметров настройки регулятора	76
4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение...	78
4.1 Потенциальные потребители результатов исследования	79
4.2 Анализ конкурентных технических решений	80
4.3 FAST-анализ	81
4.3.1 Выбор объекта FAST-анализа.....	82
4.3.2 Описание функций объекта	82
4.3.3 Определение значимости выполняемых объектом функций	83
4.3.4 Анализ стоимости функций, выполняемых объектом исследования.....	84
4.3.5 Построение функционально-стоимостной диаграммы объекта и ее анализ.....	85
4.3.6 Оптимизация функций, выполняемых объектом	86
4.4 Планирование научно-исследовательской работы.....	86

4.5 Бюджет научно-технического исследования	89
4.5.1 Расчет материальных затрат научно-технического исследования	89
4.5.2 Амортизация	89
4.5.3 Заработная плата исполнителей	90
4.5.4 Отчисления во внебюджетные фонды	92
4.5.5 Накладные расходы	93
4.5.6 Смета затрат на оборудование.....	93
4.5.7 Формирование затрат научно-исследовательского проекта	94
4.6 Ресурсоэффективность	95
4.7 Вывод по разделу Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	95
5 Социальная ответственность	99
5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	99
5.1.1 Специальные правовые нормы трудового законодательства.....	100
5.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны	100
5.2 Производственная безопасность	101
5.2.1 Анализ вредных и опасных производственных факторов.....	102
5.2.2 Обоснование мероприятий по снижению уровней воздействия опасных и вредных факторов на исследователя	108
5.3 Экологическая безопасность.....	109
5.3.1 Анализ влияния объекта исследования на окружающую среду .	109
5.3.2 Обоснование мероприятий по защите окружающей среды	110
5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	110
5.4.1 Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований	111
5.4.2 Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС	112
5.5 Вывод по разделу Социальная ответственность.....	112
Заключение	114
Список публикаций студента.....	116

Список использованных источников	118
Приложение А Опросные листы на технические средства автоматизации..	126
Приложение Б Characteristics of ignition and combustion of gel fuel particles heated in a high-temperature air medium	133

ФЮРА.421000.003 СО1 Заказная спецификация приборов и средств автоматизации.....	На отдельных листах
ФЮРА.421000.003 ПЭ Перечень элементов щита управления	На отдельных листах
ФЮРА.421000.013 ПЭ Перечень элементов щита пожаротушения.....	На отдельных листах
ФЮРА.421000.003 СО Перечень составных частей щита управления	На отдельных листах
ФЮРА.421000.013 СО Спецификация щита пожаротушения.....	На отдельных листах
Графический материал:	На отдельных листах
ФЮРА.421000.003 С1 Схема структурная	
ФЮРА.421000.003 С2 Схема функциональная	
ФЮРА.421000.003 Э4 Схема электрическая соединений щита управления	
ФЮРА.421000.013 Э4 Схема электрическая соединений щита пожаротушения	
ФЮРА.421000.003 С4 Схема монтажная внешних проводов	
ФЮРА.421000.003 ВО Общий вид щита управления	
ФЮРА.421000.003 СБ Сборочный чертеж щита пожаротушения	

Введение

Автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУ ТП) представляют собой мощный инструмент для управления технологическим оборудованием. На современных предприятиях в связи с внедрением современных технологий и оборудования невозможно обойтись без такой системы. Благодаря АСУ ТП оборудование способно функционировать по заданной программе в автоматизированном режиме, а оператору достаточно наблюдать на мониторе за происходящими процессами и отслеживать необходимые параметры. В связи с тем, что функции оперативного персонала сводятся к контролю и управлению технологическим объектом, возрастает уровень производственной безопасности, исключаются ошибки персонала, уменьшаются трудовые затраты, нештатные ситуации.

Одной из наиболее действенных мер снижения количества пострадавших и сохранения целостности системы является установка автоматической системы пожаротушения (АСПТ). Данная система включает в себя комплекс механизмов, устройств, служащих для обнаружения, локализации и тушения возгораний, а также защиты имущества и людей от пожара.

В рамках настоящей работы разрабатываются АСУ ТП горения гелеобразного топлива и АСПТ. Данные системы предназначены для функционирования в составе испытательного стенда ракетного двигателя. К перечню решаемых задач создания АСУ ТП и АСПТ можно отнести:

- повышение эффективности работы оборудования;
- обеспечение удобства управления технологическим процессом (с помощью АРМ оператора);
- контроль и мониторинг технологических параметров;
- исключение рисков простоев, сбоев работы оборудования;
- минимизация ошибок персонала технологического объекта;
- повышение пожарной безопасности.

1 Научно-исследовательская работа

1.1 Цель и задачи исследования

Актуальным направлением развития теории горения конденсированных веществ является исследование процессов зажигания и горения гелеобразных топлив [1]. По агрегатному состоянию такие топлива занимают промежуточное положение между жидкими и твердыми топливами. Основные их преимущества заключаются в аспектах безопасности, энергетических, а так же экологических характеристиках [2].

Для детального анализа протекания процессов микровзрывного диспергирования капель расплава гелеобразных топлив различного состава (как с добавлением твердых частиц, так и без) необходимо развитие современных подходов [3] к проведению экспериментальных исследований быстропротекающих физико-химических процессов. Их длительность может составлять как десятые, так и сотые доли секунды.

До настоящего момента не известны результаты систематического анализа характеристик микровзрывного диспергирования при зажигании и горении частиц гелеобразных топлив [4]. Таким образом, целью данной работы является с использованием программно-аппаратного комплекса высокоскоростной видеорегистрации процессов провести экспериментальное исследование характеристик микровзрывного диспергирования при зажигании одиночных частиц группы составов гелеобразных топлив в высокотемпературной воздушной среде.

1.2 Экспериментальная методика

1.2.1 Топливные составы

Исследования проводились для составов гелеобразного топлива на основе водного раствора (10 % масс.) поливинилового спирта (ПВС), для которых ранее были выполнены исследования [5] физико-механических характеристик (модуль упругости, предел прочности, потеря массы при

деформации) топливных пеллет и характеристик зажигания (минимальные температуры источника нагрева, необходимые для воспламенения; времена задержки зажигания) одиночных частиц. Состав №1 приготовлен из следующих компонентов: 50 % об. масло + 48 % об. водный раствор ПВС + 2 % об. эмульгатор. Состав №2 приготовлен на основе первого путем добавления в первичную масляную эмульсию (50 % об. масло + 48 % об. водный раствор ПВС + 2 % об. эмульгатор) 30 % мас. угольной пыли.

Основные характеристики топливных компонентов:

– дисперсная фаза. Индустриальное масло И-40А (ГОСТ 20799-88, Россия): кинематическая вязкость 61–75 сСт (при 40 °С); плотность 868 кг/м³ (при 20 °С); зольность не более 0,005% мас.; температура замерзания не выше минус 15 °С; температура вспышки не ниже 220 °С;

– дисперсионная среда. Водный раствор (вода дистиллированная с проводимостью не более 5 мкСм/см) ПВС Kuraray Poval 15-99, вязкость 4% (DIN 53015) 13,4 мПа с, степень гидролиза 99,2%, содержание остаточного ацетила 0,8% (Kuraray Co., Ltd, Япония);

– эмульгатор для получения масляных эмульсий. Tween 80, монолеат полиоксиэтилен (20) сорбитана (Вектон, Россия);

– мелкодисперсные твердые горючие частицы. Бурый уголь (тип 2Б, разрез Бородинский, Красноярский край, Россия): размер частиц не более 140 мкм; влажность 14,11%, зольность 4,12%, содержание летучих веществ 47,63%, минимальная теплота сгорания 22,91 МДж/кг. Элементный состав: $C^{daf}=73,25\%$, $H^{daf}=6,52\%$, $N^{daf}=0,79\%$, $S_t^d=0,44\%$, $O^{daf}=18,99\%$.

Для приготовления топливных составов использовалась хорошо апробированная методика [6]. Водный раствор ПВС получали путем растворения порошка ПВС в воде, разогретой до температуры 80 °С, с помощью лопастной мешалки. Далее в водный раствор ПВС вводили соответствующую долю масла (50% об.) и эмульгатора (2% об.) для приготовления первичной масляной эмульсии в результате диспергирования компонентов высокоскоростным диспергатором при 11000 об./мин. Затем

первичную масляную эмульсию разделяли на две части. Из первой части получали непосредственно маслonaполненный криогель (топливный состав №1). Во вторую часть масляной эмульсии вводили порциями угольную пыль (30% мас.). В результате перемешивания компонентов диспергатором получали топливную суспензию. Криогель (водный раствор ПВС) после цикла замораживания / оттаивания (каждый в течение 12 часов) эмульсии и суспензии при температурах минус 15 °С и плюс 20 °С, соответственно, формировал гелеобразную структуру топливных составов, основу которой представляет полимерная матрица. В ячейках последней расположены мелкодисперсные капли масла и частицы угольной пыли [6]. Затем полученные pellets топливных составов №1 и №2 (рисунок 1.1) при комнатной температуре нарезались на частицы массой 10 мг, используемые для исследования характеристик микровзрывного диспергирования гелеобразных топлив.



Рисунок 1.1 – Внешний вид топливных pellets (составы №1, №2)

1.2.2 Экспериментальный стенд

Исследование характеристик микровзрывного диспергирования одиночных частиц гелеобразных топлив при зажигании выполнено с использованием хорошо апробированного экспериментального стенда (рисунок 1.2) [7].

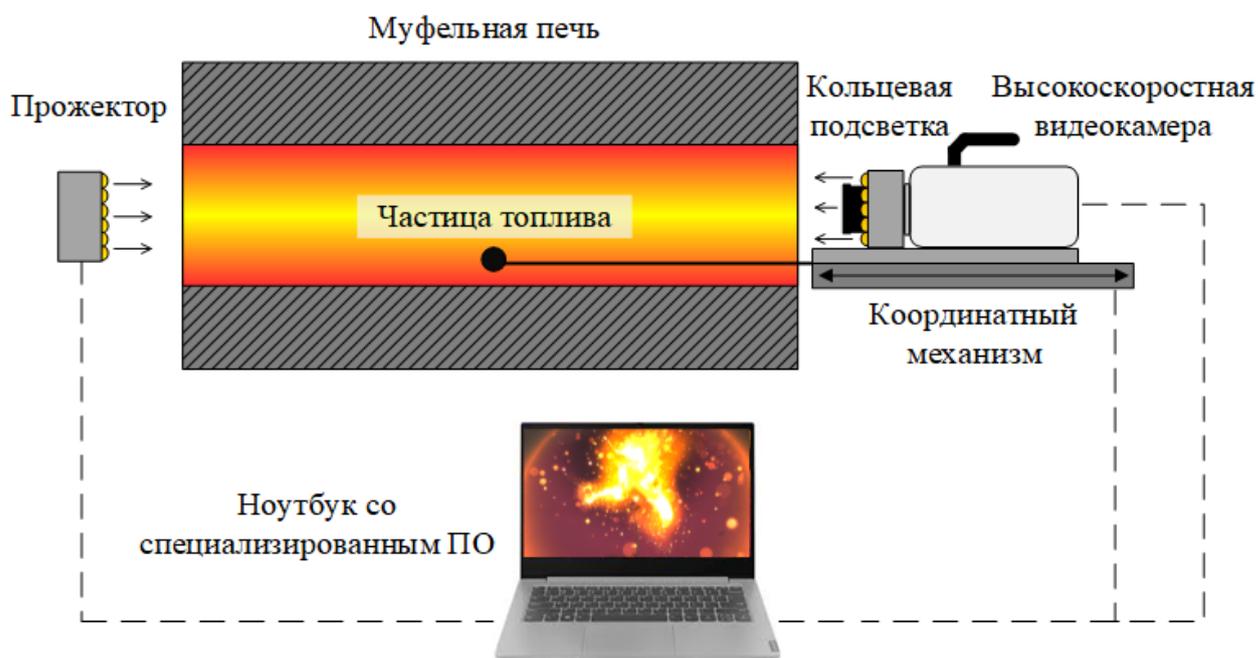


Рисунок 1.2 – Схема экспериментального стенда

Высокотемпературная неподвижная воздушная среда (максимальная температура 1000 °С) генерировалась в полости трубчатой муфельной печи (внутренний диаметр 50 мм, длина 450 мм). Частица топлива массой 10 мг (начальный диаметр около 2,8 мм), расположенная на керамическом держателе, вводилась в предварительно прогретую до температуры T_g муфельную печь с помощью координатного механизма. Высокоскоростная видеокамера располагалась на подвижной площадке координатного механизма, поэтому частица топлива находилась в фокальной плоскости объектива видеокамеры в течение всего индукционного периода.

Скорости ввода (V_{in}) частиц топлива в печь составляли 0,06, 0,08, 0,10 м/с. Этот фактор влияет на интенсивность подвода теплоты к топливу, скорость прогрева частицы и как результат – на характеристики исследуемого процесса. Чем выше значение V_{in} , тем быстрее частица топлива достигает область с температурой T_g . Гарантированное значение этой температуры поддерживалось в средней части муфельной печи.

При проведении экспериментов регистрировались следующие характеристики: время задержки зажигания (t_d) частицы топлива; среднее

значение скорости движения (V_p) мелкодисперсных фрагментов, разлетающихся при диспергировании капли расплава топлива; температура пламени (T_f) в процессе горения топлива; размеры области (D_c), в которой протекали процессы выгорания мелкодисперсных фрагментов после диспергирования капли расплава топлива (рисунок 1.3).

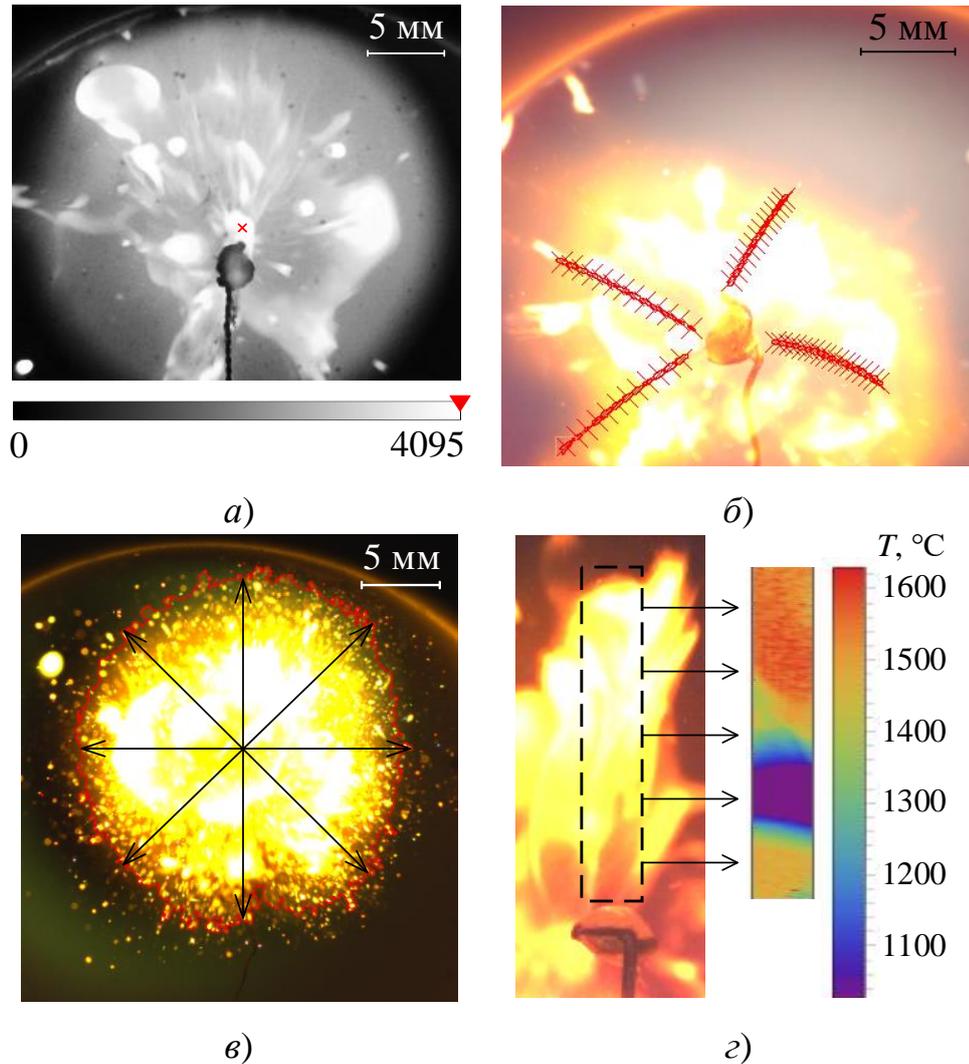


Рисунок 1.3 – Типичные кадры алгоритмов обработки видеозаписей:
а – момент зажигания топлива ($t=t_d$) (ПО Phantom Camera Control);
б – движение фрагментов после диспергирования капли расплава топлива ($t>t_d$) (ПО Tema Automotive); *в* – область выгорания мелкодисперсных фрагментов ($t>t_d$) (ПО Tema Automotive); *г* – температура пламени в процессе горения топлива ($t>t_d$) (оригинальное ПО, разработанное в среде программирования Wolfram Mathematica)

При идентичных начальных условиях ($T_g=\text{const}$, $V_{\text{in}}=\text{const}$) проводились серии из 5–10 экспериментов для каждого топливного состава. Обработка видеозаписей выполнялась с помощью коммерческого программного обеспечения Phantom Camera Control (Vision Research, США), Tema Automotive (Image Systems AB, Швеция) и оригинального программного обеспечения, разработанного в среде программирования Wolfram Mathematica (Wolfram Research, США).

Времена задержки зажигания t_d , скорости движения (V_p) мелкодисперсных фрагментов после диспергирования капли расплава топлива и размер области (D_c) выгорания вычислялись путем обработки видеозаписей по методике [8]. Бесконтактная регистрация температуры пламени (T_f) в процессе газофазного горения топлива осуществлялась в рамках метода двухцветной пирометрии [9].

1.3 Результаты и их обсуждение

Одной из основных характеристик любого топлива является время задержки зажигания (t_d), которое при его практическом применении определяет как габаритные характеристики камер сгорания, так и тепловой режим функционирования энергогенерирующего оборудования. Именно параметры газовой среды камеры сгорания, являющейся источником воспламенения топлива, определяют последующую стабильность процесса горения и полноту выгорания топлива. На рисунке 1.4 приведены зависимости времен задержки зажигания частиц (масса 10 мг, диаметр 2,8 мм) составов №1 и №2 от температуры воздуха в печи при трех разных скоростях ввода в камеру сгорания $V_{\text{in}}=0,06, 0,08, 0,10$ м/с. Аппроксимационные кривые проведены через точки, характеризующие средние значения t_d , которые были установлены в сериях из 5–10 экспериментов при идентичных начальных условиях.

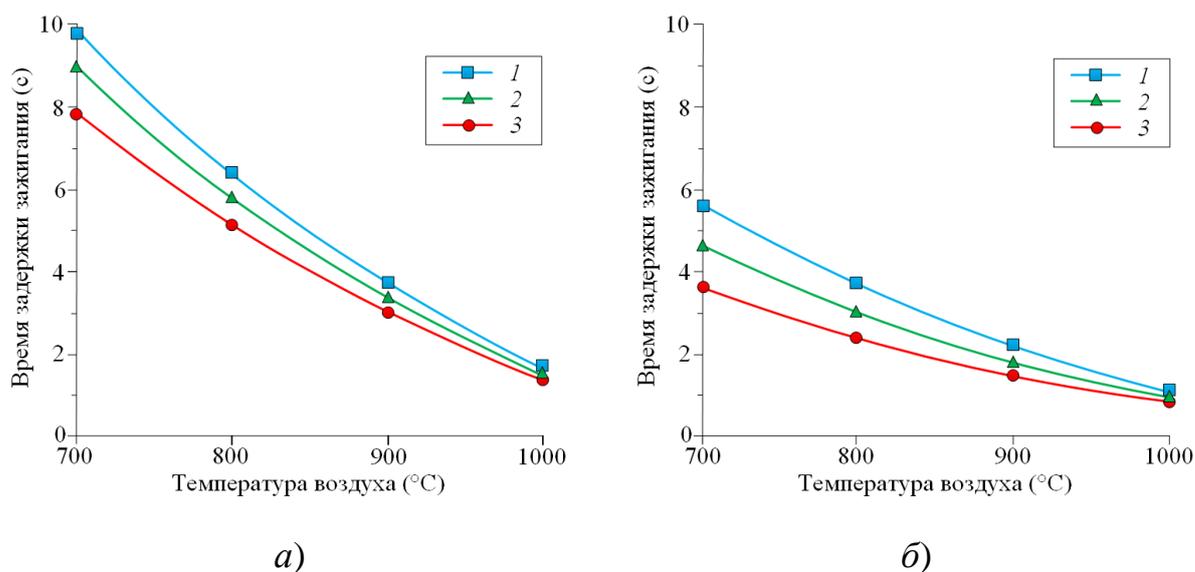


Рисунок 1.4 – Зависимости времен задержки зажигания топливных составов №1 (а) и №2 (б) от температуры при разных скоростях ввода частиц топлив в камеру сгорания: 1 – 0,06 м/с; 2 – 0,08 м/с; 3 – 0,10 м/с

Чем выше скорость ввода частиц топлива (с начальной температурой $T_0=25\text{ }^\circ\text{C}$) в камеру сгорания с неравномерным распределением температуры (возрастает от T_0 на входе до T_g в средней части, см. рисунок 1.2), тем меньше времена задержки зажигания. Этот результат получен вследствие более высокой интенсивности нагрева частицы топлива, т.к. область с температурой T_g в камере достигается при вводе частицы за меньший промежуток времени при прочих идентичных условиях. Длительности процессов ввода частиц топлива в муфельную печь со скоростями 0,06 и 0,10 м/с отличаются более чем в 1,6 раз. Поэтому скорость перемещения частиц оказывает достаточно существенное влияние на основную характеристику процесса – время задержки зажигания. Более существенное отличие значений t_d для составов №1 и №2 характерно для близких к предельным условиям зажигания $T_g=700\text{ }^\circ\text{C}$ и оно составляет около 25% и 50%, соответственно. Чем выше температура окислителя в камере сгорания ($T_g \rightarrow 1000\text{ }^\circ\text{C}$), тем меньше отличие времен задержки зажигания для разных V_{in} . Это объясняется тем, что при близких к предельным условиям зажигания процессы теплопереноса в частице топлива (капле расплава) и ее окрестности оказывают доминирующее

влияние (до 95% [10]) на длительность индукционного периода. Чем выше температура источника, тем выше интенсивность процессов тепломассопереноса. Их длительность становится сопоставимой с длительностью протекания процессов фазового превращения и химического реагирования. Поэтому отличия значений t_d для разных V_{in} являются менее масштабными.

Стоит отметить достаточно существенное отличие (50–90 %) времен задержки зажигания частиц составов №1 и №2 при идентичных условиях проведения эксперимента. Полученный результат объясняется протеканием разных закономерностей физико-химических процессов.

На рисунках 1.5, 1.6 приведены типичные кадры видеороликов зажигания и горения одиночных частиц исследовавшихся в данной работе составов гелеобразных топлив при $T_g=900$ °С. Кадры высокоскоростной видеозаписи позволяют сделать вывод о существенно разных закономерностях процессов, протекающих при нагревании частиц типичного гелеобразного топлива и капель горючей жидкости [10].

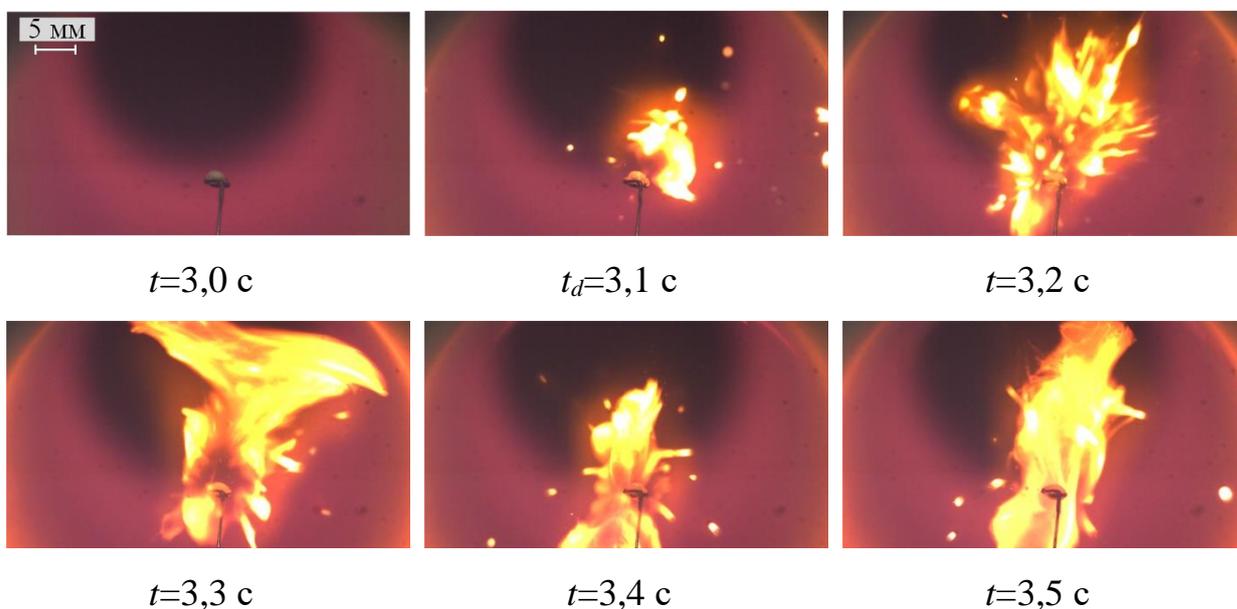


Рисунок 1.5 – Типичные кадры видеороликов зажигания и горения частицы гелеобразного топлива (состав №1 – без добавления твердых частиц) при $T_g=900$ °С

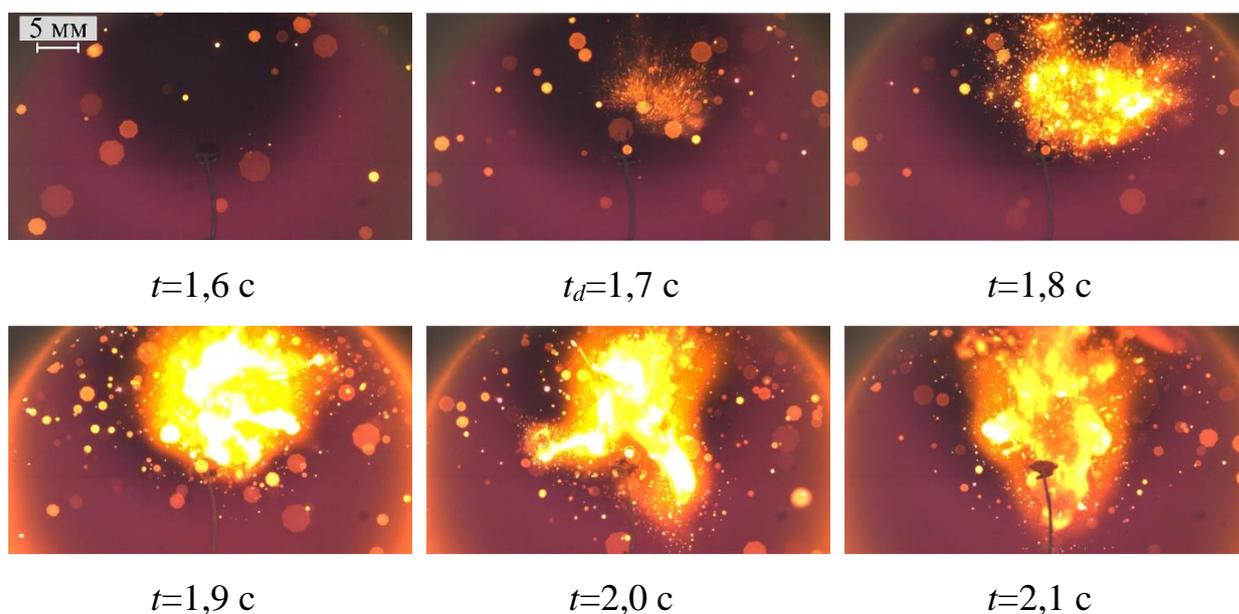


Рисунок 1.6 – Типичные кадры видеोगраммы зажигания и горения частицы гелеобразного топлива (состав №2 – с добавлением мелкодисперсных твердых частиц) при $T_g=900\text{ }^{\circ}\text{C}$

Для рассматриваемых в данной работе гелеобразных топлив в первом случае (рисунок 1.5) в течение индукционного периода протекает следующая закономерность физико-химических процессов:

- формирование большого числа пузырьков в приповерхностном слое капли;
- рост числа и размеров этих пузырьков, сопровождающийся существенным изменением формы капли;
- схлопывание пузырьков и диспергирование исходной капли с отделением капель существенно меньшего размера (на 1–2 порядка меньше начального размера частицы топлива);
- предыдущий процесс сопровождается выходом паров горючей жидкости в среду окислителя через слой загустителя (внешнюю оболочку) при разрушении капли;
- при достижении предельных условий в окрестности капли происходит газофазное зажигание.

В отличие от жидких однокомпонентных топлив инициирование горения происходит не в малой окрестности капли, а в достаточно большой по размерам области (рисунок 1.5), что оказывает положительный эффект на развитие последующего горения топлива и интенсификацию выгорания компонентов. В момент зажигания гелеобразного топлива (состав №1 – без добавления твердых частиц) воспламенение происходит сначала в окрестности одного или нескольких малых фрагментов (рисунок 1.5, видеокادر при $t_d=3.1$ с), которые в результате микровзрыва отделились и удалились от поверхности капли на некоторое расстояние. Температура этих мелкодисперсных капель относительно невысока. При их движении в малой окрестности исходной капли процесс испарения протекает с относительно невысокой скоростью. В этой области температура формирующейся парогазовой смеси ниже температуры окружающего разогретого воздуха. По мере удаления мелкодисперсных капель от поверхности исходной капли возрастает температура окружающей среды до значения T_g , испарение интенсифицируется. При достижении критических условий происходит воспламенение паров горючего в окрестности движущейся мелкодисперсной капли или окрестности их группы. Далее процесс экзотермического реагирования из этой области распространяется по всему объему горючей парогазовой смеси, сформировавшейся в течение индукционного периода в окрестности капли топлива (рисунок 1.5). Микровзрывы при диспергировании капли интенсифицируют как процесс зажигания, так и выгорания топлива вследствие многократного роста площади поверхности испарения жидких компонентов [11].

Во втором случае (рисунок 1.6) протекает несколько другая закономерность физико-химических процессов при воспламенении частицы гелеобразного топлива, обусловленная наличием мелкодисперсных твердых горючих частиц в составе. На начальном этапе прогрева частицы гелеобразного топлива в результате плавления тонкого приповерхностного слоя мелкодисперсные твердые частицы увлекаются парами горючей

жидкости со свободной поверхности. Из-за более интенсивного прогрева этих мелкодисперсных частиц происходит их воспламенение (рисунок 1.6, видеокадр при $t=1,6$ с). Но это не ведет к воспламенению парогазовой смеси, т.к. концентрация и температура паров горючей жидкости в окрестности частицы недостаточно высока для инициирования горения. Далее после некоторого промежутка времени в окрестности капли расплава топлива формируется парогазовая смесь. В течение этого промежутка времени протекает совокупность процессов, аналогичная процессам при зажигании маслonaполненных криогелей (состав №1 – без добавления твердых частиц), которые были описаны выше. Существенное отличие состоит в том, что в результате схлопывания пузырьков и диспергирования капли расплава топлива в высокотемпературную среду окислителя вдуваются пары горючей жидкости и мелкодисперсные частицы угля, которые пропитаны этой жидкостью. Поэтому газофазное зажигание гелеобразного топлива (с мелкодисперсными твердыми частицами) происходит достаточно равномерно в большой по размерам области (рисунок 1.6).

В момент зажигания (рисунок 1.6, видеокадр $t_d=1,7$ с) происходит воспламенение большой группы частиц угля, движущихся и удаляющихся от поверхности исходной капли топлива в результате микровзрыва. Причем сначала воспламеняются пары горючего в окрестности движущихся мелкодисперсных частиц угля, а затем сами частицы. Характерные времена формирования горючей газовой смеси в окрестности частиц угля за счет испарения горючей жидкости (состава №2) меньше аналогичной характеристики при испарении мелкодисперсных капель расплава после диспергирования исходной капли гелеобразного топлива (состава №1). Именно поэтому времена задержки зажигания состава №2 меньше, чем состава №1 при прочих равных условиях. Далее (как и в предыдущем случае для состава №1) процесс экзотермического реагирования от внешней границы распространяется в глубинные слои по всему объему горючей парогазовой смеси, которая сформировалась в течение индукционного периода.

Кроме отличия описанных механизмов воспламенения топливных составов (рисунки 1.5, 1.6) установлено достаточно существенное отличие характеристик микровзрывного диспергирования капель расплавов гелеобразных топлив №1 и №2. Полученный результат (рисунок 1.7) достаточно хорошо соответствует механизмам воспламенения разных топливных составов. Для топливного состава №1 характерно увеличение средней скорости движения частиц, образующихся в результате микровзрывного диспергирования, на 90–100% с 1,1 до 2,2 м/с (рисунок 1.7а) как с увеличением температуры источника нагрева, так и скорости ввода в камеру сгорания в рассматриваемых диапазонах варьирования параметров $T_g=700–1000\text{ }^\circ\text{C}$, $V_{in}=0,06–0,10\text{ м/с}$.

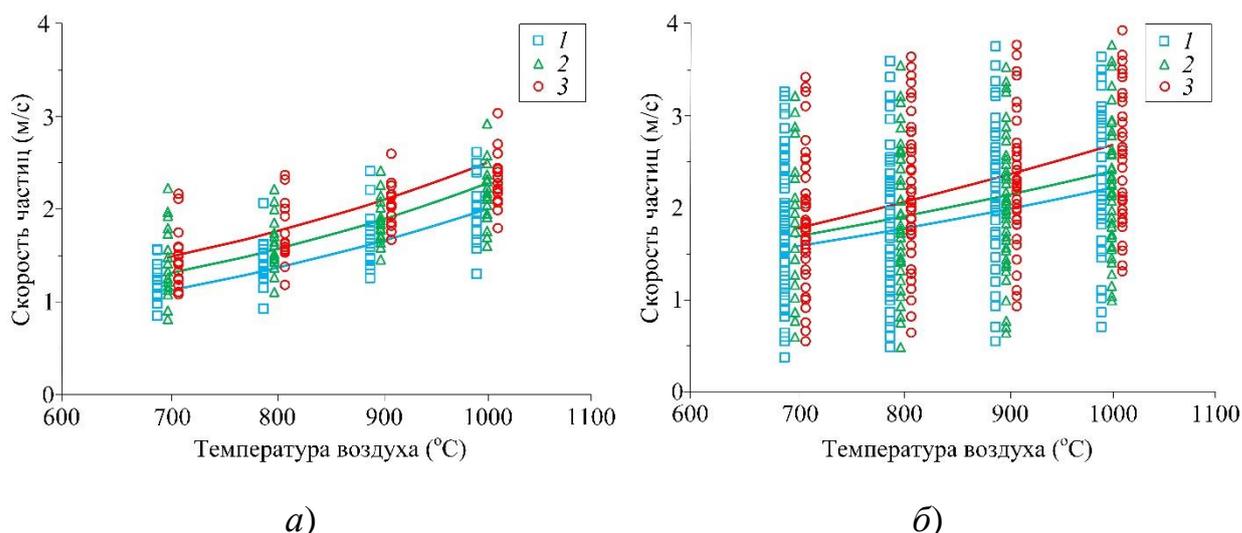


Рисунок 1.7 – Скорости движения мелкодисперсных фрагментов при диспергировании капли расплава гелеобразного топлива №1 (а) и №2 (б) при разных скоростях ввода топливных частиц в камеру сгорания:

1 – 0,06 м/с; 2 – 0,08 м/с; 3 – 0,10 м/с

Такой результат объясняется процессами, протекающими в капле расплава топлива на границе горючая жидкость – загуститель. Чем выше интенсивность нагрева, тем выше градиенты температуры в гетерогенной структуре капли топлива, что ведет к более существенному росту давления в

пузырьках приповерхностного слоя и как результат увеличению подводимой от внешнего источника энергии и затрачиваемой на диспергирование капли. Чем выше значение этой характеристики, тем выше скорости движения мелкодисперсных фрагментов при диспергировании капли расплава гелеобразного топлива №1 (рисунок 1.7а). В случае топливного состава №2 средние значения аналогичных скоростей движения мелкодисперсных фрагментов изменяются менее существенно (на 45–55% с 1,6 до 2,5 м/с) в указанных выше диапазонах варьирования параметров T_g и V_{in} (рисунок 1.7б). Достаточно существенный разброс экспериментальных данных, приведенных на рисунке 1.7б, по сравнению с данными рисунке 1.7а объясняется отличием механизмов зажигания разных топливных составов. Как было отмечено выше при воспламенении частицы топливного состава №2 мелкодисперсные частицы угля поступают в среду окислителя как в процессе испарения жидких компонентов на начальном этапе прогрева, так и в результате микровзрывного диспергирования капли расплава гелеобразного топлива. В первом случае скорости частиц составляют 0,5–1,0 м/с, во втором – 1–4 м/с.

Так как для топливного состава №2 характерна менее существенная зависимость скорости движения мелкодисперсных фрагментов при диспергировании капли в условиях варьирования параметров T_g и V_{in} (рисунок 1.7б), то и объемы области выгорания изменяются менее масштабно (до 9 раз) в диапазоне 1,5–13,5 см³ (рисунок 1.8б).

При аналогичных характеристиках проведения эксперимента объемы области выгорания изменяются более чем в 11 раз в диапазоне 0,7–8,0 см³ (рисунок 1.8а) для топливного состава №1. В условиях микровзрывного диспергирования размеры области выгорания (диаметр около 15–25 мм) в 5–9 раз превышают начальные размеры частицы топлива (диаметр 2,8 мм). Таким образом, очевидна перспективность практического применения эффекта микровзрывного диспергирования частиц топлив для повышения интенсивности процессов воспламенения и выгорания высокоэнергетических

материалов в камерах сгорания для повышения основных показателей эффективности (удельные тяга, импульс) энергетических установок.

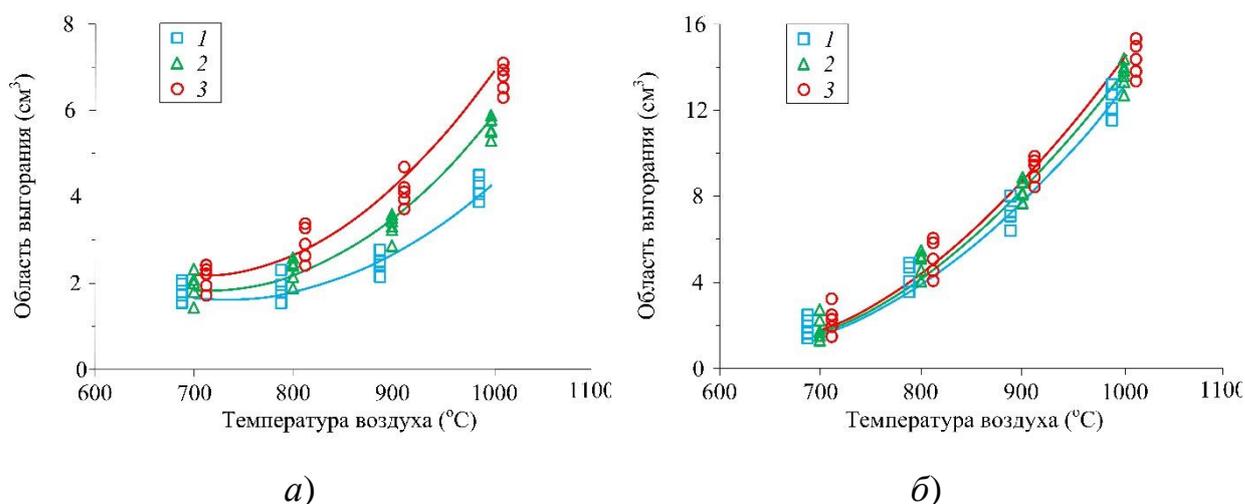


Рисунок 1.8 – Размеры областей, в которых протекает процесс выгорания мелкодисперсных фрагментов при диспергировании капель расплавов гелеобразных топлив №1 (а) и №2 (б) при разных скоростях ввода топливных частиц в камеру сгорания: 1 – 0,06 м/с; 2 – 0,08 м/с; 3 – 0,10 м/с

При функционировании реальных устройств достаточно большое внимание уделяется контролю температуры в процессе горения [12], т.к. основным сдерживающим фактором для широкого перехода к ПВРД пятого поколения [13] являются ограничения по предельно допустимым температурам материалов стенок камер сгорания [14]. В данной работе впервые были установлены температуры пламен (рисунок 1.9) при горении одиночных частиц гелеобразных топлив с использованием метода высокоскоростной двухцветной пирометрии [15]. Температурные тренды пламени в процессе горения получены в сериях из 5 экспериментов, выполненных при идентичных условиях.

Для состава №1 характерны серии микровзрывов после воспламенения частицы топлива. Экстремумы на трендах температуры (при $T_g=850-1000$ °C), достаточно хорошо соответствуют описанному выше механизму зажигания и

горения топливного состава №1, т.к. иллюстрируют серию микровзрывов, протекающих до полного выгорания компонентов топлива (рисунки 1.9а, б).

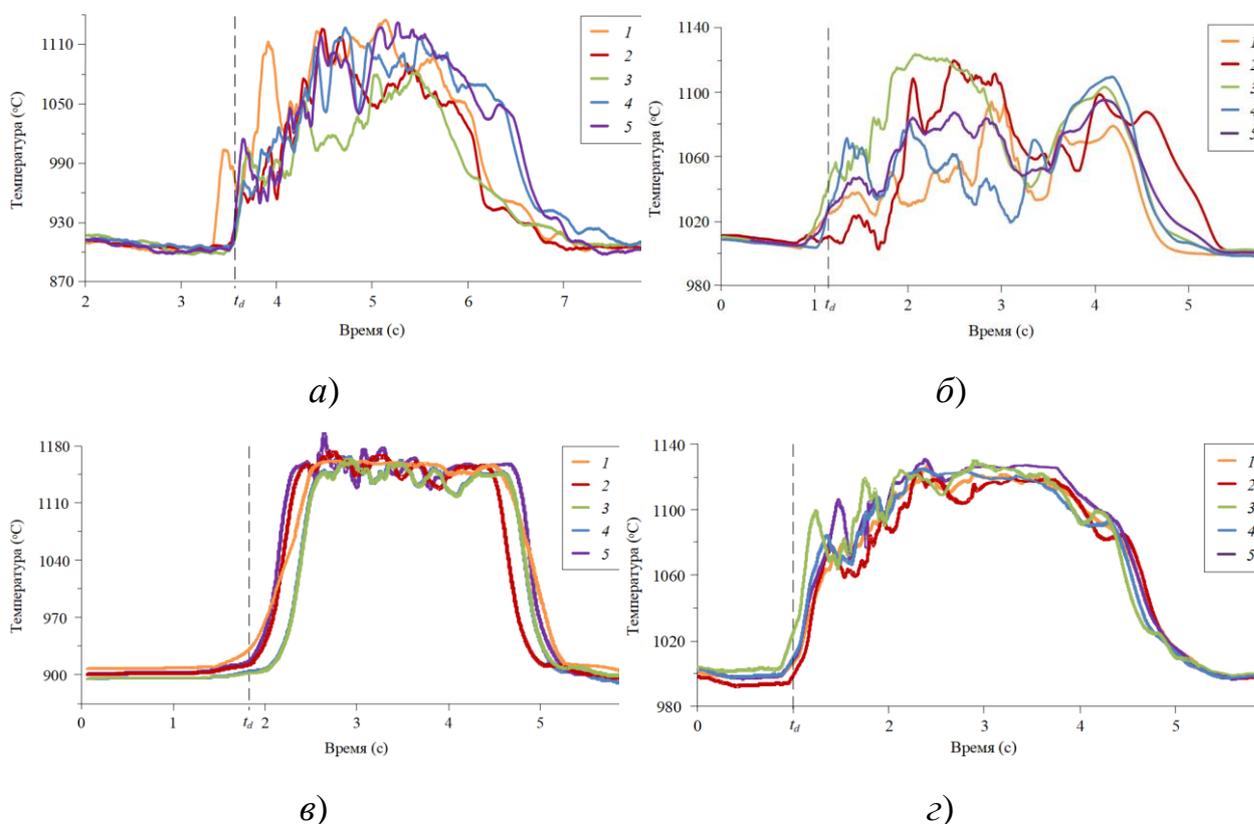


Рисунок 1.9 – Температуры пламени при горении частиц гелеобразного топлива №1 (а, б) и №2 (в, г) при $V_{in}=0,08$ м/с и $T_g=900$ °С (а); $T_g=1000$ °С (б); 1–5 – номера экспериментов

Добавление мелкодисперсных твердых горючих частиц в состав гелеобразного топлива №2 не только повышает интенсивность его воспламенения, но и обеспечивает протекание достаточно стабильного выгорания топлива без существенных пульсаций температуры в процессе горения (рисунки 1.9в, г).

1.4 Выводы

Полученные в данной работе экспериментальные данные можно применять в качестве основы для управления процессами зажигания и горения в энергогенерирующем оборудовании. Результаты выполненного

исследования позволяют сделать вывод, что закономерности и характеристики зажигания гелеобразных топлив разного компонентного состава (в первую очередь с добавлением и без добавления мелкодисперсных твердых горючих частиц) могут достаточно существенно отличаться. Такая широкая вариативность механизмов и характеристик горения является одним из преимуществ применения на практике перспективных гелеобразных топлив по сравнению с широко распространенными твердыми и жидкими топливами. Полученные результаты являются основой для развития тематики гелеобразных топлив в направлении металлизации топливных составов. До настоящего времени не установлены критерии для достоверного прогнозирования составов, условий и характеристик микровзрывного диспергирования частиц гелеобразных топлив при зажигании. Один из подходов к разработке такого прогностического аппарата основан на соотношении количества тепловой энергии, подведенной к частице топлива в течение индукционного периода, с количеством кинетической энергии при движении мелкодисперсных частиц после диспергирования капли расплава топлива. Таким образом, оценка последнего может быть выполнена с использованием в качестве исходных данных результатов, полученных в данной работе. Можно сделать вывод, что проведенное исследование способствует не только всестороннему изучению перспективных гелеобразных топлив, но и развитию теории горения в направлении интенсификации физико-химических процессов в условиях микровзрывного диспергирования.

2 Проектирование АСУ ТП горения гелеобразного топлива в камере сгорания перспективной энергогенерирующей установки

2.1 Системный анализ объекта автоматизации

В качестве объекта автоматизации выбран испытательный стенд ракетного двигателя, предназначенного для сжигания гелеобразного топлива. Прототипом данного испытательного стенда является испытательный комплекс для отработки жидкостных ракетных двигателей (ЖРД).

Стенды для отработки ЖРД представляют собой сложные инженерные сооружения, оборудованные большим количеством систем и подсистем: подъёмно-транспортные и газоотводящие устройства, система подачи топлива, система термостатирования топлива, нейтрализации компонентов топлива и продуктов сгорания, охлаждения стенда и пожаротушения т.д. Часто такие стенды оборудуются системами светомаскировки и шумоглушения. Расходные магистрали стендов проектируются так, чтобы изменение параметров поступающего в ЖРД топлива на переходных режимах работы в точности соответствовало гидродинамическим процессам, происходящим в натурной двигательной установке (ДУ).

Во время проведения испытаний нередко разрушения двигателей, сопровождающиеся прогарами агрегатов, пожарами, взрывами, что связано с недостаточной изученностью рабочих процессов и конструктивной сложностью многих ЖРД наряду с уникальностью разрабатываемых двигателей и стремлением разработчиков к созданию всё более совершенных конструкций. Поэтому по соображениям безопасности оператор контролирует ход огневых испытаний по показаниям автоматической системы. Электронно-вычислительная машина (ЭВМ) производит быстрый опрос большого числа датчиков (контрольных точек), анализируя полученные данные, автоматически локализует дефекты и при необходимости останавливает процесс испытаний. Данные от ЭВМ поступают в систему регистрации,

которая выдаёт оперативную информацию о ходе огневых испытаний в виде таблиц, графиков, диаграмм и т.п.

Схема конструкции испытательного комплекса для огневых испытаний крупных ЖРД представлена на рисунке 2.1 [16]. На рисунке 2.1 приняты следующие обозначения: 1 – дефлектор газовой струи; 2 – лоток для сбора охлаждающей воды и остатков топлива (с целью последующей нейтрализации); 3 – бронеплита газоотражателя; 4 – манометрический щит; 5 – ЖРД; 6 – коллектор системы пожаротушения; 7 – стендовая рама для установки ЖРД; 8 – баллон промывки ЖРД после испытания; 9 – подъездной путь; 10 – фотоаппаратура; а – огневой отсек; б – тягоизмерительный отсек; в – отсек распределения сжатого газа; г – отсек топливных ёмкостей; д – отсек установки и обслуживания ЖРД; е – отсек манометрических измерений; ж – вентиляционный отсек; и – отсек распределения воды для охлаждения конструкции стенда, газоотражателя и лотка.

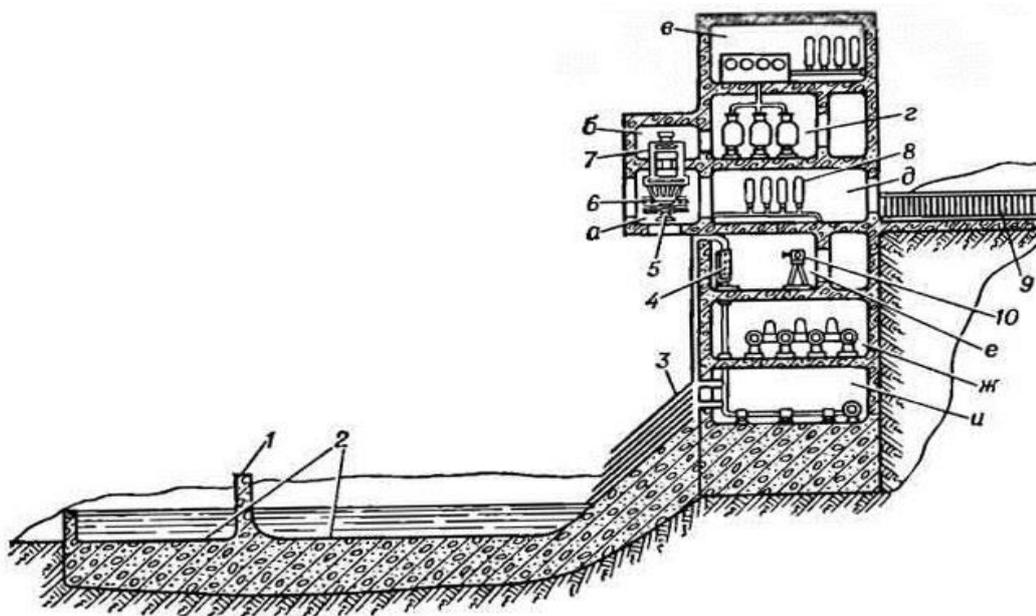


Рисунок 2.1 – Схема вертикального стенда для огневых испытаний крупных ЖРД

В рамках разработки магистерской диссертации ограничимся тремя системами комплекса: огневым отсеком, системой управления и системой

пожаротушения. Лабораторный стенд для испытаний небольших ЖРД будет размещаться в испытательном ангаре.

К АСУ ТП стенда относятся:

- система управления двигателем, обеспечивающая работу на устоявшихся и переменных режимах;
- пульт контроля, настройки и отображения параметров работы двигателя;
- система управления стендовыми системами и подсистемами, обеспечивающая выдачу управляющих сигналов на исполнительные механизмы;
- система контроля двигателя, осуществляющая выдачу предупредительных сигналов при выходе параметров за границы уставок, сигнализацию аварийных режимов и ситуаций на двигателе и стендовых системах, контроль температуры и состава уходящих газов;
- система измерения и регистрации параметров двигателя, обеспечивающая единый формат данных низкочастотных и высокочастотных измерений;
- система пожаротушения.

Для создания необходимого давления в камере сгорания (КС) необходимо поддерживать определённые расходы гелеобразного топлива и окислителя. Данная задача является основной для правильного функционирования системы. Следует учесть опасные факторы и возможные ЧС перед реализацией проекта АСУ ТП процесса горения гелеобразного топлива. Также следует учесть режимы функционирования (низкотемпературный, высокотемпературный) проектируемой системы, а соответственно подбор оборудования способного функционировать в заданных условиях.

2.2 Техническое задание на проектирование системы управления

1 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1 Полное наименование системы и ее условное обозначение: АСУ ТП горения гелеобразного топлива в камере сгорания ракетного двигателя.

1.2 Плановые сроки начала и окончания работы по созданию системы.

Плановый срок начала работ по проектированию системы – 21 февраля 2022 года.

Плановый срок окончания работ проектированию АСУ ТП горения гелеобразного топлива – 31 мая 2022 года.

1.3 Перечень нормативно-технических документов, методических материалов, использованных при разработке ТЗ:

– ГОСТ 34.602-89 [17]. Техническое задание на создание автоматизированной системы;

– ГОСТ 34.601-90 [18]. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Стадии создания;

– ГОСТ 34.201-89 [19]. Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Виды, комплексность и обозначение документов при создании автоматизированных систем;

– СП 485.1311500.2020 [20]. Системы противопожарной защиты. Установки пожаротушения автоматические. Нормы и правила проектирования.

– ГОСТ 12.2.047-86 [21]. Система стандартов безопасности труда. Пожарная техника. Термины и определения.

2 НАЗНАЧЕНИЕ И ЦЕЛИ СОЗДАНИЯ СИСТЕМЫ

АСУ ТП горения гелеобразного топлива предназначена для поддержания давления в камере сгорания испытательного стенда ракетного двигателя.

3 ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА АВТОМАТИЗАЦИИ

В состав системы сжигания топлива входят: трубопроводы для подачи топлива и окислителя; топливные форсунки; камера сгорания; регулирующие клапаны. Управление осуществляется дистанционно с АРМ оператора при

использовании специального ПО. Информационная модель АСУ ТП процесса горения гелеобразного топлива формируется на основе поступающих в систему входных потоков информации, исходящих выходных потоков информации между различными уровнями системы.

4 ТРЕБОВАНИЯ К СИСТЕМЕ

4.1 Структура АСУ

Система имеет трехуровневую структуру и строится на базе микропроцессорной техники (рисунок 2.2).

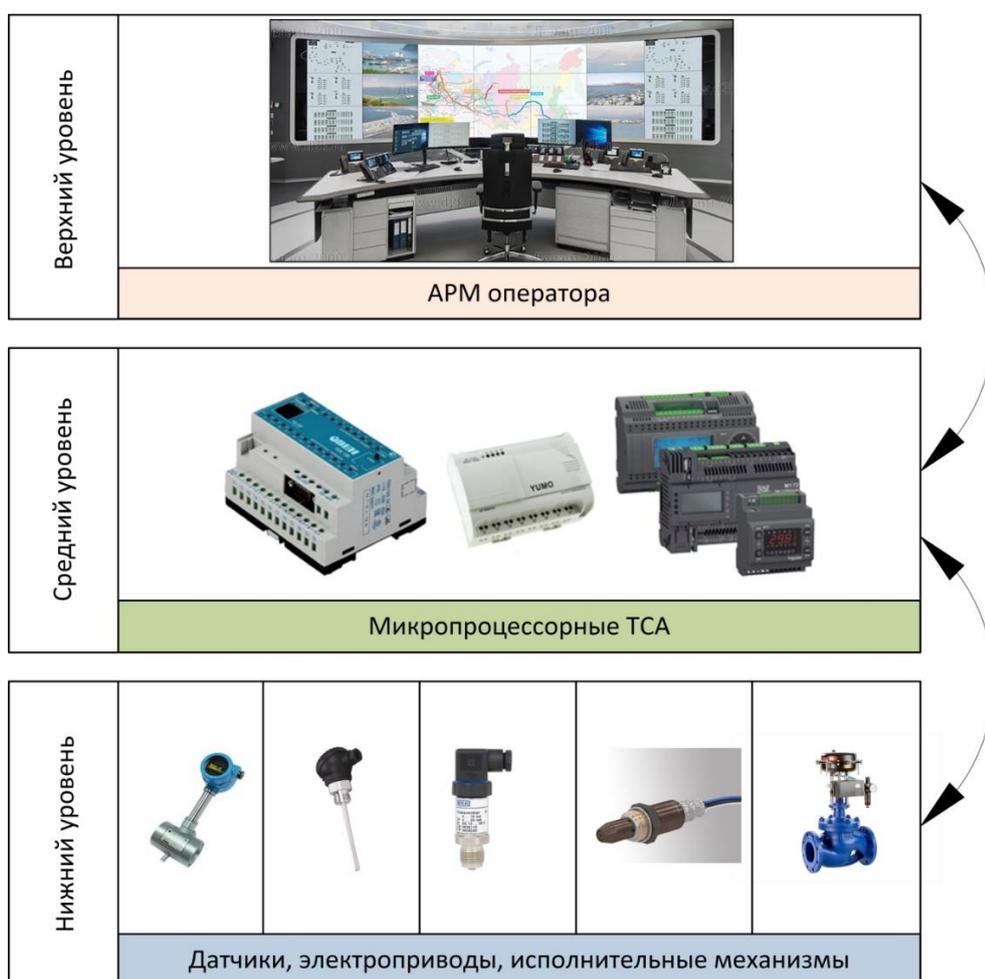


Рисунок 2.2 – Архитектура АСУ ТП горения гелеобразного топлива

Верхний уровень имеет автоматизированное рабочее место оператора, реализованное в виде системного блока, монитора, клавиатуры, мыши, звуковых колонок, принтера. Данный комплекс обеспечивает прием и

отображение информации о ходе технологического процесса, оперативное управление процессом, контроль и управление работой по каналам связи.

Средний уровень включает в себя программируемый логический контроллер АСУ ТП, который обеспечивает сбор и обработку информации от датчиков нижнего уровня, передачу информации о состоянии параметров системы на АРМ оператора, а также выдает управляющие воздействия.

Нижний уровень АСУ ТП процесса горения гелеобразного топлива представляет собой совокупность датчиков температуры, давления, расхода, газоанализатора, а также регулирующих клапанов, показывающих и сигнализирующих датчиков. Датчики должны соответствовать виду климатического исполнения, а также выдерживать воздействие влияющих сред.

4.2 Метрологические характеристики

Система должна содержать измерительные каналы для следующих параметров: температура, давление, расход, концентрация вредных веществ.

Средства измерения, составляющие измерительные каналы должны быть первично поверены или калиброваны; внесены в Государственный реестр средств измерений; иметь свидетельство об утверждении типа измерений и методики поверки, регламентированные в приложении к данному свидетельству и оформленные в соответствии с действующими нормами и правилами.

4.3 Надежность системы

Система должна сохранять работоспособность и обеспечивать восстановление своих функций при возникновении следующих внештатных ситуаций:

- при сбоях в системе электроснабжения;
- при ошибках в работе технических средств автоматизации;

4.4 Функции АСУ

Перечень функций АСУ:

- сбор информации с первичных датчиков и преобразователей;

- преобразование сигналов в унифицированные;
- обработка полученной информации, сравнение параметров с уставками и формирование команд управления;
- технологическая сигнализация;
- диагностика состояния оборудования;
- визуализация информации в удобном для оперативного персонала виде;
- ведение базы данных реального времени;
- формирование отчетов о ходе технологического процесса;
- архивирование информации о ходе технологического процесса;
- обмен информацией между вычислительными средствами АСУ ТП;
- аварийное отключение;
- выдача оператору рекомендаций по управлению процессом;
- оперативный контроль технологических параметров;
- ручной ввод информации в систему с использованием АРМ оператора.

4.5 Программное обеспечение

Программное обеспечение должно обеспечивать выполнение всех требований системы. Также должно сопровождаться комплектом документации, позволяющей осуществлять технологическое конфигурирование алгоритмов ПО на этапе проведения пусконаладочных работ и в процессе промышленной эксплуатации без участия разработчика ПО. Программное обеспечение должно выполнять логические и вычислительные операции по реализации функций сбора, обработки, хранения, управления, передачи и представления данных в соответствии с функциями системы автоматизации и включать: общесистемное, прикладное, специальное ПО, пакет программ тестового контроля технических средств, входящих в составы систем автоматизации.

4.6 Техническое обеспечение

Комплекс технических средств АСУ должен быть достаточным для выполнения всех автоматизированных функций АСУ. В нем в основном должны использоваться технические средства серийного производства. Тиражируемые АСУ и их части должны строиться на базе унифицированных технических средств. Технические средства АСУ, используемые при взаимодействии АСУ с другими системами, должны быть совместимы по интерфейсам с соответствующими техническими средствами этих систем и используемых систем связи. Технические средства АСУ должны быть размещены с соблюдением требований, содержащихся в технической, в том числе эксплуатационной, документации. Размещение технических средств, используемых персоналом АСУ при выполнении автоматизированных функций, должно соответствовать требованиям эргономики. Любое из технических средств АСУ должно допускать замену его средством аналогичного функционального назначения без каких-либо конструктивных изменений или регулировки в остальных технических средствах АСУ. Технические средства АСУ допускается использовать только в условиях, определенных в эксплуатационной документации на них.

4.7 Организационное обеспечение

Необходимо наличие документов, которые устанавливают порядок и правила функционирования персонала АСУ ТП, а также организационных мероприятий, направленных на успешное внедрение и функционирование системы и на безопасное ведение технологического процесса.

4.8 Математическое обеспечение

Необходимо наличие специальных программ, которые будут обеспечивать функционирование автоматизированной системы процесса горения гелеобразного топлива.

2.3 Разработка структуры комплекса технических средств

Особенности функционирования рассматриваемого объекта представлены в [16]. На рисунке 2.3 представлена структурная схема комплекса технических средств автоматизированной системы управления и автоматической системы пожаротушения.

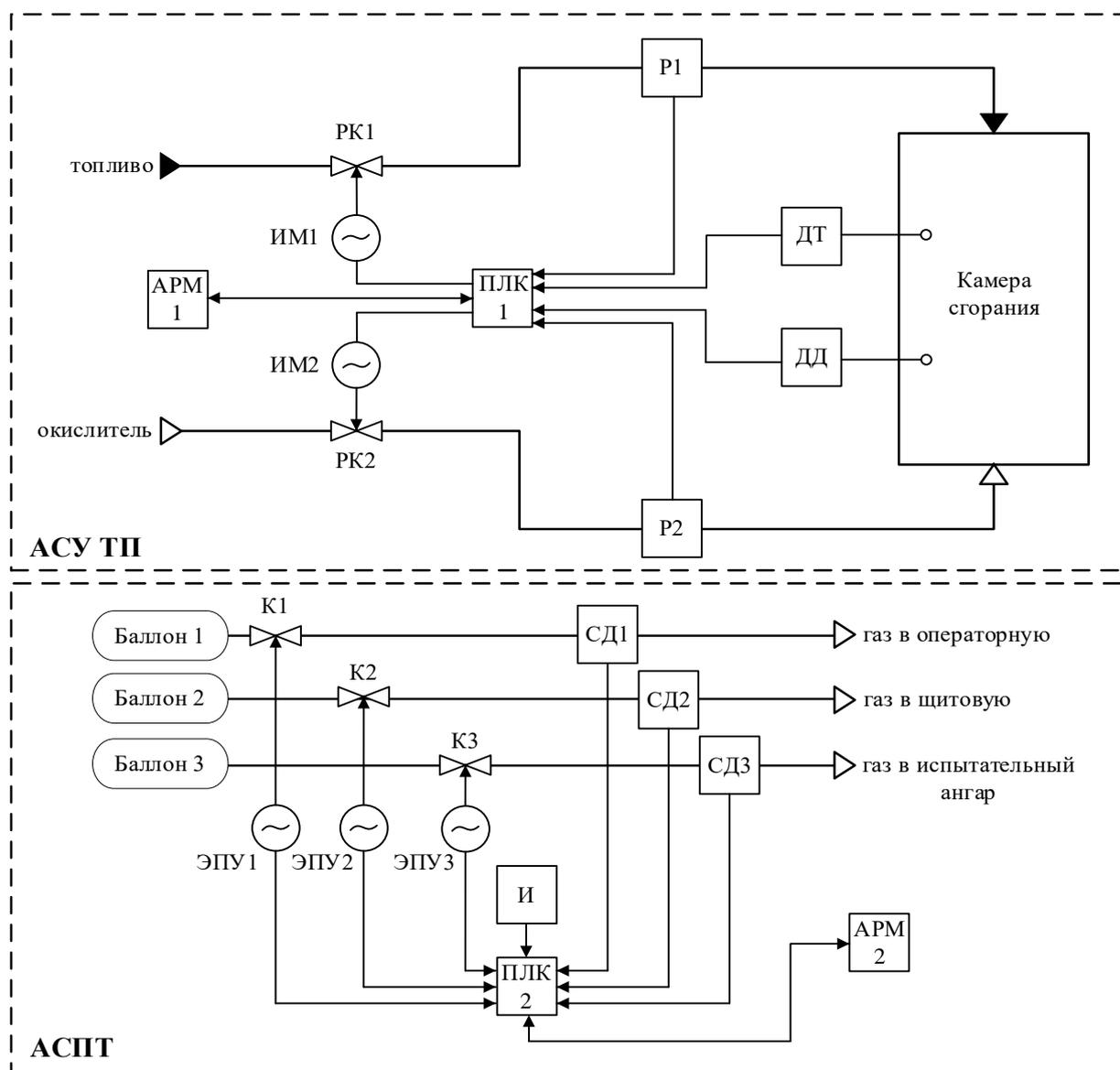


Рисунок 2.3 – Структурная схема КТС: АРМ – автоматизированное рабочее место оператора; Р – расходомер; ДТ – датчик температуры; ДД – датчик давления; СД – сигнализатор давления; ПЛК – программируемый логический контроллер; РК – регулирующий клапан; И – пожарные извещатели; ИМ – исполнительный механизм; ЭПУ – электронное пусковое устройство

Основным элементом АСУ ТП является камера сгорания, в которой осуществляется сжигание гелеобразного топлива. Данное топливо и окислитель (кислород) подаются по трубопроводам. Регулирование количества подачи топлива и окислителя осуществляются с помощью регулирующих клапанов РК1 и РК2 соответственно. Для обеспечения необходимой мощности жидкостного ракетного двигателя и, соответственно, необходимого давления в камеру сгорания подается определенное количество гелеобразного топлива. Давление в камере сгорания контролируется при помощи датчика давления ДД, информация с которого поступает на ПЛК. Так же на него поступает информация о расходах топлива Р1 и окислителя Р2.

Таким образом, ПЛК в зависимости от заданной уставки давления вырабатывает управляющее воздействие на РК1, который закрывает/открывает клапан подачи топлива. Затем измеряется расход топлива и под его количество, в необходимом соотношении, подается окислитель, количество которого так же регистрируется расходомером и регулируется с помощью РК2.

В выбранной системе АСУ ТП присутствует ряд измеряемых (температура, давление, расход, концентрация) и регулируемых параметров (положение регулирующих клапанов). Их перечень и номинальные значения представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Основные измеряемые и регулируемые параметры АСУ ТП

Параметр	Номинальное значение
Температура топлива в трубопроводе, °С	70
Температура кислорода в трубопроводе, °С	70
Температура горючей смеси в камере сгорания, °С	550
Давление топлива в трубопроводе, МПа	0,20
Давление кислорода в трубопроводе, МПа	0,20
Давление горючей смеси в камере сгорания, МПа	0,90
Расход топлива, кг/с	0,13

Продолжение таблицы 2.1

Параметр	Номинальное значение
Расход кислорода, кг/с	0,13
Степень открытия регулирующего клапана подачи топлива, %	0...100
Степень открытия регулирующего клапана подачи кислорода, %	0...100
Концентрация углекислого газа, %	2...3
Концентрация угарного газа, %	2...3
Концентрация оксидов серы, %	2...3
Концентрация азота, %	2...3

Основной задачей АСПТ является локализация и ликвидация пожара. Для этого в помещениях испытательного комплекса установлены пожарные извещатели И (рисунок 2.3). При обнаружении пожара в одном из помещений сигнал от шлейфа пожарной сигнализации поступает на ПЛК. После этого ПЛК формирует управляющее воздействие на одно из электрических пусковых устройств ЭПУ в зависимости от помещения, в котором произошло возгорание. После открытия клапана (К1-К3) газ из баллона начинает поступать по газопроводу в помещение комплекса (в операторную, щитовую или испытательный ангар). Для проверки срабатывания АСПТ сигнализатор давления СД, при повышении давления, передает сигнал на ПЛК.

Кроме того, в системе присутствует автоматизированное рабочее место оператора (АРМ). Оператор имеет возможность взаимодействовать с персональным компьютером, на котором установлено специальное программное обеспечение. Мнемосхема позволяет отслеживать параметры и влиять на ход технологического процесса.

2.4 Разработка структурной схемы системы управления

Разработанная система имеет трехуровневую структуру и строится на базе микропроцессорной техники.

На нижнем уровне реализованы функции получения, обработки и передачи информации о технологических параметрах, а также передачи

информации о состоянии и работоспособности исполнительных механизмов и оборудования, размещенного на полевом уровне.

Средний уровень реализует функции: прием и обработка технологических данных с нижнего уровня, формирование команд управления, сигнализация, блокировок и защит технологического оборудования, подразумевают применение микропроцессорной техники. В щитах автоматического управления и пожаротушения, находящихся в непосредственной близости от объекта управления, размещается оборудование: микропроцессорные контроллеры, источники питания, устройства защиты, релейно-контактная аппаратура и др.

Верхний уровень выполняет функции: составление отчетов, сводок и справочных документов о состоянии технологического оборудования; формирование баз данных для хранения обработанной информации; при управлении в ручном режиме формируются и передаются сигналы управления на нижний уровень, для стабилизации заданного режима работы технологического оборудования; диагностика состояния оборудования нижнего и среднего уровней, технических и программных средств системы управления. Верхний уровень включает: АРМ оператора АСУ ТП и АРМ оператора АСПТ, связевой шкаф, принтер, резервное АРМ.

Структурная схема представлена на листе с шифром ФЮРА.421000.003 С1.

2.5 Разработка функциональной схемы системы управления

Функциональные схемы представляют собой основной технический документ, определяющий функционально-блочную структуру отдельных узлов автоматического контроля, управления и регулирования технологического процесса, а также оснащения объекта управления приборами и средствами автоматизации. Технологическое оборудование, технические средства и т.д. на таких схемах обозначают в соответствии с ГОСТ 21.403–80 [22] и ГОСТ 21.208–2013 [23].

Первичные измерительные преобразователи, исполнительные механизмы изображаются на функциональной схеме условно в виде упрощенных контуров. От них выводятся линии связи с номером измерительного или управляющего каналов. Далее линии связи идут к условному изображению щита управления в виде прямоугольника, на котором условно изображены контроллер, а также АРМ оператора.

Функциональная схема системы управления представлена на листе с шифром ФЮРА.421000.003 С2.

На первом этапе разработки функциональной схемы были определены измерительные каналы (1...8, 10, 12, 13), каналы регулирования и управления (9, 11, 15, 17, 20, 21), каналы сигнализации (1...8, 13, 14, 16, 18, 19). В измерительных каналах и в каналах регулирования используется аналоговый и дискретный сигналы.

Для измерения температуры подаваемого топлива и окислителя используются датчики 1а и 2а, которые на схеме представлены в виде условных изображений и установлены в трубопроводах для непосредственного контакта с измеряемой средой. Канал 4 передает информацию о давлении (датчик 4а) в трубопроводе подачи топлива, а канал 5 (датчик 5а) – информацию о давлении в трубопроводе подачи окислителя. Датчики давления также непосредственно установлены в месте контакта со средой. Чувствительные элементы расходомеров 7а и 8а в трубопроводах передают данные о расходе компонентов по каналам 7, 8. Для поддержания необходимого давления в камере сгорания установлен датчик давления ба, а также датчик температуры 3а. Для контроля выброса газов из камеры сгорания на выходе из сопла установлен газоанализатор 13а. Он регистрирует значения концентраций углекислого газа, угарного газа, оксидов серы и азота. С помощью РК1 и РК2 регулируются расход топлива и окислителя по каналам 9 и 11 соответственно. А по каналам 10 и 12 передается информация о положении выходного вала исполнительного механизма. Технологическая сигнализация по каналам 1...8 и 13 позволяет персоналу оперативно

реагировать на изменяющуюся ситуацию, которая может привести к опасным последствиям. Предупреждения осуществляются по верхним границам значений параметров.

После срабатывания АСПТ по каналу 15 на электрические пусковые устройства 15а передается управляющий сигнал на открытие клапанов. По каналу 14, при повышении давления в газопроводе, передается информация на АРМ оператора об успешном запуске АСПТ. По каналу 19 передается информация от извещателей охранных магнитоконтактных П1.1 о положении дверей (закрыто/открыто). Запуск АСПТ произойдет только при условии, что обе двери в помещении закрыты. От извещателей пожарных П1.2 сигнал «Пожар» передается по каналу 18 на щит пожаротушения. При обнаружении персоналом пожара возможен запуск системы пожаротушения с помощью ручного пожарного извещателя П1.3, информация с которого передается по каналу 16. Оповещатель звуковой П1.4 срабатывает при обнаружении пожара и информирует персонал о его возникновении и необходимости эвакуации. Световые табло П1.6-П1.8 включаются также при обнаружении пожара. Световое табло «Автоматика отключена» П1.5 включается при окончании работы АСПТ, когда пожар в помещении локализован и устранен.

2.6 Составление опросных листов на приборы и средства автоматизации

Опросные листы выполняются в соответствии с данными предприятий-изготовителей оборудования и комплектуются в виде отдельного выпуска с наименованием «Опросные листы». Они необходимы при разработке системы автоматизации, поскольку между выбором оборудования и его закупкой/внедрением может пройти достаточно большой период времени, за который выбранное оборудование может быть снято с производства, либо могли появиться более подходящие по тем или иным критериям варианты. Наличие опросных листов позволяет быстро осуществить подбор

альтернативного оборудования, ориентируясь на ранее заложенные в них требования.

Перед началом проектирования продукции необходимо получить или разработать и согласовать исходные технические требования от заказчика для заключения договора на выполнение работ [24]. Содержанию опросных листов должны соответствовать исходные технические требования к различным типам оборудования. Требования в опросных листах содержат информацию о: наименовании установки; требованиях государственных надзорных органов; перечнях разрешительных документов; ограничениях по габаритам; отраслях промышленности; габаритных размерах; номинальных значениях измеряемых параметров или диапазонах измерений; метрологических характеристиках; способах монтажа и т.д.

Опросные листы для используемых в АСУ ТП средствах контроля технологических параметров представлены в приложении А.

2.7 Выбор технических средств системы управления, составление спецификации

Для разработки АСУ ТП процесса горения гелеобразного топлива необходимо выбрать: программируемый логический контроллер; датчики температуры; датчики давления; расходомеры; исполнительные механизмы; газоанализатор. Для разработки АСПТ необходимо выбрать: программируемый логический контроллер, сигнализаторы давления, электрические пусковые устройства, извещатели охранные магнитоконтактные, извещатели пожарные, извещатели пожарные ручные, оповещатели звуковые, световые табло.

Осуществлять выбор технических средств автоматизации будем основываясь на параметрах надежности, стоимости, метрологических характеристиках.

2.7.1 Выбор оборудования АРМ оператора

Для обеспечения надежной и стабильной работы диспетчерской системы необходимо обеспечить минимальные системные требования к ПК диспетчеров:

- процессор Intel Core i5 или выше;
- операционная система Windows 7, Windows 8 или 8.1, Windows 10;
- оперативная память не менее 4 Гб;
- рекомендуется использовать видеокарты с видео памятью не менее 1 Гб;
- жесткий диск с частотой вращения шпинделя 7200 оборотов в минуту или SSD-диск уровня Enterprise (для надежного хранения данных);
- звуковая карта высокого качества;
- сетевой адаптер Ethernet;
- монитор с разрешением 1366×768 пикселей или выше;
- клавиатура и мышь;
- принтер.

Таким образом, на основании упомянутых выше требований было выбрано необходимое оборудование. Технические характеристики представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Технические характеристики оборудования

Оборудование	Характеристика
Системный блок	Процессор Core i5 9400; оперативная память 8 Гб; поддержка Wi-Fi, Ethernet LAN; видеокарта GeForce GTX 1650
Монитор	Диагональ 23,8"; максимальное разрешение 1920x1080 пикселей; технология изготовления матрицы IPS
Принтер	Kyocera ECOSYS M8130cidn
Клавиатура	Мембранная; бесшумные клавиши; имеется цифровой блок
Мышь	Беспроводная; оптический светодиодный сенсор; максимальное разрешение датчика 1200 dpi

2.7.2 Выбор датчиков температуры

В разрабатываемой системе необходимо измерять температуру кислорода, гелеобразного топлива и пламени в камере сгорания.

Температура кислорода и гелеобразного топлива в трубопроводах составляет до 80 °С, а пламени – до 600 °С.

Далее в таблице 2.3 представлены основные технические характеристики датчиков с унифицированным выходным сигналом, используемых в трубопроводах [25, 26].

Таблица 2.3 – Технические характеристики датчиков температуры

Параметр	Тип датчика температуры, характеристика		
	ТСМУ-205	Метран-286	ТПУ 0304/М1-Н
Диапазон измерения	-50...+150 °С	-50...+500 °С	-50...+100 °С
НСХ	100М	Pt100	100П
Класс допуска	1	2	2
Выходной сигнал	4...20 мА	4...20 мА	4...20 мА
Степень защиты	IP65 (сальник М16×1,5)	IP65	IP65 (сальник М16×1,5)
Цена	от 4185 руб.	от 17300 руб.	от 7085 руб.

На основании упомянутых выше критериев был выбран термопреобразователь типа ТСМУ-205 производителя «Элемер» (Россия).

Осуществим выбор датчика температуры для камеры сгорания. В таблице 2.4 представлены основные технические характеристики датчиков температуры [25, 27].

Таблица 2.4 – Технические характеристики датчиков температуры для КС

Параметр	Тип датчика температуры, характеристика		
	ДТПН295-0918.630.1	Метран-288	Метран-2700
Диапазон измерения	-40...+1250 °С	0...+1200 °С	-40...+1000 °С
НСХ	N	N	K
Класс допуска	1	2	2
Выходной сигнал	4...20 мА	4...20 мА	4...20 мА
Степень защиты	IP54	IP65	IP54
Цена	от 19576 руб.	от 13000 руб.	от 15000 руб.

Выберем датчик типа Метран-288 от производителя «Метран», поскольку он имеет схожие характеристики с другими датчиками, но обладает наименьшей стоимостью.

2.7.3 Выбор датчиков давления

Для контроля давления в трубопроводах подачи гелеобразного топлива и кислорода необходимо установить датчики давления. В таблице 2.5 представлены основные технические характеристики датчиков [25, 26, 28].

Таблица 2.5 – Технические характеристики датчиков давления

Параметр	Тип датчика давления, характеристика		
	АИР-10SH	Метран 150 TG2	МИДА-ДИ-13П
Диапазон измерения	от 4,5 кПа до 2,5 МПа	от 0,02 до 1 МПа	от 0 до 0,6 МПа
Выходной сигнал	4...20 мА	4...20 мА	4...20 мА
Степень защиты	IP65	IP66	IP65
Цена	от 14850 руб.	от 79000 руб.	от 9450 руб.

На основании вышеупомянутых критериев выберем датчик типа МИДА-ДИ-13П-ОМ20 от производителя «МИДА».

В рассматриваемой АСУ наиболее важным контролируемым параметром является давление в камере сгорания, которое создает тягу для движения ракеты в реальных условиях. Для его контроля осуществим выбор датчика давления. В таблице 2.6 представлены основные технические характеристики датчиков температуры [29-31].

Таблица 2.6 – Технические характеристики датчиков давления для КС

Параметр	Тип датчика давления, характеристика		
	Danfoss MBS 1700	WIKА E-10	Gefran K3
Диапазон измерения	от 0 до 1,6 МПа	от 0 до 1,6 МПа	от 0 до 3,5 МПа
Выходной сигнал	4...20 мА	4...20 мА	4...20 мА
Степень защиты	IP65	IP67	IP65
Цена	от 5500 руб.	от 36000 руб.	от 50000 руб.

Выбираем датчик WIKA E-10, так как он может применяться при работе с агрессивными средами и обладает взрывозащищенной оболочкой.

Для того, чтобы убедиться в срабатывании АСПТ необходимо на газопровод поставить датчик давления, который будет сигнализировать о повышении давления, а значит о срабатывании АСПТ. В таблице 2.7 представлены основные технические характеристики сигнализаторов давления [32, 33].

Таблица 2.7 – Технические характеристики сигнализаторов давления

Параметр	Тип сигнализатора давления, характеристика	
	СДУ-М-02	СДГ-2
Диапазон давлений рабочей среды	0...15 МПа	1,5...5,5 МПа
Время срабатывания	не более 1 с	не более 1 с
Степень защиты	IP54	IP54
Цена	от 2000 руб.	от 2600 руб.

Выбираем сигнализатор давления СДУ-М-02 от производителя «Спецавтоматика» (Россия) так как этот вариант наиболее дешевый.

2.7.4 Выбор датчиков расхода

Количество подаваемого топлива необходимо измерять с помощью расходомера. В таблице 2.8 представлены основные технические характеристики датчиков расхода [25, 26].

Таблица 2.8 – Технические характеристики датчиков расхода топлива

Параметр	Тип датчика расхода, характеристика	
	ЭЛЕМЕР-РЭМ	8800DF015 Reducer Rosemount
Условный диаметр	15 мм	15 мм
Максимальный расход	6,5 м ³ /ч	5,4 м ³ /ч
Температура измеряемой среды	-40...+150 °С	-40...+232 °С
Степень защиты	IP67	IP66
Цена	от 18800 руб.	от 30000 руб.

Таким образом, на основании вышеупомянутых критериев выбираем расходомер ЭЛЕМЕР-РЭМ от производителя «Элемер» (Россия).

Далее осуществим выбор датчика для измерения расхода кислорода. В таблице 2.9 представлены основные технические характеристики датчиков расхода [25, 26].

Таблица 2.9 – Технические характеристики датчиков расхода кислорода

Параметр	Тип датчика расхода, характеристика	
	ЭЛЕМЕР-РВ	8800DR080 Reducer Rosemount
Условный диаметр	50 мм	80 мм
Максимальный расход	530 м ³ /ч	593 м ³ /ч
Температура измеряемой среды	-50...+350 °С	-40...+232 °С
Степень защиты	IP67	IP66
Цена	от 25000 руб.	от 36000 руб.

Так как характеристики удовлетворяют требуемым, то выбираем наиболее дешевый вариант – расходомер ЭЛЕМЕР-РВ от производителя «Элемер» (Россия).

2.7.5 Выбор газоанализатора

Для контроля качества процесса горения гелеобразного топлива в проектируемой системе предусмотрено наличие газоанализатора для измерения содержания кислорода в дымовых газах, а также вредных выбросов. В таблице 2.10 представлены основные технические характеристики газоанализаторов [34, 35].

Таблица 2.10 – Технические характеристики газоанализаторов

Параметр	Тип газоанализатора, характеристика	
	Многокомпонентный газоанализатор МАГ-6Т-8-В-16А	Анализатор качества горения АКГ-МП-2П
Измеряемые газы	Аммиак; диоксид азота; диоксид серы; диоксид углерода; кислород; метан; монооксид углерода; сероводород	Аммиак; диоксид азота; диоксид серы; диоксид углерода; кислород; метан; монооксид углерода; сероводород

Продолжение таблицы 2.10

Параметр	Тип газоанализатора, характеристика	
	Многокомпонентный газоанализатор МАГ-6Т-8-В-16А	Анализатор качества горения АКГ-МП-2П
Количество каналов измерения	1	2
Выходной сигнал	4...20 мА	4...20 мА
Цена	от 31800 руб.	от 11900 руб.

Из таблицы 2.10 видно, что анализатор качества горения АКГ-МП-2П обладает дополнительным измерительным каналом, а также наименьшей ценой. Таким образом, выбираем данный газоанализатор.

2.7.6 Выбор исполнительного механизма

Исполнительный механизм выбираем исходя из вида регулирующего органа и крутящего момента [36], а также на основании типовых решений. Для регулирования расходов гелеобразного топлива и кислорода выбираем привод электрогидравлический SKD60 [37] от производителя Siemens с номинальным усилием на выходном штоке 1000 Н, номинальное значение времени полного хода штока открытия (закрытия) 30 с (15 с), номинальное значение полного хода штока 20 мм. Данный привод имеет компактный корпус и обладает ручным регулятором, расположенным на верхней части устройства. Также имеет возвратную пружину, которая срабатывает при нарушении управляющего сигнала или электропитания и возвращает шток в положение хода «0%», что особенно актуально для взрыво- и пожароопасного испытательного комплекса ракетного двигателя.

2.7.7 Выбор электрического пускового устройства

Для срабатывания системы газового пожаротушения необходимо выбрать электрическое пусковое устройство. Оно должно обеспечивать быстрое и надежное открытие клапана. В таблице 2.11 представлены электрические пусковые устройства [38].

Таблица 2.11 – Технические характеристики электрических пусковых устройств

Параметр	Тип датчика расхода, характеристика	
	ЭП-2-Р	ЭП-1
Время срабатывания	не более 1 с	не более 2 с
Максимальный ток	1,5 А	1,1 А
Цена	от 10000 руб.	от 9000 руб.

Таким образом, выбираем электрическое пусковое устройство ЭП-2-Р от производителя «ЛУИС+» (Россия), так как оно обеспечивает наиболее быстрое срабатывание.

2.7.8 Выбор программируемого логического контроллера

Рассмотрим программируемый логический контроллер «SIMATIC S7-300» [39]. Данный контроллер предназначен для организации средних и малых систем. ПЛК обладает модульной конструкцией, естественным охлаждением, возможностью применения структур локального и распределенного ввода-вывода, широкими коммуникационными возможностями, множеством функций. Основные технические характеристики «SIMATIC S7-300» приведены в таблице 2.12.

Таблица 2.12 – Технические характеристики «SIMATIC S7-300»

Технические характеристики	Тип ПЛК: SIMATIC S7-300
Рабочая память, Кб	128
Время выполнения: логических операций, операций с фиксированной точкой, операций с плавающей точкой, с	0,06 0,16 0,59
Количество флагов/ таймеров/счетчиков, шт.	2048/256/256
Количество каналов вводов – вывода, дискретных/аналоговых, не более, шт.	16384/1024
Языки программирования	STEP 7 (LAD, FBD, STL), S7-SCL, S7-GRAPH
Напряжение питания, В	24

Далее рассмотрим программируемый логический контроллер «ЭЛСИ-ТМК» [40]. Он предназначен для построения систем автоматизации малого и среднего масштаба во всех сферах промышленного производства. ПЛК «ЭЛСИ-ТМК» в своем составе имеет модульную архитектуру и позволяет использовать расширенный набор необходимых модулей:

- модули питания TP;
- процессорные модули TC;
- модули дискретного ввода/вывода TD;
- модули счетных входов;
- модули аналогового ввода/вывода TA;
- коммуникационные модули TN.

Рассмотрим программируемый логический контроллер «ЭЛСИ-ТМ» [41]. Данный контроллер предназначен для систем малого и среднего масштаба. Благодаря модульной структуре возможно масштабирование системы. Так как данный ПЛК поддерживает стандартные промышленные протоколы, возможна совместимость с большим рядом датчиков. Данный ПЛК имеет сертификаты об утверждении типа средств измерений, соответствия ГОСТ Р и разрешение на применение Федеральной службы по технологическому надзору.

Таким образом, для АСУ ТП выбираем ПЛК «ЭЛСИ-ТМК», так как его модульная структура позволяет конфигурировать контроллер под любые задачи. Для АСПТ выбираем контроллер «ЭЛСИ-ТМ», так как он также обладает модульной структурой и возможностью поддержки различных протоколов.

Заказная спецификация приборов и средств автоматизации системы управления представлена на листе с шифром ФЮРА.421000.003 СО1.

2.8 Разработка электрических схем соединений щитов

Принципиальные электрические схемы определяют полный состав приборов, аппаратов и устройств, а также связей между ними. Совокупность

их действий обеспечивает решение задач управления, регулирования, защиты, измерения и сигнализации. Принципиальные схемы служат основанием для разработки других документов проекта: монтажных таблиц щитов, шкафов и пультов, схем внешних соединений и др.

При разработке схем выполнены следующие действия:

- нанесены на схему условные обозначения технических средств автоматизации;
- произведены соединения токопроводящих жил с клеммами устройств;
- произведена маркировка проводников.

Схема принципиальная электрическая щита управления представлена на листах с шифром ФЮРА.421000.003 Э4.

Ввод питания в щит управления осуществляется через клеммную сборку ХТ1. На входе питания система имеет защиту от перенапряжений Z01. В щите предусмотрена розетка XS1, подсветка VD1 для удобства эксплуатации. Термореле КК1, при повышении температуры выше уставки, позволяет запускать систему вентиляции М1 для защиты оборудования щита от перегрева. Питание устройств внутри щита осуществляется с помощью двух источников бесперебойного питания EF UPS 1AC/24DC 8, преобразующих напряжение сети переменного тока 220 В в постоянное напряжение 24 В. Выключатели QF1 и QF2, QF3, QF4 предназначены для прекращения подачи напряжения на источники бесперебойного питания, розетку и вентилятор соответственно. Для ввода аналоговых сигналов на модули ПЛК «ЭЛСИ-ТМК» и выдачи управляющих воздействий на регулирующие клапаны в щите предусмотрены разделительные преобразователи ET-422, которые обеспечивают гальваническую развязку цепей контроллера и полевых цепей. ПЛК состоит из модуля питания, центрального процессора, двух модулей аналогового ввода/вывода и модуля аналогового ввода. Ввод сигналов с датчиков в щит управления осуществляется через клеммные сборки ХТ-А11, ХТ-А12 и ХТ-А13. Передача

информации с датчиков до ПЛК по линиям связи осуществляется с помощью аналоговых сигналов 4...20 мА. Сигнал управляющего воздействия реализуется с помощью аналоговых сигналов 4...20 мА, проходящих на регулирующие клапаны с ПЛК «ЭЛСИ-ТМК».

Принципиальная электрическая схема щита пожаротушения представлена на листах с шифром ФЮРА.421000.013 Э4.

Ввод питания в щит пожаротушения осуществляется через клеммную сборку ХТ1, имеется защита от перенапряжения Z01. В щите предусмотрена розетка XS1, подсветка VD1, система вентиляции (M1 и КК1). Питание устройств внутри щита осуществляется с помощью источника бесперебойного питания G1, преобразующего напряжение сети переменного тока 220 В в постоянное напряжение 24 В. Также предусмотрена аккумуляторная батарея G2, которая позволяет функционировать системе при отключении электроэнергии. Выключатели QF1 и QF2, QF3 предназначены для прекращения подачи напряжения на источник бесперебойного питания, розетку и вентилятор соответственно. ПЛК состоит из модуля питания, центрального процессора, модуля аналогового ввода, модулей дискретного ввода и вывода. Для реализации проверки целостности цепи в щите предусмотрено устройство защиты аналоговых сигналов BZ16-24DC-P, которое обеспечивают гальваническую развязку цепей контроллера и полевых цепей. Для преобразования и гальванического разделения входных дискретных сигналов используется блок БС-117-12/24. Ввод и вывод сигналов в щит и из него осуществляется через клеммные сборки ХТ-2, ХТ-3, ХТ-4. На двери щита пожаротушения присутствует световая сигнализация и кнопки управления.

2.9 Составление перечней элементов принципиальных электрических схем

Основные характеристики аппаратов схемы записывают в перечень. Такой список оформлен в виде таблицы и заполнен сверху вниз, где указаны

номера позиций по заказной спецификации, обозначения по принципиальной электрической схеме, наименование, тип, количество аппаратов, техническая характеристика и примечания [42].

На отдельных листах с шифром ФЮРА.421000.003 ПЭ представлен перечень элементов принципиальной электрической схемы щита управления. На листах с шифром ФЮРА.421000.013 ПЭ представлен перечень элементов принципиальной электрической схемы щита пожаротушения.

Заполнение таблиц выполнено в соответствии с принципиальными электрическими схемами. В перечень элементов вписаны вся аппаратура и приборы схем, а именно: ПЛК, источники бесперебойного питания, модули защиты от перенапряжений, автоматические выключатели, преобразователи искробезопасные разделительные, релейные модули, вилка преобразователей искробезопасных разделительных, розетки однофазные, термостаты, вентиляторы, светодиодные ленты, клеммные блоки, кнопки, лампы.

2.10 Проектирование схемы внешних проводок

Схема соединений внешних проводок – это комбинированная схема, на которой показывают электрические и трубные связи между приборами и средствами автоматизации, установленными на технологическом оборудовании, вне щитов и на щитах, а также подключения проводок к приборам и щитам [43]. Схемы соединений и подключения выполняют по ГОСТ [44].

Для АСУ ТП горения гелеобразного топлива схема соединений внешних проводок представлена на листе с шифром ФЮРА.421000.003 С4.

На схеме вверху поля чертежа размещена таблица с поясняющими надписями. Она состоит из следующих строк: наименования параметра и места отбора импульса, позиция прибора. Под таблицей расположены условные изображения первичных преобразователей (температуры, давления, расхода, концентрации дымовых газов), регулирующих клапанов, устанавливаемых непосредственно на технологическом оборудовании и

технологических трубопроводах. Под таблицей с поясняющими надписями также расположены трубные проводки. Импульсные трубки предназначены для передачи величины давления на измерительные преобразователи. В соответствии с указаниями руководящего материала РМ4-6-92 «Проектирование электрических и трубных проводок. Часть 2. Трубные проводки» [45] осуществлялся выбор труб импульсных.

Первичные преобразователи и щит управления соединены между собой электрическими линиями связи различной длины, выполненными с помощью электрических кабелей КВВГ, КРВГ. Также присутствует ввод питания к щиту автоматизации. Все используемые кабели представлены в таблице 2.13. Линии связи от первичных преобразователей объединены с помощью трех коробок соединительных клеммных КСК. Все линии связи пронумерованы.

Таблица 2.13 – Используемые кабели

Наименование кабеля	Источник
КВВГ 2×0,75	[46]
КРВГ 4×1, КРВГ 5×1, КРВГ 7×1	[47]
ВВГ _{нг} (А)-LS-3×1,5	[48]
КВВГ _{нг} 12×1,5, КВВГ _{нг} 14×0,75	[49]

2.11 Разработка общего вида щита управления и сборочного чертежа щита пожаротушения

Чертеж общего вида щита показывает его конструкцию и как взаимодействуют его части. Исходными материалами для проектирования общих видов щитов являются функциональные схемы систем автоматизации и принципиальные электрические схемы, которые были спроектированы выше.

Чертеж общего вида щита управления для АСУ ТП горения гелеобразного топлива представлен на отдельном листе с шифром ФЮРА.421000.003 ВО. Перечень составных частей общего вида щита

управления представлен на отдельных листах с шифром ФЮРА.421000.003 СО.

Исходя из объема технических средств и их количества, выбран шкаф автоматизации ЩМП-5-0 36 УХЛЗ IP31 [50] производства компании ИЕК с габаритными размерами 1000x650x300 мм.

При компоновке в верхней части шкафа автоматизации размещаем контроллер «ЭЛСИ-ТМК» для удобства его использования и быстрого доступа. В нижней части шкафа располагаем клеммы для ввода сигналов по линиям связи с технологического объекта. В средней части – остальное оборудование.

Все основное оборудование, помимо контроллера, крепится на стандартную DIN-рейку шириной 35 мм. Контроллер монтируется на шасси, которое прикручивается к монтажной панели. Провода располагаются в закрытых коробах шириной 25 мм. Особые требования предъявляются к креплению источника питания: расстояние слева и справа от оборудования не менее 5 мм, сверху и снизу – 30 мм.

Сборочный чертёж шкафа это один из элементов конструкторской документации. Документ предназначен для раскрытия геометрического расположения элементов, входящих в шкаф автоматизации. Он создает полное представление о том, какой состав имеет сборочная единица, а также каково ее функциональное назначение.

Сборочный чертеж щита пожаротушения представлен на отдельных листах с шифром ФЮРА.421000.003 СБ. Спецификация щита пожаротушения представлена на листах с шифром ФЮРА.421000.013 СО.

Для размещения оборудования был выбран щит ЩМП-7-0 36 УХЛЗ IP31 ИЕК [51], который поставляется с монтажной панелью с размерами 1250x690 мм. В нем можно разместить все необходимое оборудование, а также дополнительное, при масштабировании системы. Оборудование скомпоновано аналогично размещению в шкафу управления.

2.12 Разработка фрагментов информационного, математического и программного обеспечений

Информационное обеспечение представляет собой совокупность систем кодирования и классификации технологической и технико-экономической информации, сигналов, справочной и оперативной информации. Информационное обеспечение включает перечень и характеристики сигналов о техническом объекте управления и системе управления; описание систем классификации и кодирования технической и технико-экономической информации; описание массивов информации, форм документов и видеокадров; описание нормативно-справочной информации. Информационное обеспечение должно обеспечивать полноту, непротиворечивость, отсутствие избыточности и дублирования информации, необходимой для реализации функций управления.

Программное обеспечение – совокупность программ и эксплуатационной программной документации, необходимых для реализации функций автоматизированной системы управления и заданного режима функционирования комплекса технических средств. Оно состоит из общего ПО и других средств вычислительной техники, инструментального ПО, при помощи которого производится разработка прикладного ПО, обеспечивающего решение конкретных задач функционирования объекта управления согласно заданным алгоритмам управления.

Рассмотрим инструментальный программный комплекс промышленной автоматизации CoDeSys. Производится и распространяется компанией 3S-Smart Software Solutions GmbH (Кемптен, Германия).

Основой комплекса CoDeSys является среда разработки прикладных программ для ПЛК. Она распространяется бесплатно и может быть без ограничений установлена на нескольких рабочих местах. Данный программный комплекс может быть использован для создания программы для программируемых логических контроллеров «ЭЛСИ-ТМК» и «ЭЛСИ-ТМ»,

упомянутых выше. Далее представлены фрагменты листинга программы, разработанные в программном комплексе CoDeSys.

Фрагмент листинга программы объявления переменных:

```
PROGRAM PLC_PRG
```

```
VAR
```

```
T1 : REAL; //Температура подачи топлива
```

```
T2 : REAL; //Температура подачи кислорода
```

```
T3 : REAL; //Температура в камере сгорания
```

```
T3MAX := 600; //Максимально допустимая температура в камере сгорания
```

```
P1 : REAL; //Давление в трубопроводе подачи топлива
```

```
P2 : REAL; //Давление в трубопроводе подачи кислорода
```

```
P3 : REAL; //Давление в камере сгорания
```

```
P3MAX := 1.6; //Максимально допустимое давление в камере сгорания
```

```
R1 : REAL; //Расход топлива
```

```
R2 : REAL; //Расход кислорода
```

```
T4 : BOOL; //Авария. Превышение максимально допустимой температуры в камере сгорания
```

```
P4: BOOL; //Авария. Превышение макс. допустимого давления в камере сгорания
```

Фрагмент листинга программы срабатывания аварийной сигнализации:

```
IF T3 >= T3MAX THEN //При превышении максимально возможного значения температуры в камере сгорания происходит срабатывание сигнализации на АРМ оператора
```

```
T4 := TRUE;
```

```
ELSE T4 := FALSE;
```

```
END_IF;
```

```
IF P3 >= P3MAX THEN //При превышении максимально возможного значений давления в камере сгорания происходит срабатывание сигнализации на АРМ оператора
```

```
T4 := TRUE;
```

```
ELSE T4 := FALSE;
```

```
END_IF;
```

Математическое обеспечение это комплекс математических методов, моделей и алгоритмов решения задач, а также методов обработки информации и формирования команд управления для воздействия на технологический

процесс. В данной работе представлен фрагмент алгоритма работы АСУ ТП горения гелеобразного топлива при пуске и стационарном режиме работы в виде блок-схемы (рисунок 2.4).

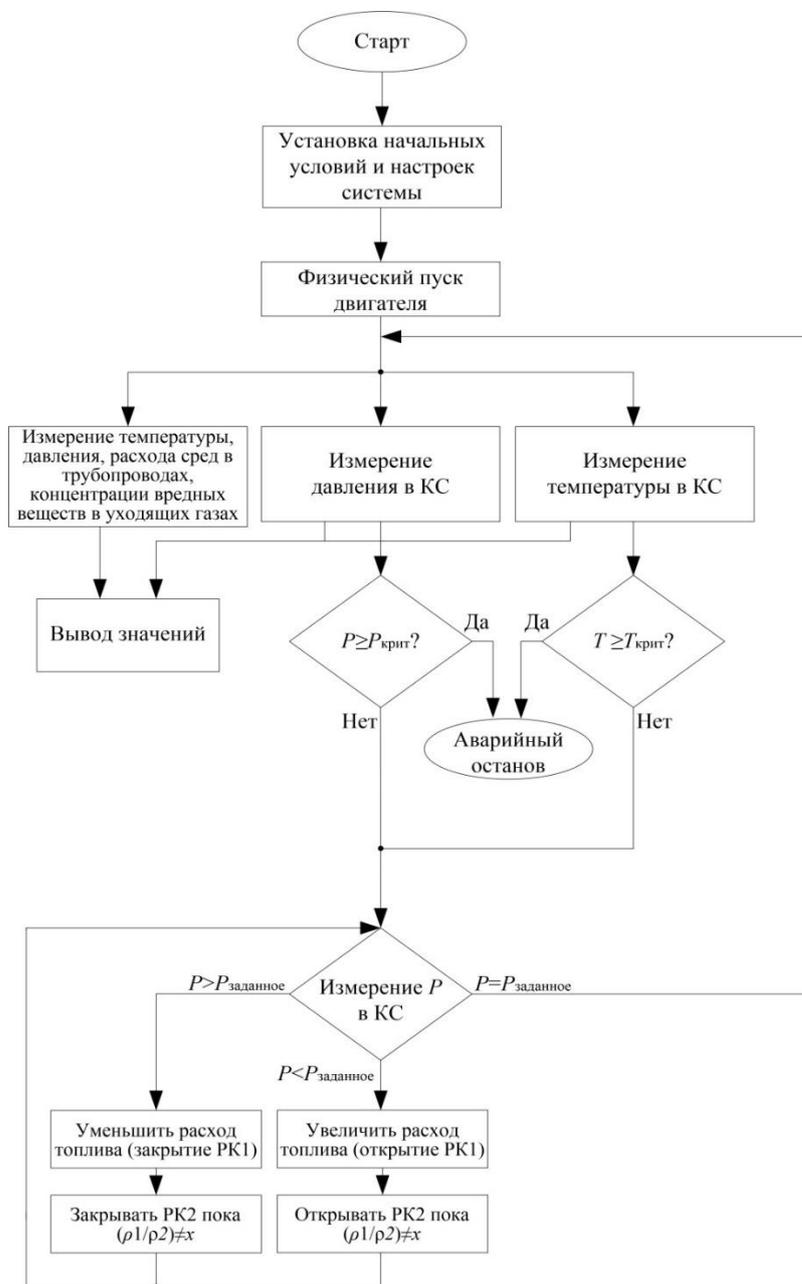


Рисунок 2.4 – Фрагмент блок-схемы алгоритма управления: P – давление в КС; $P_{\text{крит}}$ – критическое давление в КС; T – температура в КС; $T_{\text{крит}}$ – критическая температура в КС; $P_{\text{заданное}}$ – уставка давления в КС; РК1 – регулирующий клапан подачи топлива; РК2 – регулирующий клапан подачи кислорода; ρ_1 – расход топлива; ρ_2 – расход окислителя; x – уставка величины отношения ρ_1/ρ_2

2.13 Разработка экранных форм мнемосхем SCADA-системы

В данном разделе разработаны мнемосхемы для АСУ ТП горения топлива и АСПТ. Мнемосхемы соответствуют следующим требованиям: присутствуют все необходимые для полного контроля и управления технологическим процессом элементы; наиболее важные элементы выделены формой, размером, цветом от остальных; размер и форма панели обеспечивают оператору необходимое и однозначное зрительное восприятие всех информационных элементов; архивация данных производится в реальном времени; графическое и табличное отображение данных, участвующих в технологическом процессе, отображаются на экране АРМ.

Мнемосхема, разработанная для системы автоматического управления процессом горения гелеобразного топлива, представлена на рисунке 2.14.

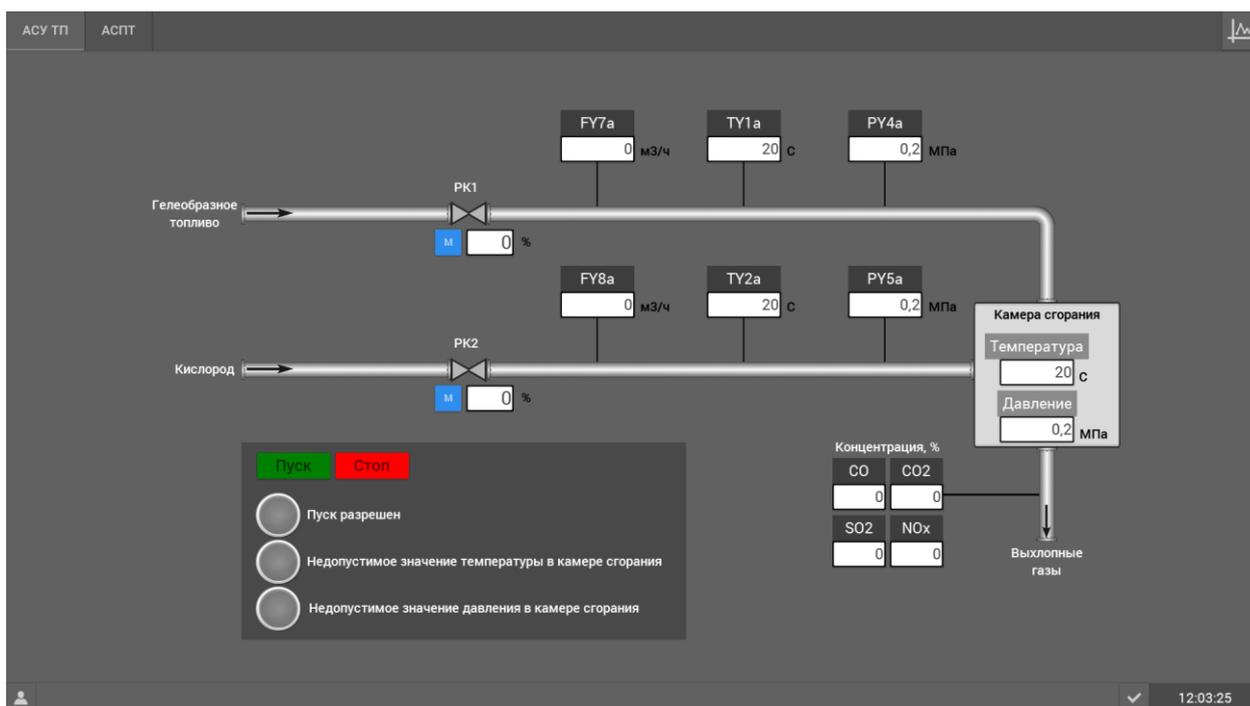


Рисунок 2.5 – Окно SCADA АСУ ТП

На рисунке 2.6 представлена разработанная мнемосхема для системы пожаротушения.

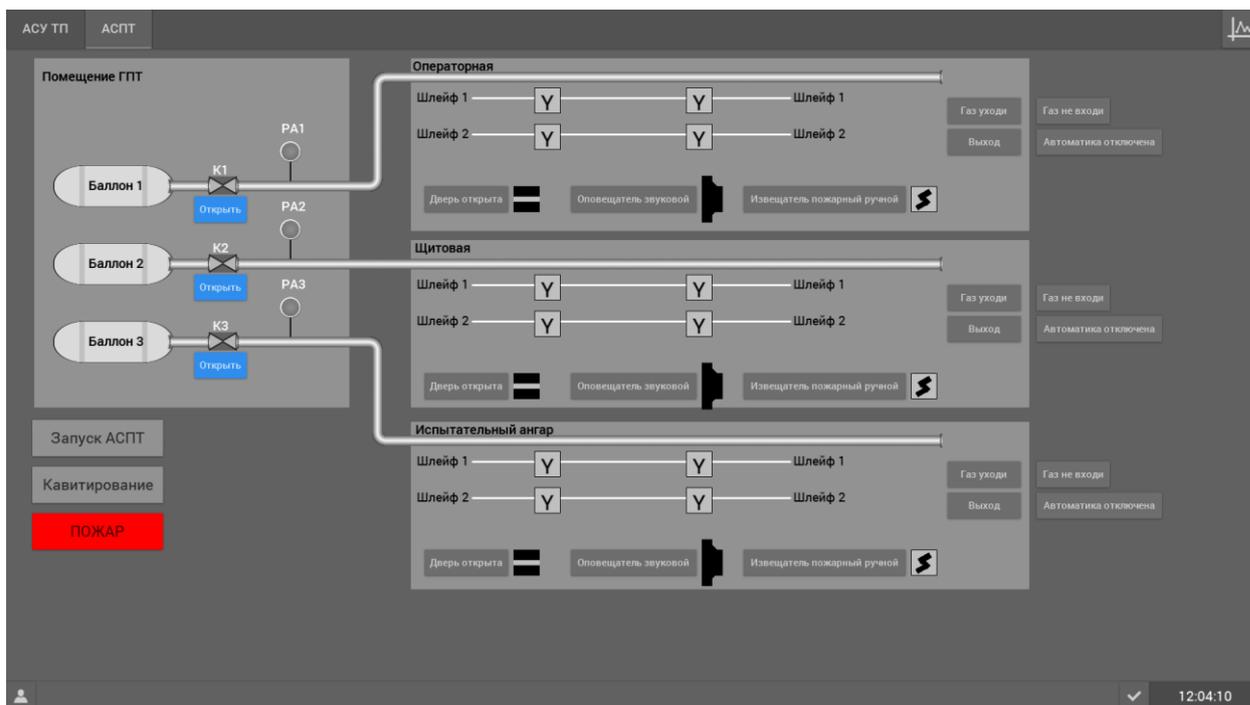


Рисунок 2.6 – Окно SCADA АСПТ

Главной частью SCADA-системы АСУ ТП является упрощенный технологический процесс, изображенный в виде труб, регулирующих клапанов, камеры сгорания, условных изображений датчиков, по показаниям которых можно отслеживать текущие параметры о ходе технологического процесса. Под условным изображением технологического процесса находятся кнопки для пуска и останова процесса. Оператор имеет возможность управлять положением регулирующих клапанов. Также внизу расположено окно аварийной сигнализации. На главном экране слева вверху расположены кнопки для перемещения между мнемосхемами АСУ ТП и АСПТ.

На мнемосхеме SCADA-системы АСПТ изображено оборудование, непосредственно входящее в состав АСПТ. На мнемосхеме условно изображены помещения ангара. В помещении ГПТ находятся газовые баллоны, клапаны с электрическими пусковыми устройствами и сигнализаторы давления. В помещениях операторной, щитовой, испытательного ангара находятся шлейфы пожарной сигнализации, извещатели пожарные ручные, извещатели магнитоконтактные, световые табло. Слева внизу расположены кнопки управления и световая сигнализация

«Пожар». При срабатывании одного из датчиков на экране оператора появится световое оповещение на соответствующем датчике.

3 Расчет параметров настройки регулятора

3.1 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 по каналу задания использована динамическая модель изменения давления в камере сгорания, составленная на базе экспериментальных исследований, проведенных на реальном объекте [52]. Кривая разгона представлена на рисунке 3.1.

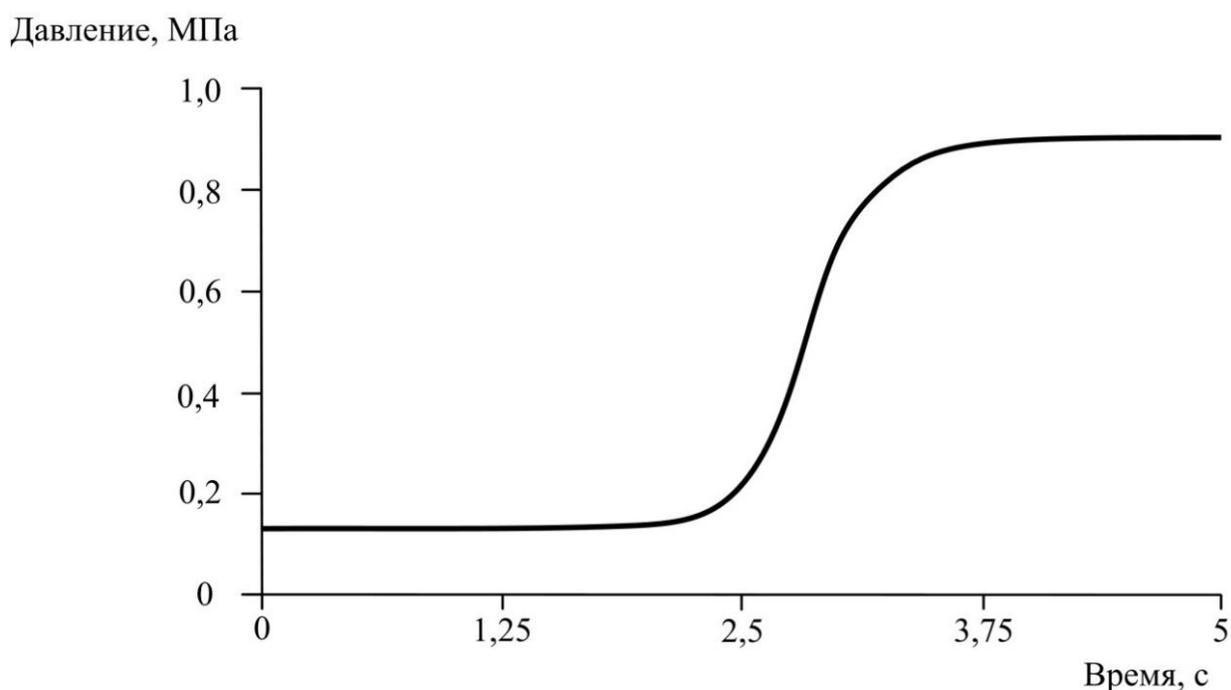


Рисунок 3.1 – Кривая разгона объекта управления

До начального момента времени РК-1 остается закрытым. В начальный момент времени от ПЛК на РК-1 подается единичный ступенчатый сигнал на открытие клапана на 100 %. С течением времени давление в камере сгорания

увеличивается с 0,13 до 0,90 МПа. Таким образом, получается зависимость изменения давления в камере сгорания от времени.

По полученной кривой разгона необходимо определить динамические параметры объекта, такие как: постоянная времени, время запаздывания, коэффициент передачи.

Передаточная функция объекта представляет собой апериодическое звено с запаздыванием:

$$W_o(p) = \frac{k}{(T \cdot p + 1)} e^{-p \cdot \tau},$$

где k – коэффициент усиления;

p – оператор Лапласа;

τ – время запаздывания;

T – постоянная времени.

На графике кривой разгона проводится касательная в максимальной точке скорости изменения величины (рисунок 3.2).

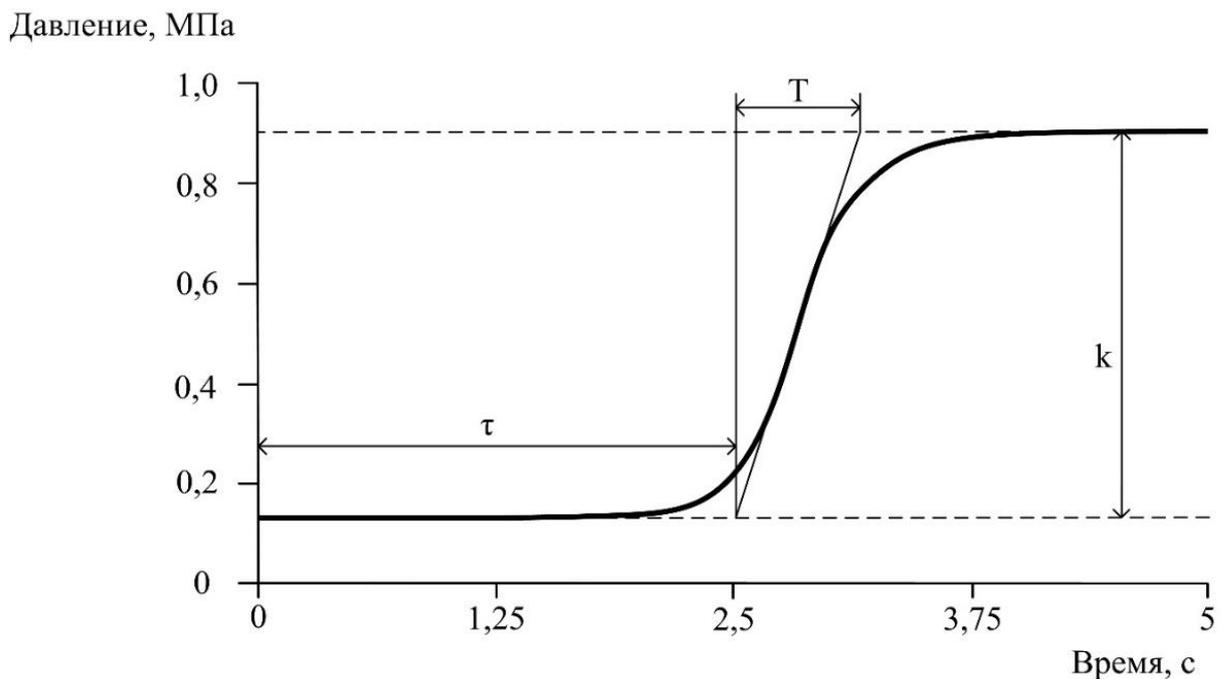


Рисунок 3.2 – Кривая разгона объекта управления

По графику определяются динамические параметры объекта:

- коэффициент усиления $k = 0,77$ МПа;
- время запаздывания $\tau = 2,5$ с;
- постоянная времени $T = 0,64$ с.

Тогда передаточная функция имеет вид:

$$W_o(p) = \frac{0,77}{(0,64 \cdot P + 1)} e^{-2,5 \cdot p}.$$

3.2 Выбор структурной схемы системы управления

Регулирование давления в камерах сгорания различных установок является важным процессом. В авиационных двигателях этот параметр отвечает за возникающую силу тяги, благодаря которой объект набирает требуемую скорость. Рассмотрим некоторые системы регулирования, относящиеся к камерам сгорания.

В данной работе в качестве схемы автоматического регулирования выбрана одноконтурная система (рисунок 3.3), так как она является наиболее простой, содержит меньшее количество элементов, а, следовательно, является более надежной. В качестве закона регулирования выбран ПИ-закон. Данный закон регулирования обладает рядом преимуществ: нулевая статическая ошибка регулирования; простая настройка (настраивается коэффициент усиления и постоянная времени интегрирования); малая чувствительность к шумам в канале измерения (в отличие от ПИД-регулятора).

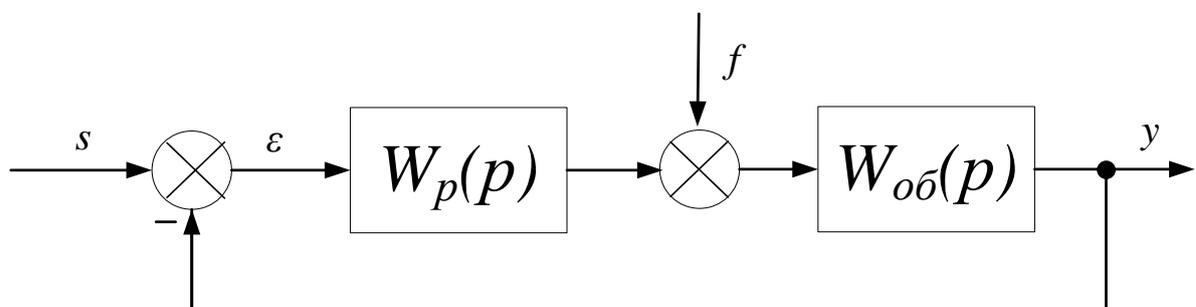


Рисунок 3.3 – Структурная схема системы регулирования

3.3 Параметрический синтез системы управления

Для того, чтобы осуществить расчёт АСР с ПИ-регулятором, представленной на рисунке 3.3, необходимо провести синтез системы автоматического регулирования при $\psi=0,998$. Требования к степени затухания: не ниже 0,95.

Основная идея метода расчета [53] состоит в том, чтобы при $M=1$ выбором параметров системы регулирования максимально расширить в области низких частот горизонтальный участок АЧХ системы. Это соответствует увеличению диапазона пропускаемых частот, а, следовательно, и быстродействию системы регулирования. Математическая формулировка этой идеи может быть представлена так:

$$\frac{d^m A_3(\omega)}{d\omega^m} \Big|_{\omega=0} = 0, \quad m = 1, 2, \dots, z,$$

где z – число варьируемых параметров системы (число параметров регулятора).

Передаточная функция разомкнутой системы определяется как:

$$W(p) = W_o(p) \cdot W_p(p) = \frac{k}{(T_0 \cdot p + 1) \cdot e^{p\tau}} \cdot k_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_I \cdot p} \right),$$

где $W_o(p)$ – передаточная функция объекта; $W_p(p)$ – передаточная функция регулятора.

Преобразуем данную формулу. Получим формулу следующего вида:

$$W(p) = \frac{k}{(T_0 \cdot p + 1) \cdot e^{p\tau}} \cdot \frac{k_1 + k_p \cdot p}{p},$$

где $k_1 = k_p / T_I$.

Передаточная функция замкнутой системы имеет вид:

$$W_3(p) = \frac{W_o(p) \cdot W_p(p)}{1 + W_o(p) \cdot W_p(p)} = \frac{C_0 + C_1 \cdot p}{(T_0 \cdot p^2 + p) \cdot e^{p\tau} + C_0 + C_1 \cdot p} = \frac{B(p)}{A_1(p) + B(p)}.$$

Определим производные от $A_1(p)$ и $B(p)$ по p при $p=0$ и подставим их в следующую формулу для астатической системы регулирования (для $m=1$ и $m=2$):

$$\sum_{k=0}^{2m} (-1)^k \cdot C_{2m}^k \left[A_1^{(2m-k)}(i\omega) \cdot A_1^{(k)}(i\omega) \right]_{/\omega=0} = \\ = \sum_{k=0}^{2m} (-1)^k \cdot C_{2m}^k \left[A_1^{(2m-k)}(i\omega) \cdot B^{(k)}(i\omega) \cdot A_1^{(k)}(i\omega) \cdot B^{(2m-k)}(i\omega) \right]_{/\omega=0}.$$

В результате получим систему уравнений:

$$\begin{cases} 2 \cdot (T+1) \cdot \tau \cdot k \cdot k_1 - 2 \cdot k \cdot k_p = 1, \\ (3 \cdot T+1) \cdot \tau \cdot k \cdot k_1 - 3 \cdot (2 \cdot T+1) \cdot k \cdot k_p = -3 \cdot T^2, \end{cases}$$

где $T=T_0/\tau$.

Разрешив систему относительно $\tau \cdot k \cdot k_1$ и $k \cdot k_p$ и подставив в данные формулы известные величины получим:

$$2,5 \cdot 0,77 \cdot \frac{k_p}{T_H} = \frac{6 \cdot 0,07 + 6 \cdot 0,26 + 3}{4 \cdot (3 \cdot 0,07 + 3 \cdot 0,26 + 1)}, \\ 0,77 \cdot k_p = \frac{6 \cdot 0,02 + 6 \cdot 0,07 + 3 \cdot 0,26 + 1}{4 \cdot (3 \cdot 0,07 + 3 \cdot 0,26 + 1)}.$$

Решив данную систему уравнений с помощью программы Mathcad получим:

$$T_H = 1,147, \\ k_p = 0,374.$$

Таким образом, передаточная функция регулятора имеет вид:

$$W_p(p) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_u p} \right) = 0,374 + \frac{0,374}{1,147 \cdot p}.$$

3.4 Построение переходных процессов и оценка качества работы системы

3.4.1 Расчет, построение и оценка качества переходного процесса в замкнутой АСР по каналу регулирующего воздействия

Передаточная функция имеет вид:

$$W_{s-y} = \frac{W_o(p) \cdot W_p(p)}{1 + W_o(p) \cdot W_p(p)},$$

Рассчитаем ВЧХ замкнутой АСР с помощью программных вычислительных средств в диапазоне частот от 0 до 2 с⁻¹ с шагом 0,1 с⁻¹. Полученные результаты представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Результаты расчета ВЧХ замкнутой системы

$\omega, \text{с}^{-1}$	$\text{Re}_{\text{з.с.}}(\omega)$	$\omega, \text{с}^{-1}$	$\text{Re}_{\text{з.с.}}(\omega)$
0	1,000	1,100	-0,138
0,100	0,921	1,200	-0,045
0,200	0,694	1,300	0,025
0,300	0,340	1,400	0,075
0,400	-0,089	1,500	0,112
0,500	-0,484	1,600	0,137
0,600	-0,708	1,700	0,154
0,700	-0,715	1,800	0,163
0,800	-0,583	1,900	0,165
0,900	-0,414	2,000	0,162
1,000	-0,261		

По данным таблицы 3.1 выполняется построение графика вещественной частотной характеристики. Полученный график представлен на рисунке 3.4.

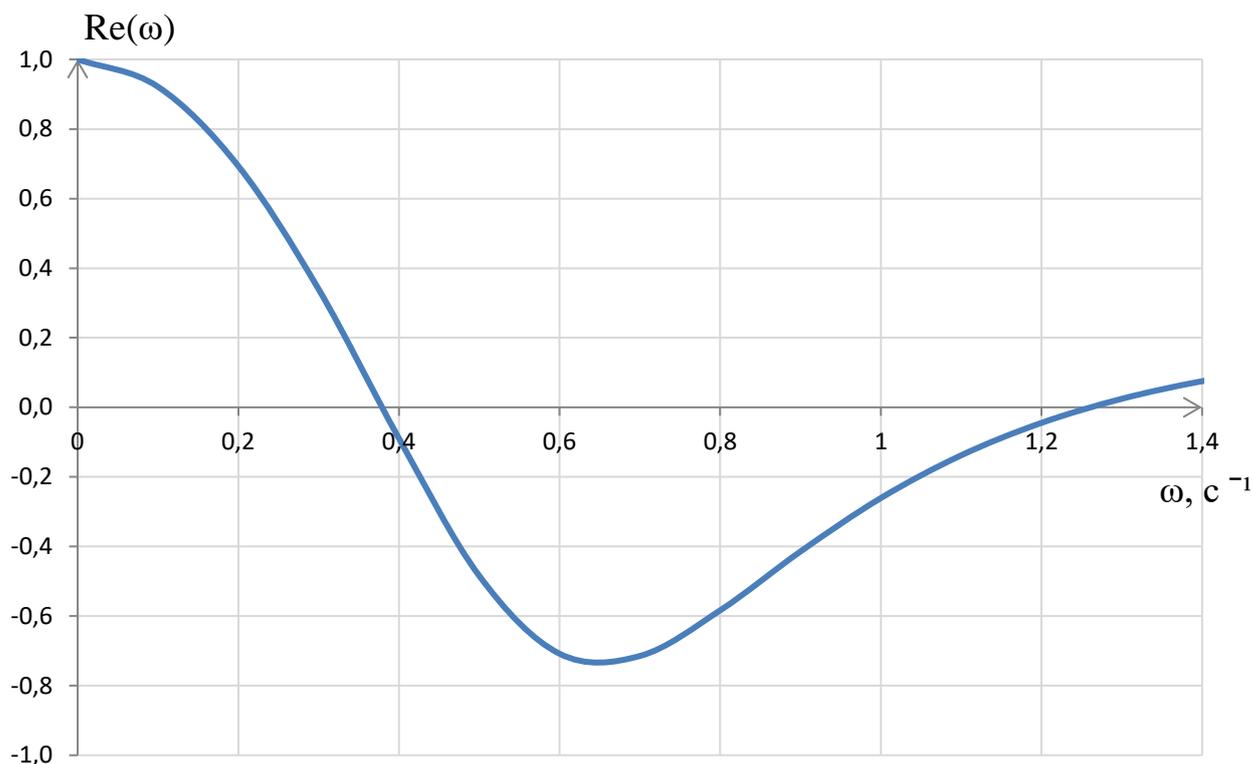


Рисунок 3.4 – График ВЧХ замкнутой системы

Переходный процесс по каналу задающего воздействия рассчитывается по формуле:

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

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

ω – частота;

t – продолжительность переходного процесса.

Для достижения точности расчета в качестве верхнего предела интеграла применяется не бесконечность, а число, при котором значение вещественной частотной характеристики системы стремится к нулю. Это число определяется из рисунка 3.4.

Конечный вид уравнения для определения переходного процесса системы имеет вид:

$$y(t) = \frac{2}{\pi} \cdot \int_0^{1,25} \frac{\text{Re}(\omega)}{\omega} \cdot (\sin(\omega \cdot t)) \cdot d\omega,$$

где 1,25 – частота среза, при которой график $\text{Re}(\omega)$ стремится к 0, определяется эта частота из графика ВЧХ (рисунок 3.4).

Задав диапазон изменения времени переходного процесса от 0 до 21 с, рассчитываем переходный процесс в замкнутой АСР. Результаты расчета представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Результаты расчёта переходного процесса в замкнутой АСР

t, с	P, МПа	t, с	P, МПа
0	0,130	11	0,912
1	0,131	12	0,901
2	0,147	13	0,894
3	0,286	14	0,892
4	0,497	15	0,895
5	0,704	16	0,898
6	0,853	17	0,900
7	0,927	18	0,900
8	0,945	19	0,900
9	0,938	20	0,901
10	0,924	21	0,900

По результатам расчета выполняется построение графика переходного процесса системы по каналу возмущения. Полученный график представлен на рисунке 3.5.

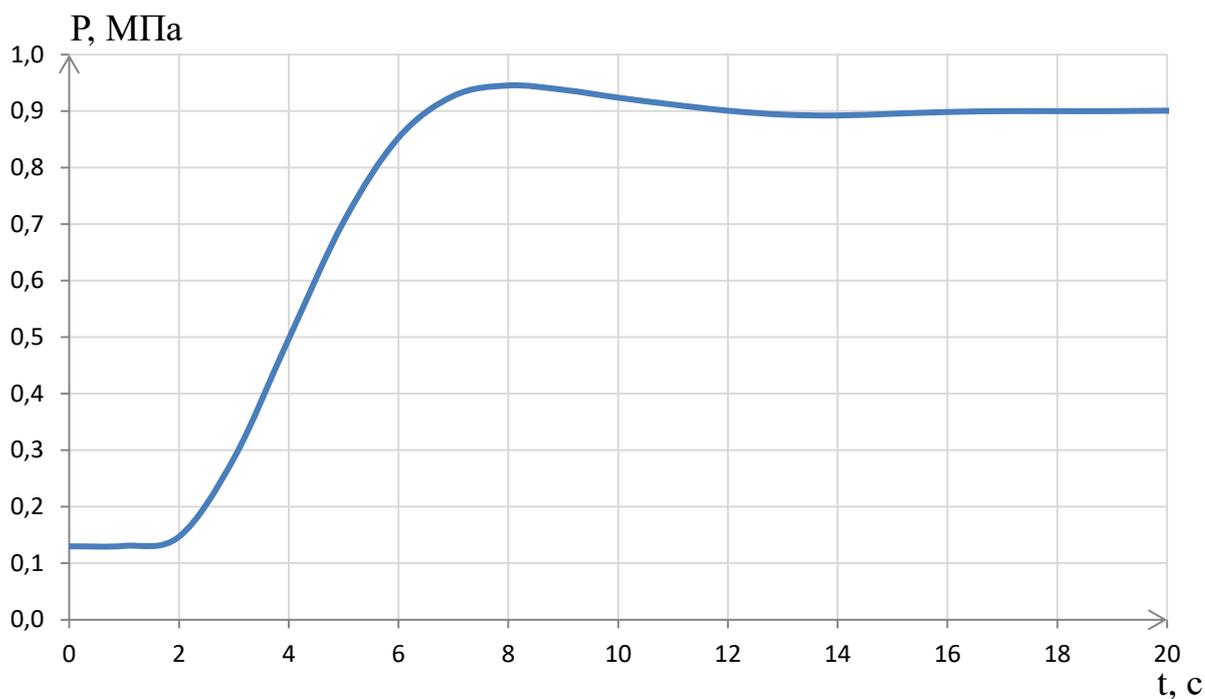


Рисунок 3.5– График переходного процесса замкнутой АСР по каналу задающего воздействия

Для точности расчетов возьмем график в увеличенном масштабе в интервале времени от 0 до 20 с, давления 0,8 до 1,0 МПа (рисунок 3.6).

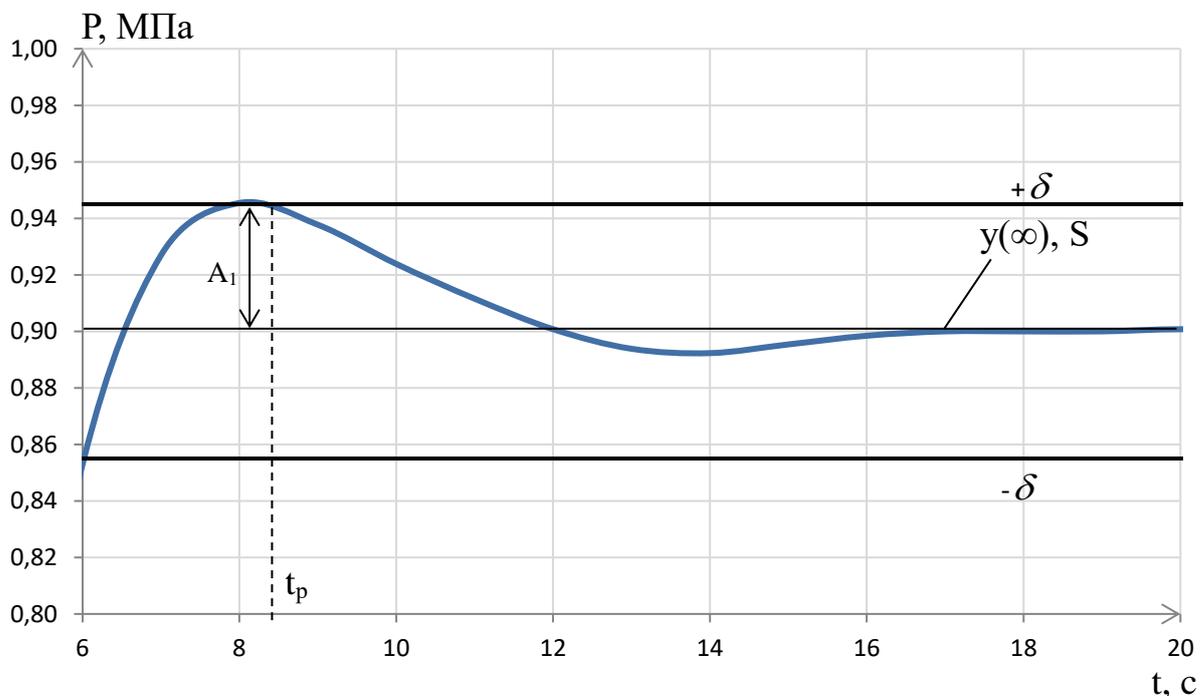


Рисунок 3.6 – Фрагмент графика переходного процесса замкнутой АСР по каналу задающего воздействия

Прямые оценки качества [53]:

- перерегулирование:

$$\sigma = \frac{p_{\max} - y(\infty)}{y(\infty)} \cdot 100 = \frac{0,945 - 0,9}{0,9} \cdot 100 = 5 \%,$$

где $y(\infty)$ – уровень установившегося значения регулируемой величины при времени переходного процесса t ;

- степень затухания переходного процесса:

$$\psi = 1 - \frac{A_2}{A_1} = 1 - \frac{0,001}{0,045} = 0,98;$$

- статическая ошибка:

$$\varepsilon_{CT} = S - y(\infty) = 0,9 - 0,9 = 0,$$

где $S=1(t)$ – сигнал задающего воздействия;

- время регулирования:

$$t_p = 8,4 \text{ с (при величине } \delta = 0,05 \cdot y(\infty) = 0,045 \text{)};$$

- максимальная динамическая ошибка:

$$A_1 = 0,045.$$

3.4.2 Расчет, построение и оценка качества переходного процесса в замкнутой АСР по каналу возмущения

Передаточная функция замкнутой АСР по каналу f -у для одноконтурной системы регулирования, приведенной на рисунке 8, имеет вид:

$$W_{f-y}(p) = \frac{W_o(p)}{1 + W_o(p) \cdot W_p(p)},$$

Рассчитаем ВЧХ замкнутой АСР с помощью программных вычислительных средств в диапазоне частот от 0 до 2 с⁻¹ с шагом 0,1 с⁻¹. Результаты расчетов представлены в таблице 3.3.

С помощью данных таблицы 3.3 выполняется построение графика ВЧХ системы. Полученный график представлен на рисунке 3.7.

Таблица 3.3 – Результаты расчета ВЧХ системы

$\omega, \text{с}^{-1}$	$\text{Re}_{з.с.}(\omega)$	$\omega, \text{с}^{-1}$	$\text{Re}_{з.с.}(\omega)$
0	0	1,100	-0,653
0,100	0,150	1,200	-0,465
0,200	0,512	1,300	-0,287
0,300	0,866	1,400	-0,130
0,400	0,945	1,500	0,005
0,500	0,592	1,600	0,118
0,600	-0,051	1,700	0,209
0,700	-0,626	1,800	0,281
0,800	-0,917	1,900	0,334
0,900	-0,948	2,000	0,369
1,000	-0,831		

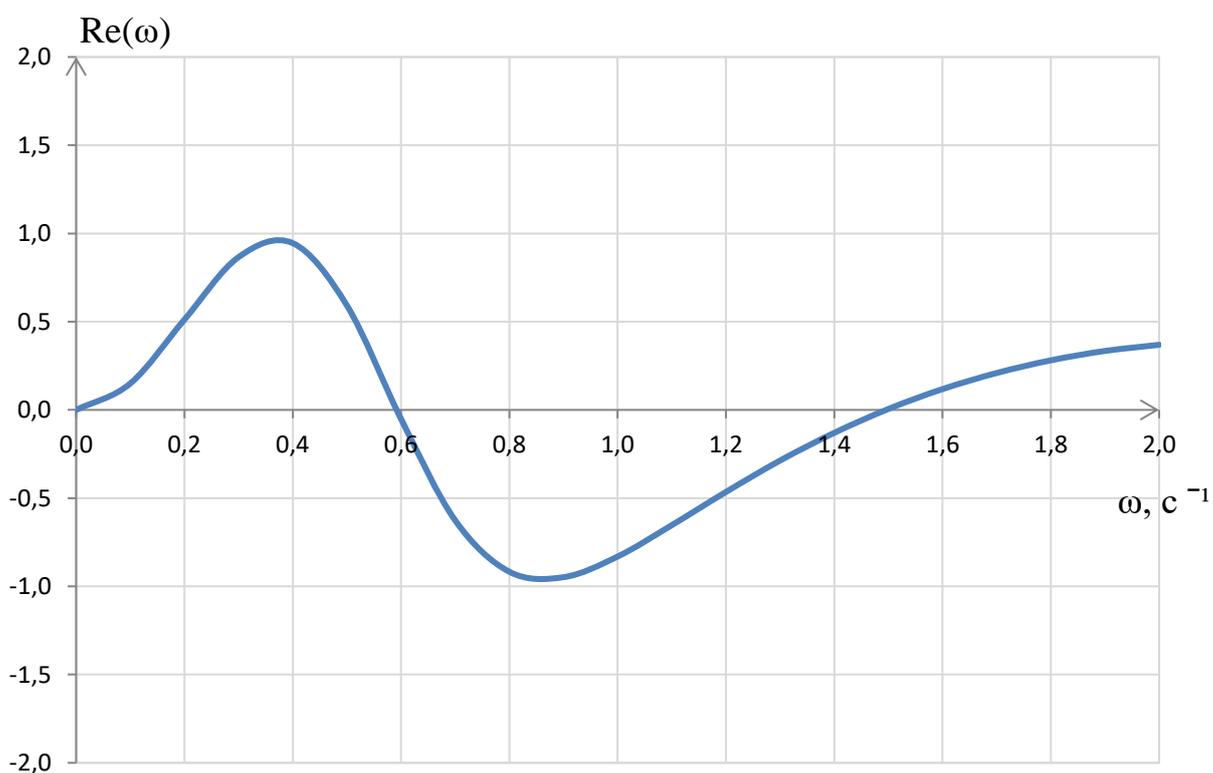


Рисунок 3.7 – График ВЧХ системы

Переходный процесс по каналу возмущения рассчитывается по формуле:

$$y(t) = \frac{2}{\pi} \cdot \int_0^{1,49} \frac{\text{Re}_{3.C.}(\omega)}{\omega} \cdot (\sin(\omega \cdot t)) \cdot d\omega,$$

где 1,49 – частота среза, при которой график $\text{Re}(\omega)$ стремится к 0, определяется эта частота из графика ВЧХ (рисунок 3.7).

Задав диапазон изменения времени переходного процесса от 0 до 20 с, рассчитываем переходный процесс в замкнутой АСР. Результаты расчета представим в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Результаты расчёта переходного процесса в замкнутой АСР

t, с	P, МПа	t, с	P, МПа
0	0,130	11	0,091
1	0,055	12	0,088
2	0,184	13	0,105
3	0,502	14	0,121
4	0,802	15	0,128
5	0,895	16	0,132
6	0,768	17	0,136
7	0,545	18	0,136
8	0,347	19	0,133
9	0,212	20	0,130
10	0,131		

По результатам расчета построим график переходного процесса системы по каналу возмущения (рисунок 3.8).

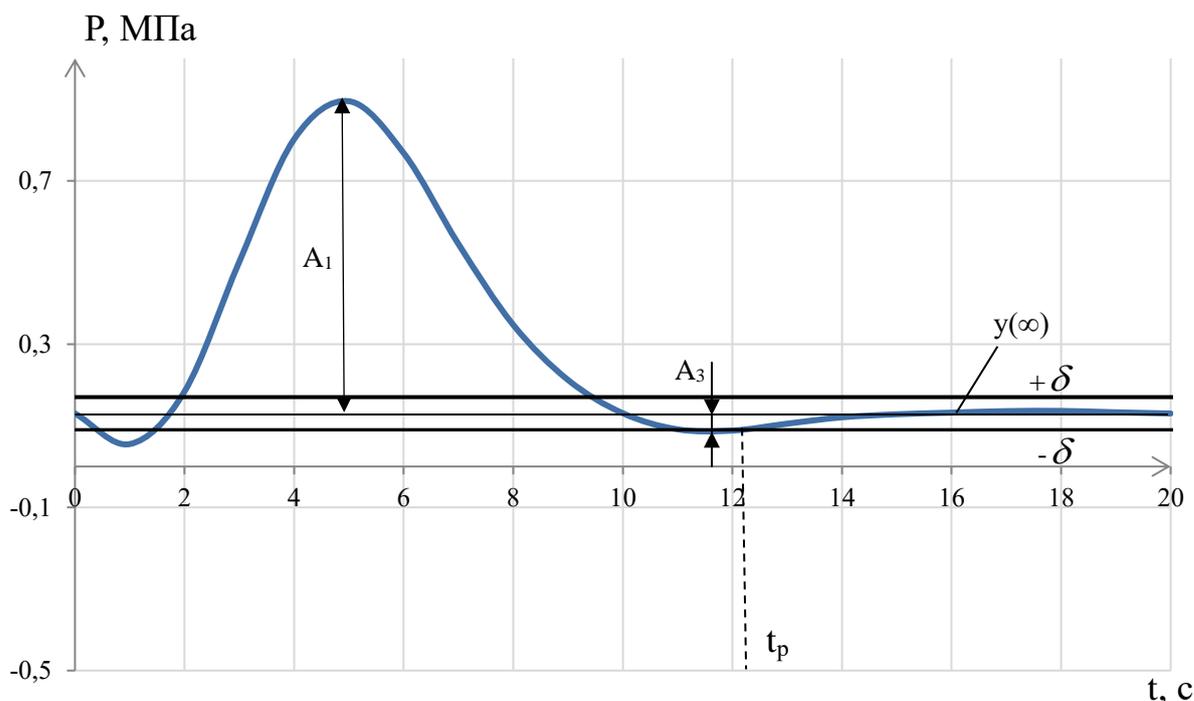


Рисунок 3.8 – График переходного процесса замкнутой АСР по каналу возмущения

Прямые оценки качества [53]:

– перерегулирование:

$$\sigma = \frac{A_3}{A_1} \cdot 100 = \frac{0,039}{0,765} \cdot 100 = 5,1 \%,$$

где $A_3 = 0,039$ – первое минимальное отклонение регулируемой величины;

– динамический коэффициент регулирования:

$$R_D = \frac{A_1}{k} \cdot 100 = \frac{0,765}{0,770} \cdot 100 = 99 \%,$$

где $k = 0,77$ – коэффициент передачи объекта;

– степень затухания переходного процесса:

$$\psi = 1 - \frac{A_2}{A_1} = 1 - \frac{0,006}{0,765} = 0,99,$$

где $A_2 = 0,006$ – второй максимальный выброс регулируемой величины;

– статическая ошибка:

$$\varepsilon_{CT} = 0;$$

- время регулирования:

$$t_p = 12,2 \text{ с (при величине } \delta = 0,05 \cdot K_{об} = 0,039 \text{)};$$

- максимальная динамическая ошибка:

$$A_I = 0,765.$$

3.5 Вывод по разделу Расчет параметров настройки регулятора

В результате выполнения раздела были рассчитаны оптимальные параметры настройки ПИ-регулятора. Степень затухания по каналам задания и возмущения удовлетворяет условию не ниже 0,95. Оптимальные параметры настройки регулятора: $k_p=0,374$, $T_u=1,147$ с. При значениях найденных параметров выполнено построение переходных процессов. Их прямые оценки качества свидетельствуют о том, что найденные параметры настройки удовлетворяют требованиям, предъявляемым к автоматизированной системе регулирования.

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
5БМ03	Плешко Андрею Олеговичу

Школа	ИШЭ	Отделение школы (НОЦ)	НОЦ. И.Н. Бутакова
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	<i>Оклады в соответствии с окладами сотрудников ТПУ. Общий бюджет проекта - не более 1,2 млн. руб., в том числе ФОТ - не более 500 тыс. руб.</i>
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	<i>Значение показателя интегральной ресурсоэффективности – не менее 4,5 баллов из 5.</i>
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	<i>Отчисления во внебюджетные фонды (30,2%).</i>

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>	<i>1. Анализ конкурентных технических решений; 2. FAST-анализ; 3. Планирование работ и оценка их выполнения.</i>
2. <i>Разработка устава научно-технического проекта</i>	<i>1. Смета затрат на проект.</i>
3. <i>Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	<i>1. Смета затрат на оборудование; 2. Определение трудоемкости выполнения работ.</i>
4. <i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	<i>1. Определение ресурсной эффективности исследования.</i>

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Анализ конкурентных технических решений;
2. Диаграмма FAST;
3. График проведения НТИ;
4. Бюджет затрат НТИ;
5. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НТИ.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	7.02.22
---	---------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент ОСГН ШБИП ТПУ	Спицына Любовь Юрьевна	К.Э.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ03	Плешко Андрей Олегович		

4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

В рамках настоящей магистерской диссертации разрабатывается автоматизированная система управления технологическим процессом (АСУ ТП) горения гелеобразного топлива в камере сгорания перспективной энергогенерирующей установки. В качестве установки выбран испытательный стенд двигателя сгорания жидкостного ракетного топлива. Внедрение АСУ ТП позволит минимизировать расход топлива (при этом повысить эффективность), повысить энергетические характеристики процесса горения, обеспечить экологическую и производственную безопасность, сохранить целостность оборудования, обеспечить безопасность персонала и т.п.

Цель работы заключается в расчете экономической эффективности внедрения и использования АСУ ТП горения гелеобразного топлива в камере сгорания перспективной энергогенерирующей установки. Для достижения цели необходимо решить следующий ряд задач:

- определить перечень работ и осуществить оценку времени их выполнения;
- составить смету затрат на реализацию проекта;
- вычислить разовые капитальные вложения на приобретение технических средств автоматизации, монтаж и их наладку;
- определить экономический эффект от внедрения данной системы.

В рамках данного проекта разрабатываемая система должна соответствовать высоким показателям ресурсоэффективности по основным критериям (безопасность, надежность, удобство эксплуатации, помехоустойчивость, энергосбережение). Интегральный критерий ресурсоэффективности должен быть не ниже 4,5. Максимальный бюджет проекта не должен превышать 1200000 рублей.

4.1 Потенциальные потребители результатов исследования

От потенциальных потребителей зависит насколько успешным будет проект в будущем. Поэтому необходимо определить целевой рынок и осуществить сегментирование рынка, чтобы понять, кто может стать потребителем результатов исследования.

К потенциальным потребителям можно отнести компании из энергетической и авиакосмической отраслей (например, ПАО «ОДК-Сатурн», Aerojet Rocketdyne, Rolls-Royce), которые производят двигатели. В качестве критериев сегментирования рынка для коммерческих организаций могут использоваться: объем производства, месторасположение, отрасль и т.д. В качестве критериев сегментирования рынка по разработке автоматизированных систем выберем два наиболее важных: размер компании-заказчика и вид двигателя, для которого разрабатывается АСУ ТП. Построим карту сегментирования рынка (таблица 4.1).

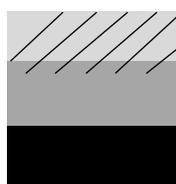
Таблица 4.1 – Карта сегментирования рынка

		Вид двигателя, для которого разрабатывается АСУ ТП		
		Авиационный	Ракетный	Дизельный
Размер компания- заказчика	Мелкие			
	Средние			
	Крупные			

ПАО «ОДК-Сатурн» –

Aerojet Rocketdyne –

Rolls-Royce –



Таким образом, из таблицы 4.1. видно, какие ниши на рынке услуг не заняты конкурентами, именно на них можно направить ресурсы и усилия при разработке автоматизированной системы.

4.2 Анализ конкурентных технических решений

Разработка и проектирование любой автоматизированной системы предполагает, кроме составления проекта, анализ конкурентных технических решений. По своим основным целям проектирования варианты автоматизированных систем разных производителей схожи, но по техническим и экономическим критериям они будут различаться. Каждый производитель придерживается своих (наиболее важных) требований при разработке автоматизированных систем. Так, например, одни производители акцентируют внимание на безопасности, надежности, а другие на дешевизне. Примерами конкурирующих производителей автоматизированных систем для энергогенерирующих установок являются НПО «Энергомаш» (индекс «к1», см. таблицу 4.2) и GE Aviation (индекс «к2», см. таблицу 4.2).

В ходе проведения анализа конкурентоспособности технических решений важным является выделение критериев оценки автоматизированных систем двигательных установок (сильные и слабые стороны). Данный анализ производится с помощью оценочной карты (таблица 4.2). Точка зрения конкурентов и разработки оценивается по пятибалльной шкале по каждому из показателей (1 – это наиболее слабая позиция, 5 – наиболее сильная позиция). Веса показателей в сумме составляют 1.

Конкурентоспособность научной разработки рассчитывается с использованием следующей формулы:

$$K = \sum B_i \cdot B_i,$$

где K – конкурентоспособность научной разработки; B_i – вес показателя измеряется в долях единицы; B_i – балл i -го показателя.

В таблице 4.2 представлены результаты анализа конкурентных технических решений.

Таблица 4.2 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б _ф	Б _{к1}	Б _{к2}	К _ф	К _{к1}	К _{к2}
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Надежность	0,2	5	5	4	1	1	0,8
2. Безопасность	0,2	5	5	5	1	1	1
3. Простота эксплуатации	0,1	5	4	4	0,5	0,4	0,4
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Стоимость	0,25	5	3	3	1,25	0,75	0,75
2. Конкурентоспособность продукта	0,1	4	5	5	0,4	0,5	0,5
3. Срок выхода на рынок	0,05	5	4	4	0,25	0,2	0,2
4. Предполагаемый срок эксплуатации	0,1	5	5	5	0,5	0,5	0,5
Итого	1				4,9	4,35	4,15

Анализ конкурентных технических решений показывает, что наиболее перспективным по техническим и экономическим критериям является реализация собственного варианта автоматизированной системы. Благодаря анализу полученных данных можно увидеть соответствие слабых и сильных сторон различных производителей. Такой анализ необходимо осуществлять постоянно, поскольку в условиях рыночной экономики все находится в постоянном движении. Помимо этого, такой анализ помогает вносить изменения в свои научные исследования, для того чтобы обеспечивать конкурентоспособность своего товара на рынке.

4.3 FAST-анализ

FAST-анализ – это один из наиболее простых и распространенных инструментов анализа и классификации функций. Данный метод основан на том, что затраты, связанные с созданием и использованием объекта,

выполняющего заданные функции, состоят из необходимых для его изготовления и эксплуатации излишних затрат, которые возникают из-за введения ненужных на производстве функций. Далее будут описаны 6 стадий, из которых состоит FAST-анализ.

4.3.1 Выбор объекта FAST-анализа

В качестве объекта FAST-анализа в данной работе выступает автоматизированная система горения гелеобразного топлива в камере сгорания перспективной энергогенерирующей установки. Внедрение данной системы позволит минимизировать расход топлива, повысить энергетические характеристики процесса горения, обеспечить экологическую и производственную безопасность, сохранить целостность оборудования, обеспечить безопасность персонала.

4.3.2 Описание функций объекта

В данном разделе осуществляется анализ объекта с позиции функционального устройства. Определяются функции объекта (главные, основные, вспомогательные). Главная функция объекта – внешняя функция, определяющая сущность, назначение и главную цель создания объекта. Основные и вспомогательные функции отражают внутренние функции исследуемого объекта. В таблице 4.3 представлена классификация функций, выполняемых объектом исследования.

Таблица 4.3 – Классификация функций, выполняемых объектом исследования

Наименование	Выполняемые функции	Ранг функции		
		Главная	Основная	Вспомогательная
1. Автоматизированная система	Обеспечивает эффективное управление объектом исследования	+		
2. Программные средства	Позволяет выполнить программы и задачи		+	
3. Аппаратные средства	Обеспечивает режим автоматического управления		+	

Продолжение таблицы 4.3

Наименование	Выполняемые функции	Ранг функции		
		Главная	Основная	Вспомогательная
4. Персонал	Обеспечивает режим ручного управления		+	
5. SCADA-система	Обеспечивает визуализацию технологического процесса			+
6. Организационные мероприятия	Обеспечивают внедрение системы, а также контроль ведения технологического процесса			+

4.3.3 Определение значимости выполняемых объектом функций

В рамках данного раздела для оценки значимости функций воспользуемся методом расстановки приоритетов. Суть данного метода состоит в расчетно-экспертном определении значимости каждой функции.

На начальном этапе составляем матрицу смежности функций (таблица 4.4). Функции определены согласно таблице 4.3 в порядке упоминания.

Таблица 4.4 – Матрица смежности функций

	Функция 1	Функция 2	Функция 3	Функция 4	Функция 5	Функция 6
Функция 1	=	>	>	>	>	>
Функция 2	<	=	=	=	>	>
Функция 3	<	=	=	=	>	>
Функция 4	<	=	=	=	>	>
Функция 5	<	<	<	<	=	>
Функция 6	<	<	<	<	<	=

Преобразуем матрицу смежности (таблица 4.4) в матрицу количественных соотношений функций (таблица 4.5).

Таблица 4.5 – Матрица количественных соотношений функций

	Функция 1	Функция 2	Функция 3	Функция 4	Функция 5	Функция 6	Итого
Функция 1	1	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	8,5
Функция 2	0,5	1	1	1	1,5	1,5	6,5
Функция 3	0,5	1	1	1	1,5	1,5	6,5
Функция 4	0,5	1	1	1	1,5	1,5	6,5
Функция 5	0,5	0,5	0,5	0,5	1	1,5	4,5
Функция 6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1	3,5
Сумма							36

Далее определяем значимость функции путем деления балла, полученного по каждой из функций, на общую сумму баллов по всем функциям (таблица 4.6).

Таблица 4.6 – Относительная значимость функций

Функция	Относительная значимость
1. Автоматизированная система	0,24
2. Программные средства	0,18
3. Аппаратные средства	0,18
4. Персонал	0,18
5. SCADA-система	0,13
6. Организационные мероприятия	0,09

4.3.4 Анализ стоимости функций, выполняемых объектом исследования

В данном разделе определяем уровень затрат на выполнение каждой функции с использованием нормативного метода. Соответствующие расчеты функций приведены в таблице 4.7. Данная информация приведена с учетом средних затрат на выполнения функций.

Таблица 4.7 – Определение стоимости функций, выполняемых объектом исследования

Наименование функции	Стоимость оборудования, тыс. руб.	Зарплата, тыс. руб.	Себестоимость, тыс. руб.
Функция 1	650	200	850
Функция 2	250	-	250
Функция 3	300	-	300
Функция 4	30	200	230
Функция 5	50	35	85
Функция 6	30	25	55

4.3.5 Построение функционально-стоимостной диаграммы объекта и ее анализ

Вся собранная в предыдущих разделах информация об объекте в данном разделе обобщается в виде функционально-стоимостной диаграммы (рисунок 4.1). Построенная диаграмма позволяет выявить диспропорции между важностью функций и затратами на них.

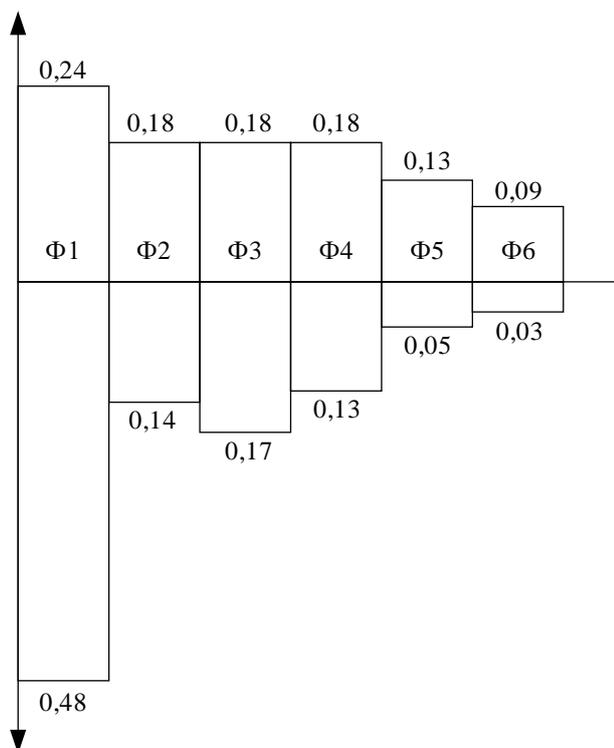


Рисунок 4.1 – Функционально-стоимостная диаграмма

В результате анализа полученной диаграммы (рисунок 4.1) видно, что рассогласования между затратами и значимостью каждой функции не обнаружено, следовательно, проведение работ по ликвидации диспропорций не требуется.

4.3.6 Оптимизация функций, выполняемых объектом

В качестве действий по оптимизации функций, выполняемых объектом, можно выполнить следующее: оптимизировать параметры надежности и безопасности; использовать наиболее высокотехнологичное оборудование в автоматизированной системе для улучшения ее показателей; минимизировать ошибки персонала путем использования микропроцессорных устройств во всем технологическом процессе.

4.4 Планирование научно-исследовательской работы

В рамках данного раздела необходимо выполнить следующие действия: определить порядок работ в рамках исследования; определить исполнителей каждой работы; установить продолжительность всех работ; построить календарный план-график проведения НИИ.

Формируется группа для выполнения работ, состоящая из научного руководителя проекта (НР) и инженера (И). Составим таблицу, содержащую перечень работ, основных исполнителей, продолжительность выполнения работ (таблица 4.8).

Таблица 4.8 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей при разработке автоматизированной системы управления технологическим процессом горения гелеобразного топлива

	Содержание работ	Исполнители	Продолжительность работ в днях
1.	Составление технического задания проекта	НР, И	3
2.	Календарное планирование работ	НР, И	3

Продолжение таблицы 4.8

Содержание работ	Исполнители	Продолжительность работ в днях
3. Обзор научной литературы	И	6
4. Экспериментальные исследования	И	25
5. Анализ объекта автоматизации	И	5
6. Проектирование АСУ ТП	И	20
7. Разработка схем	И	15
8. Написание дополнительных разделов ВКР	И	15
9. Оформление итоговых материалов ВКР	И	5
10. Подготовка презентации	И	5
11. Согласование результатов	НР, И	4
Итого	НР	10
	И	106

Таким образом, согласно таблице 4.8 работа состоит из 11 основных этапов. Основная часть всех работ реализовывается инженером. Решение совокупности всех работ позволит реализовать проект. По данным таблицы 4.8 построен календарный план-график проведения НТИ в виде диаграммы Ганта (таблица 4.9). На основании полученной диаграммы видно, что работы начинаются с 3 декады февраля и заканчиваются в начале второй декады июня.

Таблица 4.9 – Календарный план-график проведения НТИ

№	Вид работ	T_{ki} , кален д. дн.	Фев.	Март			Апрель			Май			Июнь	
			3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2
1	Составление технического задания проекта	3	■											
2	Календарное планирование работ	3	■											
3	Обзор научной литературы	6		■										
4	Экспериментальные исследования	25			■	■	■							
5	Анализ объекта автоматизации	5					■							
6	Проектирование АСУ ТП	20						■	■	■				
7	Разработка схем	15								■	■			
8	Написание дополнительных разделов ВКР	15									■	■		
9	Оформление итоговых материалов ВКР	5											■	
10	Подготовка презентации	5											■	
11	Согласование результатов	4												■

НР – ■; И – ■.

4.5 Бюджет научно-технического исследования

Размер затрат научно-технического исследования является основой для определения бюджета данного проекта, который защищается научной организацией при составлении договора с заказчиком в виде нижнего предела затрат на создание научно-технической продукции.

Для формирования затрат исследования используются следующие затраты: материальные затраты НТИ; накладные расходы; основная заработная плата участников исследования; дополнительная заработная плата участников исследования; отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления); амортизация.

4.5.1 Расчет материальных затрат научно-технического исследования

К материальным затратам научно-технического исследования относятся: канцелярские принадлежности, покупные материалы и т.п. (таблица 4.10).

Таблица 4.10 – Материальные затраты

Наименование	Ед. изм-я	Кол-во	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы (З _м), руб.
Бумага для принтера	пачка	2	600	1200
Ручки	шт.	4	30	120
Карандаши	шт.	4	15	60
Мультифоры	шт.	15	3	45
Картридж для принтера	шт.	1	700	700
Итого				2125

Итоговые затраты согласно таблице 4.10 составили 2125 рублей. Цены на все товары взяты средние по г. Томску.

4.5.2 Амортизация

Осуществим расчет амортизации отчислений. При разработке автоматизированной системы управления используется компьютерная

техника, имеющая срок службы, и, как следствие, существует необходимость учета затрат на ее износ.

Затраты на амортизацию рассчитываются по формуле:

$$Z_{амор} = \frac{H_a \cdot Ц_{об} \cdot t_{исп} \cdot n}{F_0} = \frac{0,4 \cdot 55000 \cdot 654 \cdot 1}{2408} = 5975 \text{ руб.},$$

где H_a – годовая норма амортизации единицы оборудования; $Ц_{об}$ – балансовая стоимость единицы оборудования с учетом транспортно-заготовительных расходов, руб.; $t_{исп}$ – фактическое время использования единицы оборудования, ч.; n – число задействованных однотипных единиц оборудования; F_0 – действительный годовой фонд времени работы оборудования (для шестидневной рабочей недели 2408 часов), ч.

Итоговая сумма амортизации составила 5975 рублей.

4.5.3 Заработная плата исполнителей

Под заработной платой понимается оплата труда всех участников исследования: инженера и научного руководителя). Расчет основной заработной платы осуществляется на основе трудоемкости выполнения каждого этапа и величины месячного оклада исполнителя.

Затраты на ЗП рассчитываются по формуле:

$$Z_{ЗП} = Z_{осн} + Z_{доп}$$

где $Z_{осн}$ – основная заработная плата, руб.; $Z_{доп}$ – дополнительная заработная плата, руб.

Основная заработная плата определяется по формуле:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_p \cdot (1 + K_{пр} + K_0) \cdot K_p,$$

где $Z_{дн}$ – среднедневная заработная плата, руб.; T_p – продолжительность работ, выполняемых работником, рабочие дни; $K_{пр}$ – премиальный коэффициент; K_0 – коэффициент доплат и надбавок; K_p – районный коэффициент (равен 1,3 для г. Томска);

Среднедневная заработная плата определяется по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}},$$

где $Z_{\text{м}}$ – оклад работника за месяц, руб.; M – количество месяцев работы без отпуска в течение года: при отпуске в 24 рабочих дня $M=11,2$ месяца, 5-дневная рабочая неделя и при отпуске в 48 рабочих дней $M=10,4$ месяца, 6-дневная рабочая неделя; $F_{\text{д}}$ – действительный годовой фонд рабочего времени персонала, раб. дн.

В таблице 4.11 представлен баланс рабочего времени для шестидневной рабочей недели.

Таблица 4.11 – Баланс рабочего времени (для шестидневной рабочей недели)

Показатели рабочего времени	Дни
Календарные дни	365
Нерабочие дни (праздники/выходные)	118
Потери рабочего времени (отпуск/невыходы по болезни)	14
Действительный годовой фонд рабочего времени	233

Рассчитаем среднедневную заработную плату для инженера и научного руководителя, данные внесем в таблицу 4.12:

$$Z_{\text{дн.ин}} = \frac{30940 \cdot 10,4}{233} = 1381 \text{ руб.};$$

$$Z_{\text{дн.нр}} = \frac{56277 \cdot 10,4}{233} = 2512 \text{ руб.}$$

Таблица 4.12 – Расчет основной заработной платы

Исполнители	$Z_{\text{дн}}$, руб.	$K_{\text{нр}}$	$K_{\text{д}}$	$K_{\text{р}}$	$T_{\text{р}}$	$Z_{\text{осн}}$, руб.
Инженер	1381	0,3	0,4	1,3	106	323513
Научный руководитель	2512	0,3	0,4	1,3	10	55515
Итого						379028

Дополнительная заработная плата исполнителей определяется по формуле:

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн},$$

где $k_{доп}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,12 – 0,15).

Результаты расчетов дополнительной заработной платы внесем в таблицу 4.13.

Таблица 4.13 – Дополнительная заработная плата исполнителей

Исполнитель	$Z_{доп}$, руб.
Научный руководитель	6662
Инженер	38822
Итого	45484

Таким образом, суммарная надбавка к основной заработной плате руководителя и инженера составила 45484 рублей.

4.5.4 Отчисления во внебюджетные фонды

Отчисления во внебюджетные фонды определяем исходя из следующей формулы:

$$Z_{внеб} = k_{внеб} \cdot (Z_{осн} + Z_{доп}),$$

где $k_{внеб}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.), равный 30,2 %.

Результаты расчетов отчислений во внебюджетные фонды внесем в таблицу 4.14.

Таблица 4.14 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	$Z_{внеб}$, руб.
Научный руководитель	57599
Инженер	109425
Итого	167024

Сумма отчислений во внебюджетные фонды составила 167024 рублей.

4.5.5 Накладные расходы

Накладные расходы учитывают дополнительные затраты организации, которые не попали в предыдущие статьи расходов, например печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, копирование материалов и т.д. Их величина определяется по формуле:

$$Z_{накл} = 0,16 \cdot (Z_{мат} + Z_{амор} + Z_{осн} + Z_{доп} + Z_{внеб});$$

$$Z_{накл} = 0,16 \cdot (2125 + 5975 + 379028 + 45484 + 167024) = 95942 \text{ руб.}$$

Накладные расходы составили 95942 рубля.

4.5.6 Смета затрат на оборудование

Смета составляется как на приобретение технологического оборудования, так и на строительные-монтажные работы. В таблице 4.15 представлена смета затрат на оборудование.

Таблица 4.15 – Затраты на оборудование

Наименование оборудования	Кол-во, шт.	Цена единицы оборудования, руб.	Общая стоимость оборудования, руб.
Термопреобразователь ТСМУ-205	2	4185	8370
Преобразователь температуры Метран-288	1	13000	13000
Датчик избыточного давления МИДА-ДИ-13П	2	9450	18900
Датчик давления WIKA E-10	1	36000	36000
Расходомер-счетчик электромагнитный ЭЛЕМЕР-РЭМ	1	18800	18800
Расходомер-счетчик вихревой ЭЛЕМЕР-РВ	1	25000	25000
Механизм электроисполнительный SKD60	2	33200	66400
Анализатор качества горения АКГ-МП-2П	1	11900	11900
ПЛК ЭЛСИ-ТМК с модулями	1	90000	90000
Итого			288370

Стоимость оборудования составила $Z_{об} = 288370$ рублей.

Капитальные вложения в монтаж рассчитываются как 20% от вложений в оборудование:

$$Z_{монт} = 0,2 \cdot Z_{об};$$

$$Z_{монт} = 0,2 \cdot 288370 = 57674 \text{ рублей.}$$

Затраты на покупку оборудования и его монтаж составят:

$$Z_{м.об.} = Z_{об} + Z_{монт};$$

$$Z_{м.об.} = 288370 + 57674 = 346044 \text{ рублей.}$$

Таким образом, суммарные затраты на покупку и монтаж оборудования испытательного стенда составили 346044 рублей.

4.5.7 Формирование затрат научно-исследовательского проекта

Величина затрат работы является основной для формирования бюджета затрат НИИ, который при формировании договора с заказчиком зачитывается научной организацией в качестве минимального предела затрат на разработку. В таблице 4.16 приведены данные бюджета затрат.

Таблица 4.16 – Бюджет затрат

Наименование	Сумма, руб.	Удельный вес, %
Материальные затраты НИИ	2125	0,2
Затраты на амортизацию	5975	0,6
Затраты на основную заработную плату	379028	36,4
Затраты на дополнительную заработную плату	45484	4,4
Страховые взносы	167024	16
Накладные расходы	95942	9,2
Затраты на оборудование	346044	33,2
Общий бюджет	1041622	100

Анализируя таблицу 4.16, можно сделать вывод, что наибольший процент затрат приходится на заработную плату и составляет 36,4%. Бюджет всех затрат составил 1041622 рублей.

4.6 Ресурсоэффективность

Ресурсоэффективность научной работы определяется по формуле с использованием интегрального показателя:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i,$$

где I_{pi} – интегральный показатель ресурсоэффективности; a_i – весовой коэффициент проекта; b_i – бальная оценка проекта (устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания).

Результаты расчетов показателя приведены в таблице 4.17.

Таблица 4.17 – Сравнительная оценка характеристик проекта

Критерий	Весовой коэффициент	Бальная оценка разработки
1. Безопасность	0,3	5
2. Надежность	0,3	5
3. Удобство эксплуатации	0,2	5
4. Помехоустойчивость	0,1	5
5. Энергосбережение	0,1	4
Итого	1	4,9

4.7 Вывод по разделу Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

В рамках раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» были решены следующие задачи: составлен перечень работ и произведена оценка времени их выполнения; составлена смета затрат на НТИ; составлена смета затрат на оборудование, а также монтажные работы; определена ресурсоэффективность проекта.

Анализ затрат позволяет сделать вывод, что основными расходами в научно-исследовательской работе являются затраты на заработную плату – 379028 рублей, далее затраты на оборудование, составившие 346044 рубля. Меньше всего средств уходит на материальные затраты НТИ – 2125 рублей. Общий бюджет разработки составил 1041622 рублей, при этом,

продолжительность работы составляет 106 дней. Интегральный критерий ресурсоэффективности имеет высокий показатель (4,9 из 5), что свидетельствует об эффективности проекта.

Внедрение автоматизированной системы сжигания гелеобразного топлива позволит увеличить срок службы системы, повысить ее безопасность, надежность. Также за счет оптимизации процессов подачи и сжигания топлива понизятся производственные издержки.

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа	ФИО
5БМ03	Плешко Андрею Олеговичу

Школа	ИШЭ	Отделение (НОЦ)	НОЦ И.Н.Бутакова
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» / Автоматизация теплоэнергетических процессов

Тема ВКР:

АСУ ТП горения гелеобразного топлива в камере сгорания перспективной энергогенерирующей установки	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объектом исследования является испытательный стенд ракетного двигателя. В качестве топлива используется перспективное гелеобразное топливо. Область применения: энергетика.
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: 1.1 Специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; 1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.	– ГОСТ 12.2.032-78 Рабочее место при выполнении работ сидя; – Федеральный закон от 24.07.1998 N 125-ФЗ «Об обязательном социальном страховании от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний»; – ГОСТ 12.0.004-2015 Система стандартов безопасности труда. Организация обучения безопасности труда. Общие положения; – ТК РФ от 30.12.2001 N 197-ФЗ.
2. Производственная безопасность: 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов; 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия.	Вредные факторы: – электромагнитное излучение; – превышение уровня шума; – повышенная запыленность и загазованность. Опасные факторы: – поражение электрическим током; – тепловое и механическое воздействие.
3. Экологическая безопасность: 3.1 Анализ влияния объекта исследования на окружающую среду; 3.2 Обоснование мероприятия по защите окружающей среды.	Потенциальным негативным воздействием на окружающую среду является воздействие вредных выбросов (CO ₂ , NO _x , SO ₂ и т.д.) при работе оборудования.
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях: 4.1 Анализ вероятных ЧС; 4.2 Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС.	Возможные ЧС: возникновение пожара на объекте, поражение электрическим током. Наиболее типичная ЧС – возгорание.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	7.02.22
---	---------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ООД ТПУ	Сечин Александр Иванович	Д.Т.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ03	Плешко Андрей Олегович		

5 Социальная ответственность

В выпускной квалификационной работе были разработаны и спроектированы автоматизированная система управления технологическим процессом горения гелеобразного топлива в камере сгорания жидкостного ракетного двигателя, а также система пожаротушения.

Применение гелеобразных топлив характеризуется сразу несколькими положительными социальными, экологическими и экономическими эффектами: улучшение экологической обстановки за счет утилизации накопленных отходов, расширение номенклатуры топливной и сырьевой базы энергоносителя за счет использования дешевых компонентов топлива. Для обеспечения работоспособности системы необходимо два человека-оператора, которые будут отслеживать эффективность функционирования объекта, и вносить корректировки в настройки системы, а также контролировать корректность работы технологического оборудования.

Использование автоматизированных систем позволит минимизировать нагрузку на оперативный персонал и осуществлять огневые испытания двигателей без непосредственного участия обслуживающего персонала. Задачи оператора включают: контролирование параметров процесса горения топлива, управление и принятие решений в случае возникновения аварийных ситуаций. В связи с особенностью работы, важными факторами при работе оператора будут являться: микроклимат помещения, освещение, шум, электромагнитное излучение, рабочая поза. Также необходимо рассматривать факторы, влияющие на электробезопасность и пожарную безопасность, и рассмотреть вопросы ее организации на производстве.

5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Вопросы по организации и охране труда в отношении работника регламентируются согласно Трудового кодекса РФ [54–56], ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ [57].

Конституция регламентирует вопросы, возникающие при нарушении прав и свобод работника. Согласно трудовому кодексу, регламентируются вопросы касаются режима рабочего времени, нормирование и оплата труда.

Согласно Конституции РФ, нормами в области охраны труда являются:

- главный приоритет – сохранность жизни и здоровья работников;
- единство норм и правил;
- гарантия защиты интересов работника при получении травм на производстве.

5.1.1 Специальные правовые нормы трудового законодательства

Оператор обязан проходить инструктаж по технике безопасности раз в три месяца, так же соблюдать правила пожарной безопасности и не оставлять оборудование без присмотра. Предприятие, к которому относится испытательный комплекс, должно обеспечить оператора спецодеждой, спецобувью и другими средствами защиты. Остановка работы двигателя должна проводиться во всех аварийных случаях при превышении установок по температуре и давлению в камере сгорания, системе топливоподачи, при срабатывании системы пожаротушения. В конце работы оператор должен сдать дежурство, сделав отметку в журнале. Также оператору должны выдаваться средства индивидуальной защиты дыхательных путей.

5.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны

Основным объектом в производственных условиях является рабочее место, представляющее собой в общем случае пространство, в котором может находиться человек при выполнении производственного процесса.

Выполняя планировку рабочего места, необходимо учитывать следующее:

- проход вокруг рабочего стола должен составлять не менее 500 мм;
- расположение экрана монитора должно быть от глаз пользователя на расстоянии примерно равным от 600 до 700 мм, но не ближе чем 500 мм;

- окраска корпуса ПК должна быть выполнена в спокойных нейтральных тонах;
- корпус ПК, клавиатура и другие блоки ПК должны обладать матовой поверхностью и не иметь блестящих деталей, которые могут создавать блики и мешать работе персонала;
- конструкция рабочего стола должна обладать удобной рабочей поверхностью и необходимым количеством места для монтажа оборудования;
- все электрооборудование необходимо размещать на оптимальном расстоянии от мест, в которых возможен прямой контакт оборудования с водой (раковины, открытые емкости с водой).

5.2 Производственная безопасность

При выборе факторов необходимо использовать ГОСТ 12.0.003-2015 [58]. Перечень опасных и вредных факторов, характерных для проектируемой производственной среды представлен в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Опасные и вредные фактора при работе оператора автоматизированной системы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разработка	Изготовление	Эксплуатация	
1.Отклонение показателей микроклимата	+	+	+	СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений [59].
2.Превышение уровня шума		+	+	ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности [60].
3.Отсутствие или недостаток естественного света	+	+	+	Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95* [61]
4.Недостаточная освещенность рабочей зоны		+	+	Требования к освещению устанавливаются СП 52.13330.2016 [62].

Продолжение таблицы 5.1

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разработка	Изготовление	Эксплуатация	
5.Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека	+	+	+	ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов [63].
6.Тепловое воздействие		+	+	ГОСТ 30331.4-95. Защита от тепловых воздействий [64].
7.Механическое воздействие		+	+	ГОСТ Р 56257-2014 Характеристика факторов внешнего природного воздействия. Общая классификация [65].

5.2.1 Анализ вредных и опасных производственных факторов

Отклонение показателей микроклимата

Находясь на рабочем месте в производственном помещении человек подвержен влиянию определённых метеоусловий, или микроклимату рабочих помещений. Окружающая среда влияет на состояние организма. Основными параметрами производственного микроклимата являются действующими на организм человека температура окружающей среды, влажность и скорость потока воздуха, а также температура окружающих поверхностей.

Работа на ПК в офисном помещении относится к классу легких работ. Для данного типа работ допустимые величины микроклиматы должны обеспечиваться при следующих условиях:

- перепад температуры воздуха должен быть не более 3,5 °С;
- перепад температуры воздуха по горизонтали, а также ее изменения в течение смены не должны превышать 4 °С.

Согласно СанПиН 2.2.4.548-96 [59] оптимальные параметры микроклимата приведены в таблице 5.2. Для поддержания соответствующих микроклиматических параметров на рабочем месте используются системы вентиляции и отопления.

Таблица 5.2 – Оптимальные параметры микроклимата на рабочем месте

Период года	Температура, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодное	21–23	60–40	< 0,1
Теплое	22–24	60–40	< 0,1

Вредным веществом, содержащимся в воздухе, является углекислый газ, CO_2 . ПДК CO_2 в воздухе, согласно ГОСТ 12.1.005-88 «Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны» [66] составляют 20 мг/м^3 . Проблему уменьшения содержания CO_2 в воздухе также можно решить с помощью системы вентиляции.

Расчёт искусственного освещения

В качестве исходных данных будет использовано помещение операторной (рисунок 5.1) с размерами: длина 7 м (А), ширина 8 м (В), высота 3 м (Н). Высота рабочей поверхности $h_{\text{рп}} = 0,7 \text{ м}$. Требуется создать освещенность $E = 300 \text{ Лк}$ согласно СНиП 23-05-95* [67] для системы общего освещения. Коэффициент отражения стен, оклеенных светлыми обоями $R_c = 70 \%$, свежепобеленного потолка $R_n = 50 \%$.

Рассчитаем систему общего люминесцентного освещения.

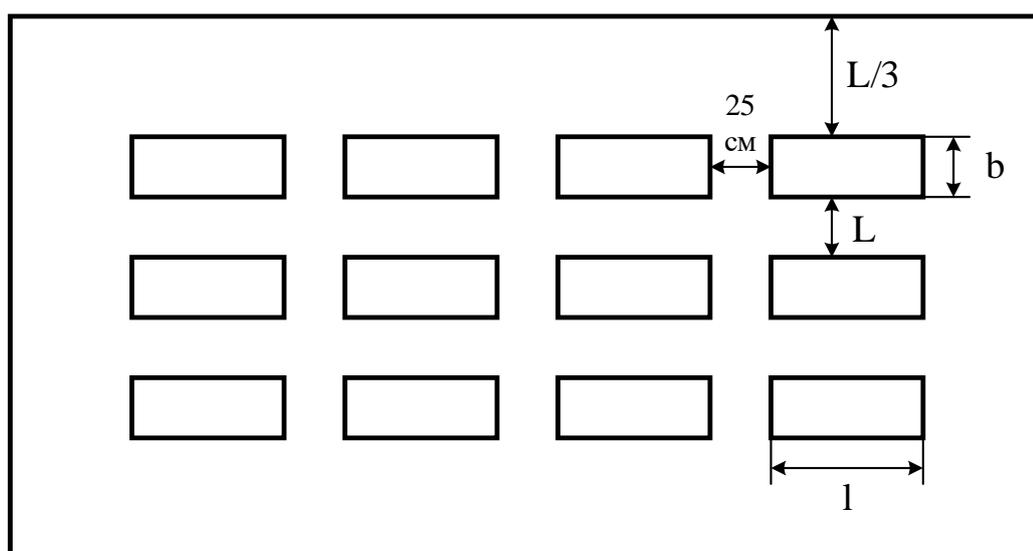


Рисунок 5.1 – Условное изображение помещения

Выбираем светильники типа ОД, $\lambda = 1,4$ м.

Приняв $h_c = 0,5$ м, получаем:

$$h = H - h_c - h_{\text{пр}} = 3,0 - 0,5 - 0,7 = 1,8 \text{ м.}$$

Причём высота подвеса $h_{\text{пр}}$ равна 2,5 м (рисунок 5.2), что является допустимым значением для принятого типа светильников.

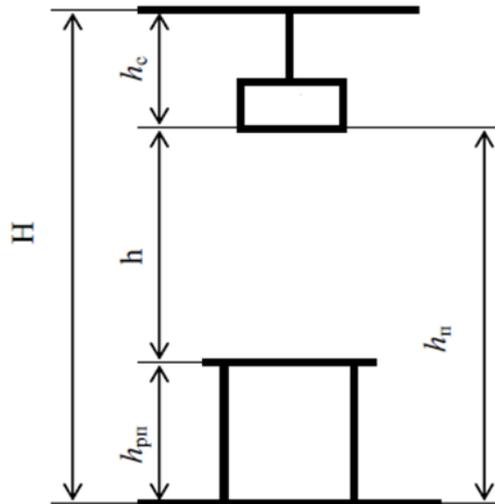


Рисунок 5.2 – Условное изображение допустимых расстояний между оборудованием

Расстояние между светильниками:

$$L = 1,4 \cdot 1,8 = 2,52 \text{ м.}$$

Расстояние от крайнего ряда светильников до стены:

$$L/3 = 0,84 \text{ м.}$$

Определяем количество рядов светильников и количество светильников в ряду:

$$n_{\text{ряд}} = \frac{B - \frac{2}{3}L}{L} + 1 = \frac{8 - \frac{2}{3} \cdot 2,52}{2,52} + 1 \approx 4;$$

$$n_{\text{св}} = \frac{A - \frac{2}{3}L}{l_{\text{св}} + 0,5} = \frac{7 - \frac{2}{3} \cdot 2,52}{1,230 + 0,5} \approx 3.$$

Размещаем светильники в три ряда. В каждом ряду можно установить 4 светильника типа ОД мощностью 40 Вт (с длиной $l=1,230$ м; шириной $b=0,265$ м), при этом разрывы между светильниками в ряду составят 25 см.

Учитывая, что в каждом светильнике установлено две лампы, общее число ламп в помещении $N = 4 \cdot 2 \cdot 3 = 24$.

Находим индекс помещения:

$$i = \frac{S}{h \cdot (A + B)} = \frac{7 \cdot 8}{1,8 \cdot (7 + 8)} = 2,07 \approx 2,1.$$

Определяем коэффициент использования светового потока:

$$\eta = 62\% \quad \text{или} \quad \eta = 0,62.$$

Определяем световой поток лампы:

$$\Phi = \frac{E \cdot S \cdot K_z \cdot Z}{N \cdot \eta}$$

K_z – коэффициент запаса, учитывающий загрязнение светильника, равен 1,5;
 Z – коэффициент неравномерности освещения, для люминесцентных ламп при расчетах берется равным 1,1.

$$\Phi = \frac{300 \cdot 7 \cdot 8 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{0,62 \cdot 24} = 1862,9 \text{ Лм}.$$

Выбираем ближайшую стандартную лампу – ЛХБ 30 Вт с потоком 1940 Лм. Делаем проверку выполнения условия:

$$-10\% \leq \frac{\Phi_{\text{л.станд}} - \Phi_{\text{л.расч}}}{\Phi_{\text{л.станд}}} \leq +20\%;$$

$$-10\% \leq \frac{1940 - 1862,9}{1940} \cdot 100\% = 3,97\% \leq +20\% \quad \text{– входит в диапазон.}$$

Определяем электрическую мощность осветительной установки:

$$P = \frac{24 \cdot 30}{0,75} = 960 \text{ Вт.}$$

Поражение электрическим током

Во время нормального режима работы оборудования опасность поражения током практически минимальна, однако, возможны аварийные режимы работы, когда происходит случайное электрическое закорачивание

частей оборудования, находящегося под напряжением с заземленными конструкциями.

Поражение человека электрическим током может произойти в следующих случаях:

- при прикосновении к токоведущим частям во время ремонта;
- при однофазном (однополюсном) прикосновении незаземленного от земли человека к незаземленным токоведущим частям электроустановок, находящихся под напряжением;
- при прикосновении к нетоковедущим частям, находящимся под напряжением, то есть в случае нарушения изоляции;
- при соприкосновении с полом и стенами, оказавшимися под напряжением.

Основными мероприятиями по обеспечению электробезопасности являются:

- изолирование (ограждение) токоведущих частей, исключающее возможность случайного прикосновения к ним;
- установки защитного заземления;
- наличие общего рубильника;
- своевременный осмотр технического оборудования, изоляции;
- использование электрозащитных средств при ремонте и обслуживании оборудования.

Повышенное воздействие электромагнитного излучения

Электромагнитное излучение – это излучение, которое прямо или косвенно вызывает ионизацию среды. Контакт человека с электромагнитными излучениями представляет серьезную угрозу.

Спектр излучения монитора компьютера включает в себя рентгеновскую, ультрафиолетовую и инфракрасную области, а также широкий диапазон электромагнитных волн других частот. В которых экспериментах было показано, что электромагнитные поля с частотой 60 Гц

могут инициировать биологические сдвиги (вплоть до нарушения синтеза ДНК) в клетках животных.

Следует отметить, что не только монитор, но и системный блок, а также принтер вырабатывают электромагнитное излучение в очень большом диапазоне частот. Однако излучение монитора является самым мощным.

Во избежание негативного воздействия от электромагнитного излучения нужно следовать основным нормам, представленным в СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 [68].

Шум

Шум ухудшает условия труда, оказывая воздействие на организм человека. Процесс огневых испытаний является шумным. Одним из методов уменьшения воздействия шума является снижение или ослабление шума в его источниках – генераторы, нагреватели, трансформаторы, вентиляторы, специализированные механизмы и устройства. Своевременное устранение этих причин позволяет снизить уровень шума. В качестве СИЗ от шума могут использоваться специальные наушники, беруши, противозумные каски, защитное действие которых основано на изоляции и поглощения шума.

Таблица 5.3 – Допустимые уровни шума (ГОСТ 12.1.003-2014)

Рабочие места	Уровни звукового давления (ДБ) в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц								Уровни звука и эквивалентные уровни звука, по дБА
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
ОРУ	99	92	86	83	80	78	76	74	85

Тепловое воздействие

Во время огневых испытаний на испытательном стенде происходит сильный нагрев частей оборудования. Неосторожное обращение с нагретым оборудованием может привести к ожогам. Согласно ГОСТ Р 30331.4-95, для соблюдения мер предосторожности необходимо:

- не контактировать с нагретыми частями оборудования во время его работы (или после завершения работы при остывании нагреваемых поверхностей);
- соблюдать технику безопасности при работе с исследуемыми нагретыми образцами;
- использовать перчатки из негорючего материала (краги, верхонки) для защиты рук от ожогов.

Механическое воздействие

Существует опасность получения травмы подвижными элементами двигательной установки. Перед включением модуля следует убедиться в отсутствии каких-либо препятствий на пути подвижных частей.

Согласно ГОСТ Р 56257-2014 [69], мерами предосторожности являются: при эксплуатации двигателя необходимо соблюдать все общие правила техники безопасности работы с механизмами; запрещается эксплуатация двигателя при обнаружении неисправностей в работе механических или электрических компонентов. Продолжать работу разрешается только после устранения причин неисправностей специалистами; при эксплуатации необходимо следить за чистотой всех механизмов, периодически очищать их от пыли и грязи. Обтирочные материалы, которыми очищается модуль, не должны оставлять следов и ворса на протираемых поверхностях.

5.2.2 Обоснование мероприятий по снижению уровней воздействия опасных и вредных факторов на исследователя

Для предотвращения ожогов при работе с нагреваемыми поверхностями необходима специализированная одежда, и выполнение техники безопасности для работы с лабораторным стендом.

Для предотвращения возможности поражения электрическим током соблюдаются требования:

- при производстве монтажных работ используются только исправные инструменты, аттестованные службой КИПиА;

- с целью защиты от поражения электрическим током, возникающим между корпусом приборов и инструментом при пробое сетевого напряжения на корпус, корпуса приборов и инструментов были заземлены;
- при включенном сетевом напряжении работы на задней панели запрещены;
- все работы по устранению неисправностей производятся квалифицированным персоналом;
- постоянное наблюдение за исправностью электропроводки.

Для уменьшения загазованности и влажности в помещении устанавливается вытяжная система. Помещение должно быть оборудовано приточно-вытяжной вентиляцией с верхним отсосом, обеспечивающей равномерный приток свежего воздуха и удаление загрязненного. Приточно-вытяжная вентиляция во время проведения экспериментов должна работать постоянно.

5.3 Экологическая безопасность

Загрязнение (окружающей среды, природной среды, биосферы) – это привнесение в окружающую среду или возникновение в ней новых, обычно не характерных физических, химических или биологических агентов (загрязнителей), или превышение их естественного среднесуточного уровня в различных средах, приводящее к негативным воздействиям.

5.3.1 Анализ влияния объекта исследования на окружающую среду

Выбросы загрязняющих веществ двигательной установки, обусловленные процессами сгорания органического топлива, являются одним из основных источников загрязнения атмосферы. Объемы вредных выбросов связаны с качеством и количеством сжигаемого топлива, полнотой его использования, а также эффективностью в целом работы двигателя.

Наибольшую опасность для биосферы и для здоровья человека представляют двигатели, не имеющие средств очистки от вредных выбросов.

5.3.2 Обоснование мероприятий по защите окружающей среды

Для снижения количества вредных выбросов необходимо контролировать расход воздуха в двигательной установке. Ведь при нехватке окислителя, возникает большой недожог топлива, что приводит к увеличению количества отходов процесса сжигания гелеобразного топлива. А при избытке воздуха образуются оксиды азота. Также важным аспектом является регулирование температуры в камере сгорания, поскольку от данного параметра зависит количество вредных выбросов. Уменьшить количество вредных выбросов возможно путем внедрения в систему управления двигательной установкой управляющих и регулирующих органов по температуре и расходу воздуха (регуляторы температуры и расхода воздуха). Информация о значениях температуры и расхода воздуха приходит на регуляторы через соответствующие датчики. Также в качестве средств для борьбы с вредными выбросами используются уловители и нейтрализаторы вредных веществ.

5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Чрезвычайная ситуация – это обстановка на определенной территории, сложившаяся в результате аварии, опасного природного явления, катастрофы, стихийного или иного бедствия, которая может повлечь или повлекла за собой человеческие смерти, а также ущерб здоровью людей или окружающей среде, значительные материальные потери и нарушение условий жизнедеятельности людей.

В настоящее время основными способами защиты населения, в том числе и производственного персонала, являются:

- укрытие в защитных сооружениях;
- проведение эвакуационных мероприятий;
- использование средств индивидуальной защиты.

При работе котельной могут возникнуть некоторые чрезвычайные ситуации. Например, воспламенение котельной и прилегающей к ней территории. Опасность представляет емкость хранения готовой суспензии.

5.4.1 Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований

В лаборатории с двигательной установкой наибольшую опасность представляет возникновение возгорания. Поскольку, во-первых, топливо необходимо складировать (есть риск его воспламенения), во-вторых, сжигание топлива происходит при высоких температурах в камере сгорания.

При эксплуатации необходимо контролировать состояние канистр с топливом путем внешнего осмотра и измерения температуры в помещении. Признаками самовозгорания являются повышение температуры, наличие пятен утечек топлива. Если появились признаки самовозгорания топлива, то необходимо устранить эти проблемы. Для устранения этих проблем применяются специальные огнетушащие составы для борьбы с воспламенением горючих веществ.

Самой распространенной причиной возникновения пожара является нарушение противопожарных правил. Поэтому обслуживающий персонал при работе с двигательной установкой должен эти правила знать и выполнять. Необходимо периодически проводить мероприятия по технике безопасности. Также, причиной возникновения чрезвычайных ситуаций, связанных с возгоранием помещения, может послужить короткое замыкание в проводке. Поэтому, для предотвращения возгорания помещение должно быть оборудовано средствами пожаротушения (огнетушителями, ящиком с песком, стендом с противопожарным инвентарем), средствами связи. Для предотвращения возгорания на объекте предусмотрена автоматизированная система пожаротушения.

5.4.2 Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС

В качестве мероприятий по предотвращению ЧС были проведены следующие противопожарные мероприятия: помещение было оборудовано: средствами тушения пожара (огнетушителями, ящиком с песком, стендом с противопожарным инвентарем); средствами связи; проверена исправность электрической проводки осветительных приборов и электрооборудования; персонал знает место нахождения средств пожаротушения и средств связи; помнит номера телефонов для сообщения о пожаре; умеет пользоваться средствами пожаротушения. Функционирует АСПТ.

Для тушения пожаров в помещении с компьютерами присутствуют углекислотные и порошковые огнетушители, которые обладают высокой скоростью тушения, большим временем действия, возможностью тушения электроустановок, высокой эффективностью борьбы с огнем. В лаборатории, в которой выполнялась работа, имеется пенный и углекислотный огнетушители.

5.5 Вывод по разделу Социальная ответственность

В заключение всего вышеперечисленного хочется отметить основную задачу, поставленную данным разделом – формирование у индивида социальной ответственности перед другими людьми и окружающей его средой обитания, а также необходимости выполнения всех возможных мероприятий, ведущих к улучшению условий окружающего мира. Преимуществом данной разработки является автоматизация процесса горения гелеобразного топлива, наличие системы пожаротушения.

Как итог проделанной работы по разделу «Социальная ответственность» можно отметить следующее:

– в работе рассмотрена социальная ответственность предприятия (корпоративная социальная ответственность), указаны пагубные воздействия на окружающую среду;

- выявлены и описаны вредные и опасные факторы, возникающие на производстве;
- указаны методики и средства борьбы с этими факторами;
- описаны возможные ЧС и меры по их предупреждению и оповещению, а также приведены регламентированные требования по поведению персонала при ЧС.

Заключение

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы была разработана АСУ ТП горения гелеобразного топлива на основе современной микропроцессорной техники. Использование в качестве энергоресурса гелеобразного топлива является перспективным решением. В рамках научно-исследовательской работы были установлены фундаментальные закономерности и характеристики протекания физико-химических процессов при зажигании и горении группы составов гелеобразных топлив в условиях варьирования параметров окружающей среды в широких диапазонах, соответствующих условиям протекания процессов в камерах сгорания энергогенерирующих установок.

Спроектированная автоматизированная система является трехуровневой. Полевой уровень включает датчики измерения температуры, давления, расхода, концентрации, а также запорную арматуру и исполнительные механизмы. На среднем уровне располагается контроллер компании «ЭлеСи», на верхнем уровне – АРМ оператора. Также была разработана автоматическая система пожаротушения для защиты персонала и оборудования от пожара.

В ходе написания ВКР выполнено:

- разработана группа составов гелеобразных топлив на основе загущенных горючих жидкостей, в том числе с добавлением мелкодисперсных горючих частиц, также установлены характеристики, механизмы зажигания и горения гелеобразных топлив;
- системный анализ объекта автоматизации;
- разработан комплект проектной и технической документации: структурная схема, функциональная схема, заказная спецификация приборов и средств автоматизации, схема монтажная, схема электрическая соединений щита управления, схема электрическая соединений щита пожаротушения, перечни элементов, общий вид щита управления, сборочный чертеж щита

пожаротушения, перечень составных частей щита управления, спецификация щита пожаротушения;

– проектирование мнемосхем для удаленного мониторинга и управления АСУ ТП горения гелеобразного топлива и системой пожаротушения.

Результаты выпускной квалификационной работы могут быть использованы в качестве основы для проектирования систем сжигания гелеобразного топлива, а также проектирования систем пожаротушения.

Список публикаций студента

1. Glushkov D.O., Pleshko A.O., Gaydukova (Yashutina) O.S. Influence of heating intensity and size of gel fuel droplets on ignition characteristics // International Journal of Heat and Mass Transfer. - 2020 - Vol. 156, Article number 119895. - p. 1-12.
2. Glushkov D.O., Paushkina K. K., Pleshko A.O., Vysokomorniy V.S. Characteristics of micro-explosive dispersion of gel fuel particles ignited in a high-temperature air medium // Fuel. - 2022 - Vol. 313, Article number 123024. - p. 1-13.
3. Плешко А.О., Беляев С.В., Глушков Д.О., Паушкина К.К. Экспериментальное исследование процессов зажигания и горения гелеобразных топлив с добавлением мелкодисперсных частиц // XXV Международная научно-практическая конференция, посвященная памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева «Решетневские чтения», г. Красноярск, 10-12 ноября 2021 г. - СибГУ им. М.Ф. Решетнева, 2021 - С. 212-214.
4. Плешко А.О., Беляев С.В., Паушкина К.К. Экспериментальное исследование характеристик диспергирования гелеобразных топлив при нагреве частиц в высокотемпературной воздушной среде // Международная молодежная научная конференция «XXV Туполевские чтения (школа молодых ученых)», посвященная 60-летию со дня осуществления Первого полета человека в космическое пространство и 90-летию Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева-КАИ, г. Казань, 10-11 ноября 2021 г. - КНИТУ КАИ, 2021 - С. 302-309.
5. Плешко А.О., Беляев С.В., Глушков Д.О. Характеристики процессов микровзрывного диспергирования частиц гелеобразных топлив при зажигании в высокотемпературной воздушной среде // XI Всероссийская конференция с международным участием «Горение топлива: теория,

эксперимент, приложения», г. Новосибирск, 9-12 ноября 2021 г. - НГУ, 2021 - С. 35.

6. Плешко А.О., Беляев С.В., Клепиков Д.М. Экспериментальное исследование характеристик диспергирования гелеобразных топлив при нагреве частиц в высокотемпературной воздушной среде // VI Всероссийская научно-практическая конференция «Энергетика и энергосбережение: теория и практика», г. Кемерово, 8-10 декабря 2021 г. - КузГТУ, 2021 - С. 1-6.

7. Плешко А.О., Глушков Д.О., Паушкина К.К. Исследование влияния компонентного состава металлизированных гелеобразных топлив на характеристики зажигания и горения в условиях лучистого нагрева // XV Всероссийская научная конференция молодых ученых, посвященная Году науки и технологий в России, г. Новосибирск, 6-10 декабря 2021 г. – НГТУ, 2021 – С. 263-268.

8. Плешко А.О., Беляев С.В., Глушков Д.О. Экспериментальное исследование характеристик зажигания и горения гелеобразных топлив при нагреве одиночных частиц в высокотемпературной воздушной среде // XXIII Международная конференция «Химия и химическая технология в XXI веке», г. Томск, 16-19 мая 2022 г. – ТПУ, 2022 – С. 178.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Jyoti B.V.S., Naseem M.S., Baek S.W., Lee H.J., Cho S.J. Hypergolicity and ignition delay study of gelled ethanolamine fuel // *Combustion and Flame*. Elsevier, 2017. Vol. 183. P. 102–112. DOI:10.1016/j.combustflame.2017.05.007.
2. Ciezki H.K., Naumann K.W. Some aspects on safety and environmental impact of the German green gel propulsion technology // *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*. 2016. Vol. 41, № 3. P. 539–547. DOI:10.1002/prep.201600039.
3. Yang D., Xia Z., Huang L., Ma L., Feng Y., Xiao Y. Experimental study on the evaporation characteristics of the kerosene gel droplet // *Experimental Thermal and Fluid Science*. Elsevier Inc., 2018. Vol. 93. P. 171–177. DOI:10.1016/j.expthermflusci.2017.12.031.
4. Padwal M.B., Natan B., Mishra D.P. Gel propellants // *Progress in Energy and Combustion Science*. 2021. Vol. 83. P. 100885. DOI:10.1016/j.pecs.2020.100885.
5. Glushkov D.O., Pleshko A.O., Yashutina O.S. Influence of heating intensity and size of gel fuel droplets on ignition characteristics // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. Elsevier Ltd, 2020. Vol. 156. P. 119895. DOI:10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2020.119895.
6. Vershinina K.Y., Glushkov D.O., Nigay A.G., Yanovsky V.A., Yashutina O.S. Oil-Filled Cryogels: New Approach for Storage and Utilization of Liquid Combustible Wastes // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2019. Vol. 58, № 16. P. 6830–6840. DOI:10.1021/acs.iecr.9b00580.
7. Glushkov D.O., Paushkina K.K., Shabardin D.P., Strizhak P.A., Gutareva N.Y. Municipal solid waste recycling by burning it as part of composite fuel with energy generation // *Journal of Environmental Management*. Academic Press, 2019. Vol. 231. P. 896–904. DOI:10.1016/j.jenvman.2018.10.067.
8. Glushkov D.O., Feoktistov D.V., Kuznetsov G.V., Batishcheva K.A., Kudelova T., Paushkina K.K. Conditions and characteristics of droplets breakup for

industrial waste-derived fuel suspensions ignited in high-temperature air // *Fuel*. 2020. Vol. 265. P. 116915. DOI:10.1016/j.fuel.2019.116915.

9. Aphale S.S., DesJardin P.E. Development of a non-intrusive radiative heat flux measurement for upward flame spread using DSLR camera based two-color pyrometry // *Combustion and Flame*. Elsevier Inc., 2019. Vol. 210. P. 262–278. DOI:10.1016/j.combustflame.2019.08.042.

10. Glushkov D.O., Kuznetsov G. V., Nigay A.G., Yanovsky V.A. Influence of gellant and drag-reducing agent on the ignition characteristics of typical liquid hydrocarbon fuels // *Acta Astronautica*. Elsevier Ltd, 2020. Vol. 177. P. 66–79. DOI:10.1016/J.ACTAASTRO.2020.07.018.

11. 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*. Elsevier Masson, 2018. Vol. 127. P. 126–141. DOI:10.1016/J.IJTHEMALSCI.2018.01.027.

12. Averkov I.S., Arefyev K.Y., Baykov A. V, Yanovskiy L.S. Investigation of the efficiency of regenerative cooling of the ramjet combustor by gasification products of energy-intensive material *. 2017. Vol. 24, № 1. DOI:10.1134/S0869864317010164.

13. Fry R.S. A Century of Ramjet Propulsion Technology Evolution // <https://doi.org/10.2514/1.9178>. American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc., 2012. Vol. 20, № 1. P. 27–58. DOI:10.2514/1.9178.

14. Yanovskiy L.S., Baykov A. V, Raznoschikov V. V, Averkov I.S. Alternative Fuels and Perspectives Solid Oxide Fuel Cells Usage in Air Transport. DOI:10.1149/05701.0149ecst.

15. Glushkov D.O., Egorov R.I., Klepikov D.M. High-speed contactless measurements of temperature evolution during ignition and combustion of coal-based fuel pellets // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. Elsevier Ltd, 2021. Vol. 175. P. 121359. DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121359.

16. Галеев А. Г. Основы устройства испытательных стендов для отработки жидкостных ракетных двигателей и двигательных установок. Руководство для инженеров-испытателей – г. Пересвет, Московской области: Изд-во ФКП «НИЦ РКП», 2010. - 178 с.: ил.

17. ГОСТ 34.602-89 Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Техническое задание на создание автоматизированной системы. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://gostexpert.ru/gost/gost-34.602-89>. – Загл. с экрана.

18. ГОСТ 34.601-90 Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Стадии создания. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200006921>. – Загл. с экрана.

19. ГОСТ 34.201-89 Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Виды, комплектность и обозначение документов при создании автоматизированных систем. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://internet-law.ru/gosts/gost/11319/>. – Загл. с экрана.

20. СП 485.1311500.2020 Системы противопожарной защиты. Установки пожаротушения автоматические. Нормы и правила проектирования. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/573004280> – Загл. с экрана.

21. ГОСТ 12.2.047-86 Система стандартов безопасности труда. Пожарная техника. Термины и определения. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200007105> – Загл. с экрана.

22. ГОСТ 21.403–80 Система проектной документации для строительства. Обозначения условные графические в схемах. Оборудование энергетическое. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/901706028>. – Загл. с экрана.

23. ГОСТ 21.208-2013 Система проектной документации для строительства. Автоматизация технологических процессов. Обозначения

условные приборов и средств автоматизации в схемах. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200108003>. – Загл. с экрана.

24. ГОСТ Р 53674-2009 Арматура трубопроводная. Номенклатура показателей. Опросные листы для проектирования и заказа. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/gost-r-53674-2009>. – Загл. с экрана.

25. ООО «Метран» Каталог продукции [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.emerson.ru/ru-ru/catalog>, свободный. – Загл. с экрана.

26. НПП «ЭЛЕМЕР» Каталог продукции [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.elemer.ru/catalog/>, свободный. – Загл. с экрана.

27. ООО «ОВЕН» Каталог продукции [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://owen.ru/catalog>, свободный. – Загл. с экрана.

28. ПГ «МИДА» Каталог продукции [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.midaus.com/katalog/datchiki-davleniya.html>, свободный. – Загл. с экрана.

29. ООО «Данфосс» Каталог продукции [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://danfoss.pro/catalog/>, свободный. – Загл. с экрана.

30. АО «ВИКА» Каталог продукции [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.wika.ru/products_ru_ru.WIKA, свободный. – Загл. с экрана.

31. АО «ВИКА» Каталог продукции [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.gefran.ru/catalog/>, свободный. – Загл. с экрана.

32. «Спецавтоматика» Каталог продукции [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://sa-biysk.ru/catalog/1335/17371/>, свободный. – Загл. с экрана.

33. ЛПТ Каталог продукции [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://luis-lpt.ru/catalog/vspomogatelnoe-tekhnologicheskoe-oborudovanie/signalizator-davleniya-gazovyy-sdg-2/>, свободный. – Загл. с экрана.

34. «Гефран» Каталог продукции [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.eksis.ru/catalog/>, свободный. – Загл. с экрана.
35. ООО «Приборы контроля и привод» Каталог продукции [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.kip59.ru/katalog/>, свободный. – Загл. с экрана.
36. Волошенко А. В., Горбунов Д. Б. Проектирование функциональных схем систем автоматического контроля и регулирования: учебное пособие//Томск: Изд-во ТПУ. – 2008. – 108 с.
37. Приводы Siemens. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://aviteksbt.ru/catalog/privody_siemens/, свободный. – Загл. с экрана.
38. ЛПТ Каталог продукции [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://luis-lpt.ru/catalog/>, свободный. – Загл. с экрана.
39. Контроллеры SIMATIC S7–300. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.siemens-ru.com/taxonomy/term/13>, свободный. – Загл. с экрана.
40. ПЛК ЭЛСИ-ТМК. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://elesy.ru/products/products/plc.aspx>, свободный. – Загл. с экрана.
41. ПЛК ЭЛСИ-ТМ. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://elesy.nt-rt.ru/images/manuals/plc.pdf>, свободный. – Загл. с экрана.
42. Принципиальные электрические схемы средств автоматизации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://studopedia.su/10_114033_printsipialnie-elektricheskie-shemi-sredstv-avtomatizatsii.html, свободный. – Загл. с экрана.
43. Ключев А.С., Глазов Б.В. Проектирование систем автоматизации технологических процессов. Справочное пособие. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 464 с.
44. ГОСТ 2.301-68 Единая система конструкторской документации. Форматы. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2007. – 5 с

45. Проектирование электрических и трубных проводок. Трубные проводки. РМ4-6-92 ч. 2. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ani-https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293851/4293851760.htm>, – Загл. с экрана.
46. СКС ЭЛЕКТРО. Электронный каталог. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://xn----jtbncduncbo1j.xn--p1ai/catalog/kvvg/kvvg-2x0-75/>, – Загл. с экрана.
47. Кабель РФ. Электронный каталог. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cable.ru/cable/group-krvg.php>, – Загл. с экрана.
48. ЭКС. Электронный каталог. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://e-кс.ru/cena/cable-vvng-1s-3-1_5, – Загл. с экрана.
49. Кабель Москва. Электронный каталог. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://xn----7sbdqwji0k.xn--p1ai/cable_mark/kvvgng, – Загл. с экрана.
50. ЭТМ. Электронный каталог. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.etm.ru/cat/nn/9688919>, – Загл. с экрана.
51. Тинко. Электронный каталог. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.tinko.ru/catalog/product/243636/>, – Загл. с экрана.
52. Sieder J., Kleebusch K., Bach C., Tajmar M. Development History and Verification of the Flight Model of a 500 N Ethanol/LOX Rocket Engine, 7th European Conference for Aeronautics and Aerospace Sciences (EUCASS). <https://doi.org/10.13009/EUCASS2017-418>.
53. Андык В.С. Теория автоматического управления. Учебное пособие к практическим занятиям: - Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2000. – 108 с.
54. ТК РФ Статья 160. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 27.12.2018).
55. ТК РФ Статья 135. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 27.12.2018).
56. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (р. от 27.12.2018). – М.; Москва, Кремль: Изд. Российская газета, 2018. – 215 с.

57. ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования. – М.; Москва: Изд. Издательство стандартов, 2001. – 15 с.

58. ГОСТ 12.0.003-2015. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Опасные и вредные производственные факторы. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200136071>. – Загл. с экрана.

59. СанПиН 2.2.4.548–96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. – М.; Информационно-издательский центр Минздрава России, 2001. – 20 с.

60. ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. Система стандартов безопасности труда. Шум. Общие требования безопасности. – М.; Москва: Изд. Издательство стандартов, 2014. – 15 с.

61. СНиП 23-05-95*. Естественное и искусственное освещение. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/871001026>. – Загл. с экрана.

62. СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95*. – М.; Информационно-издательский центр Минздрава России, 2016. – 74 с.

63. ГОСТ 12.1.038-82. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/5200313>. – Загл. с экрана.

64. ГОСТ 30331.4-95 Электроустановки зданий. Часть 4. Требования по обеспечению безопасности. Защита от тепловых воздействий. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200001338>. – Загл. с экрана.

65. ГОСТ Р 56257-2014. Характеристика факторов внешнего природного воздействия. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200118630>. – Загл. с экрана.

66. ГОСТ 12.1.005-88 Система стандартов безопасности труда. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200003608>. – Загл. с экрана.

67. СНиП 23-05-95*. Естественное и искусственное освещение. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/871001026>. – Загл. с экрана.

68. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы. – Москва: Изд. Деан, 2003. – 56 с.

69. ГОСТ Р 56257-2014 Характеристика факторов внешнего природного воздействия. Общая классификация. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200118630>. – Загл. с экрана.

Приложение А

(обязательное)

Опросные листы на технические средства автоматизации

Таблица А1 – Опросный лист на датчик температуры № 1

		Информация для заказа	
Общие сведения	Назначение прибора		Измерение температуры топлива/окислителя в трубопроводе
	Место установки		Трубопровод
	Позиция		1а/2а
	Вид установки		По месту
	Тип прибора		Термоэлектрический преобразователь
	Прибор аварийной защиты		Нет
	Класс зоны	по взрывоопасности Федеральный закон от 22.07.2008 г. N123-ФЗ, ГОСТ Р 51330.9-99 (ПУЭ)	2
Технические	Контролируемая среда		Гелеобразно топливо/Кислород
	Диапазон измеряемой температуры		От +20 до +80 °С
	Давление рабочей среды		0,2 МПа
Прибор и его техническая характеристика	Диапазон измерения		От -50 до +150 °С
	С индикацией/без индикации*		Без индикации
	Материал корпуса		-
	Напряжение питания		12...36 В
	Выходной сигнал		4...20 мА
	Схема подключения		2-х проводная
	Диаметр кабельного ввода (поставляется комплектно)		Для кабеля диаметром 8 мм
	Класс допуска		1
	Длина погружаемой части		80 мм
	В комплекте с защитной гильзой		Да
	Резьба для установки гильзы		M16x1,5
	Диаметр защитной арматуры прибора		6 мм
	Вид взрывозащиты		Взрывозащищенный Edx
	Заземление		-
	Номинальная статическая характеристика		100М
	Климатическое исполнение		С3
	Степень защиты корпуса по ГОСТ 14254-96		IP 65
	Наличие сертификата об утверждении типа средств измерений (о регистрации в Государственном реестре средств измерений)		Да
	Наличие разрешения на применение в поднадзорных Ростехнадзору производствах и объектах		Да

Таблица А2 – Опросный лист на датчик температуры № 2

Информация для заказа			
Общие сведения	Назначение прибора		Измерение температуры в камере сгорания
	Место установки		Камера сгорания
	Позиция		3а
	Вид установки		По месту
	Тип прибора		Термоэлектрический преобразователь
	Прибор аварийной защиты		Нет
	Класс зоны	по взрывоопасности Федеральный закон от 22.07.2008 г. N123-ФЗ, ГОСТ Р 51330.9-99 (ПУЭ)	0
Технические параметры	Контролируемая среда		Парогазовая горючая смесь
	Диапазон измеряемой температуры		От +20 до +600 °С
	Давление рабочей среды		0,9 МПа
Прибор и его техническая характеристика	Диапазон измерения		От 0 до +1200 °С
	С индикацией/без индикации*		Без индикации
	Материал защитной арматуры		ХН45Ю
	Напряжение питания		24 В
	Выходной сигнал		4...20 мА
	Схема подключения		2-х проводная
	Класс допуска		В
	Длина погружаемой части		250 мм
	В комплекте с защитной гильзой		Да
	Резьба для установки гильзы		M16x1,5
	Диаметр защитной арматуры прибора		6 мм
	Вид взрывозащиты		-
	Заземление		-
	Номинальная статическая характеристика		N
	Климатическое исполнение		ХЛ1
	Степень защиты корпуса по ГОСТ 14254-96		IP54
	Наличие сертификата об утверждении типа средств измерений (о регистрации в Государственном реестре средств измерений)		Да
	Наличие разрешения на применение в поднадзорных Ростехнадзору производствах и объектах		Да

Таблица А3 – Опросный лист на датчик давления № 1

Информация для заказа			
Общие сведения	Назначение прибора		Измерение давления топлива/кислорода в трубопроводе
	Тип прибора		Датчик избыточного давления
	Позиция		4а/5а
	Место установки		Трубопровод
	Прибор аварийной защиты		Нет
	Место установки отбора давления		В трубопроводе подачи топлива/кислорода
	Класс зоны	по взрывоопасности Федеральный закон от 22.07.2008 г. N123-ФЗ, ГОСТ Р 51330.9-99 (ПУЭ)	2
Технические данные	Среда		Гелеобразное топливо/Кислород
	Диапазон измерения		От 0 до 0,6 МПа
	Диапазон температуры измеряемой среды		От -40 до +80 °С
	Наличие индикации		Нет
	Монтажный кронштейн		Нет
	Напряжение питания		12...36 В
	Климатическое исполнение		УММ
	Предел основной относительной погрешности		Не выше $\pm 0,25$ %
	Выходной сигнал		4-20 мА
	Материал корпуса		Сталь
	Кабельный ввод		Под кабель диаметром 10 мм
	Тип подключения		Сальник металлический прямой (ПМ)
	Тип монтажной резьбы		M20x1,5
	Разделительный сосуд в комплекте		Нет
	Степень защиты корпуса по ГОСТ 14254-96		IP 65
	Вентильный блок		Нет
	Открытая измерительная мембрана		Да
Наличие сертификата об утверждении типа средств измерений (о регистрации в Государственном реестре средств измерений)		Да	

Таблица А4 – Опросный лист на датчик давления № 2

Информация для заказа			
Общие сведения	Назначение прибора		Измерение давления в камере сгорания
	Тип прибора		Датчик избыточного давления
	Позиция		ба
	Место установки		Импульсная трубка, подключенная к камере сгорания
	Прибор аварийной защиты		Нет
	Место установки отбора давления		Нижняя часть камеры сгорания
	Класс зоны	по взрывоопасности Федеральный закон от 22.07.2008 г. N123-ФЗ, ГОСТ Р 51330.9-99 (ПУЭ)	0
Технические данные	Среда		Парогазовая горючая смесь
	Диапазон измерения		От 0 до 1,6 МПа
	Диапазон температуры измеряемой среды		От -40 до +215 °С
	Наличие индикации		Нет
	Монтажный кронштейн		Нет
	Напряжение питания		10...30 В
	Схема подключения		Двухпроводная
	Предел основной относительной погрешности		Не выше ±0,5 %
	Выходной сигнал		4-20 мА
	Материал корпуса		Нержавеющая сталь
	Кабельный ввод		С наружной резьбой ½ NPT
	Тип подключения по		DIN 3852-E
	Размер монтажной резьбы		G ¼ A
	Разделительный сосуд в комплекте		Нет
	Степень защиты корпуса по МЭК 60529		IP67 (NEMA 4х)
	Открытая измерительная мембрана		Нет
Наличие сертификата об утверждении типа средств измерений (о регистрации в Государственном реестре средств измерений)		Да	

Таблица А5 – Опросный лист на датчик расхода № 1

Информация для заказа			
Общие сведения	Назначение прибора		Измерение расхода топлива
	Место установки		Трубопровод
	Позиция		7а
	Вид установки		По месту
	Тип прибора		Электромагнитный расходомер
	Прибор аварийной защиты		Нет
	Класс зоны	по взрывоопасности Федеральный закон от 22.07.2008 г. N123-ФЗ, ГОСТ Р 51330.9-99 (ПУЭ)	2
Технические данные	Контролируемая среда		Гелеобразное топливо
	Диапазон измеряемого расхода		От 0 до 0,13 кг/с
	Давление рабочей среды		0,2 МПа
Прибор и его техническая характеристика	Диапазон измерения		До 6,5 м ³ /ч
	Диапазон температур окружающей среды		От 0 до +30 °С
	С индикацией/без индикации*		Без индикации
	Материал корпуса		-
	Напряжение питания		24 В
	Выходной сигнал		4...20 мА
	Схема подключения		2-х проводная
	Тип присоединения расходомера к трубопроводу		Фланцевый по ГОСТ 33259-2015
	Материал фланца		Нержавеющая сталь 12Х18Н10Т
	Предел основной относительной погрешности измерений		±0,5 %
	Вид исполнения		Взрывозащищенное Exd
	Степень защиты корпуса по ГОСТ 14254-96		IP 67
	Наличие сертификата об утверждении типа средств измерений (о регистрации в Государственном реестре средств измерений)		Да
	Наличие разрешения на применение в поднадзорных Ростехнадзору производствах и объектах		Да

Таблица А6 – Опросный лист на датчик расхода № 2

Информация для заказа			
Общие сведения	Назначение прибора		Измерение расхода кислорода
	Место установки		Трубопровод
	Позиция		8а
	Вид установки		По месту
	Тип прибора		Вихревой расходомер
	Прибор аварийной защиты		Нет
	Класс зоны	по взрывоопасности Федеральный закон от 22.07.2008 г. N123-ФЗ, ГОСТ Р 51330.9-99 (ПУЭ)	2
Технические данные	Контролируемая среда		Кислород
	Диапазон измеряемого расхода		От 0 до 0,13 кг/с
	Давление рабочей среды		0,2 МПа
Прибор и его техническая характеристика	Диапазон измерения		До 0,13 кг/с
	Диапазон температур окружающей среды		От 0 до +30 °С
	С индикацией/без индикации*		Без индикации
	Материал корпуса		-
	Напряжение питания		24 В
	Выходной сигнал		4...20 мА
	Схема подключения		2-х проводная
	Тип присоединения расходомера к трубопроводу		Фланцевый по ГОСТ 33259
	Материал фланца		Нержавеющая сталь 12Х18Н10Т
	Предел основной относительной погрешности измерений		±1 %
	Вид исполнения		Взрывозащищенное Exd
	Степень защиты корпуса по ГОСТ 14254-96		IP 67
	Наличие сертификата об утверждении типа средств измерений (о регистрации в Государственном реестре средств измерений)		Да
	Наличие разрешения на применение в поднадзорных Ростехнадзору производствах и объектах		Да

Таблица А7 – Опросный лист на газоанализатор

Информация для заказа			
Общие сведения	Назначение прибора		Измерение содержания кислорода в дымовых газах, а также вредных выбросов
	Место установки		Тракт дымовых газов
	Позиция		ба
	Вид установки		По месту
	Тип прибора		Газоанализатор
	Прибор аварийной защиты		Нет
	Класс зоны	по взрывоопасности Федеральный закон от 22.07.2008г. N123-ФЗ, ГОСТ Р 51330.9-99 (ПУЭ)	0
Технические данные	Контролируемая среда		Дымовые газы
	Максимальная температура контролируемой среды		1300 °С
	Диапазон измеряемых концентраций		-
	Давление рабочей среды		Атмосферное
Прибор и его техническая характеристика	Диапазон измерения		-
	Максимальная температура контролируемой среды		1300 °С
	С индикацией/без индикации*		Без индикации
	Материал корпуса		-
	Напряжение питания		220 В переменного тока
	Выходной сигнал		4...20 мА
	Схема подключения		2-х проводная
	Степень защиты корпуса по ГОСТ 14254-96		Не менее IP 54
	Наличие сертификата об утверждении типа средств измерений (о регистрации в Государственном реестре средств измерений)		Да
	Наличие разрешения на применение в поднадзорных Ростехнадзору производствах и объектах		Да

Приложение Б
(справочное)

**Characteristics of ignition and combustion of gel fuel particles heated in a
high-temperature air medium**

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ03	Плешко Андрей Олегович		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ИШФВП	Глушков Дмитрий Олегович	к.ф.-м.н., доцент		

Консультант-лингвист отделения иностранных языков ШБИП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Пташкин Александр Сергеевич	к.ф.н., доцент		

1 Introduction

At present, an important direction in the development of the condensed substances combustion theory is the study of gel fuels ignition and combustion processes. In terms of aggregate state, they are between liquid and solid fuels and combine their advantages in terms of relatively high energy and environmental characteristics, as well as safety indicators during storage and use.

A detailed analysis of consistent patterns, conditions and characteristics of these processes requires developing the current approaches to conduct experimental research of fast-paced physical and chemical processes.

To date, the results of a systematic analysis of microexplosive dispersion characteristics during ignition and combustion of gel fuels particles are not known. Thus, the purpose of the research is to experimentally study the characteristics of micro-explosive dispersion when single particles of a gel fuels group are ignited in a high-temperature motionless air medium. A hardware and software system are used for high-speed video recording of the processes.

2 Experimental methods

2.1 Fuel compositions

In the research, two gel fuel compositions, based on 10 wt% polyvinyl alcohol (PVA) aqueous solution, were prepared to experimentally study the characteristics of micro-explosive dispersion. Previous research [1] of these compositions focused on the physical and chemical characteristics of fuel pellets and ignition characteristics of single particles. The first composition (№1) was prepared without adding any fine solid particles: 50 vol% oil + 48 vol% aqueous solution of PVA + 2 vol% emulsifier. The second composition (№2) was prepared from the first one by adding 30 wt% coal dust to the primary oil emulsion (50 vol% oil + 48 vol% aqueous solution of PVA + 2 vol% emulsifier). The fuel components characteristics are presented in [1].

A well-tested technique was used to prepare the fuel compositions. The aqueous solution of PVA was produced by dissolving the PVA powder in water,

heated to 80 °C, with a paddle mixer. After that, the corresponding amount of oil (50 vol%) and emulsifier (2 vol%) were introduced into the aqueous solution of PVA to prepare a primary oil emulsion by dispersing the components with a high-speed disperser at 11 000 rpm. This was followed by separating the oil emulsion into two parts. The first part was used to prepare oil-filled cryogel (№1). Into the second part of the oil emulsion, portions of coal dust (30 wt%) were introduced. A fuel slurry was produced by mixing the components with a disperser. After a freezing / thawing cycle (each lasting for 12 hours) of the emulsion and slurry at temperatures minus 15 °C and 20 °C, respectively, the cryogel turned the fuel compositions into gel. Finally, the pellets of fuel compositions №1 and №2 were cut at room temperature into 10-mg particles to be used for studying the characteristics of the micro-explosive dispersion of gel fuels.

2.2 Experimental setup

The characteristics of the micro-explosive dispersion of single gel fuel particles during ignition were explored using a well-tested experimental setup [2].

A high-temperature air medium (maximum temperature 1000 °C) was generated in a tube muffle furnace (internal diameter 50 mm, length 450 mm). A fuel particle with a mass of 10 mg, placed on a ceramic holder, was introduced into the muffle furnace, preheated to T_g , with a mini-robotic arm. A high-speed video camera was positioned on a movable platform of the mini-robotic arm.

The rates (V_{in}) of introducing the fuel particles into the muffle furnace were 0.06, 0.08 and 0.10 m/s. This factor influences the intensity of heat supply to the fuel, particle heating rate. The higher the value of V_{in} , the faster the fuel particle reaches a region with the temperature T_g .

A group of characteristics was recorded in the experimental research: ignition delay times (t_d) of the fuel particle; average velocity (V_p) of fine fragments flying off in the fuel melt droplet dispersion; flame temperature (T_f) during the fuel combustion; dimensions of the region (D_c) in which fine fragments burned out.

A set of 5–10 experiments was conducted for each fuel composition under identical conditions ($T_g=\text{const}$, $V_{\text{in}}=\text{const}$). The video frames were processed with commercial software Phantom Camera Control (Vision Research, USA), Tema Automotive (Image Systems AB, Sweden) and custom software developed in Wolfram Mathematica (Wolfram Research, USA).

The ignition delay times (t_d), the velocities (V_p) of fine fragments after the fuel melt droplet dispersion, the size of the burnout region (D_c) were calculated by processing video recordings according to the method [3]. Contactless measurement of the flame temperature (T_f) was performed using the two-color pyrometry [4].

3 Results and discussion

The ignition delay time (t_d) is one of the key characteristics of any fuel. In actual practice, it defines the size specifications of combustion chambers and the thermal conditions of energy generation equipment. Figure B1 presents the curves of the ignition delay times of particles of fuel compositions №1 and №2 versus the heated air temperature. The approximation curves were plotted through the points corresponding to the average values of t_d , established in a set of 5–10 experiments.

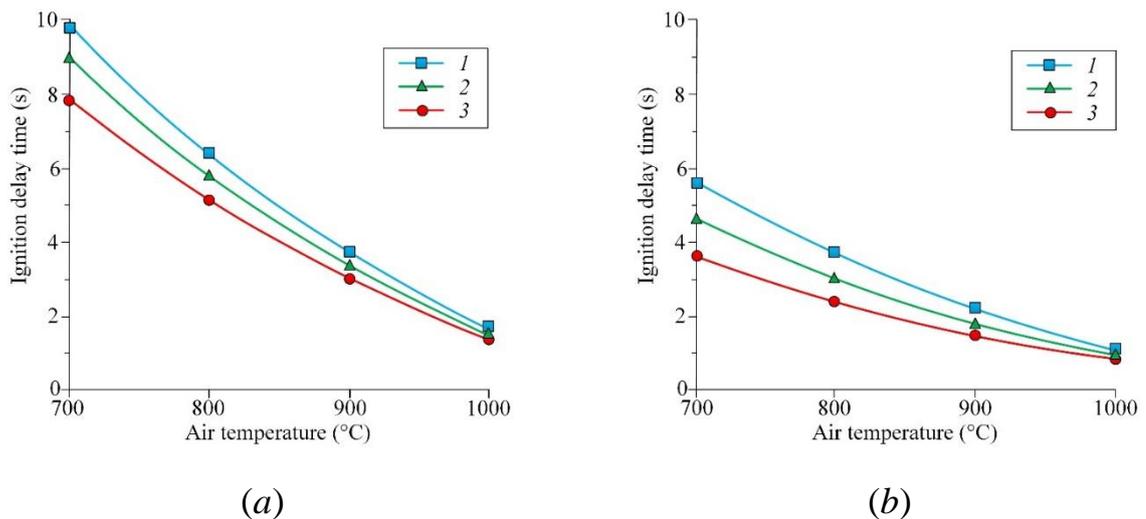


Fig. B1. Ignition delay times of fuel compositions №1 (a) and №2 (b) vs. temperature at different rates of introducing fuel particles into the combustion chamber: 1 – 0.06 m/s; 2 – 0.08 m/s; 3 – 0.10 m/s

The faster the fuel particles were introduced into the combustion chamber with an uneven temperature distribution, the lower the ignition delay times. This result is caused by faster heating of the fuel particle, since an area with the temperature T_g is created in the chamber, when the particle is introduced in a shorter time, other conditions being equal. The times of introducing the fuel particles into the muffle furnace at the rates of 0.06 m/s and 0.10 m/s differ more than 1.6 times. The velocity of particles has quite a significant effect on the ignition delay times. A more considerable difference in t_d for compositions №1 and №2 is typical of near-threshold ignition conditions $T_g=700$ °C (Fig. B1) and is about 25% and 50%, respectively. The higher the oxidizer temperature in the combustion chamber, the less the ignition delay times for different V_{in} differ. This is attributed to the fact that under near-threshold ignition conditions, heat and mass transfer in the fuel particle and the vicinity have a decisive effect (up to 95%) on the induction period duration. The higher the source temperature, the higher the intensity of heat and mass transfer processes. The duration of these processes is comparable to that of phase transformations and chemical reactions.

Moreover, there is a significant (50–90%) difference in the ignition delay times (Fig. B1) of particles of fuel compositions №1 and №2 under identical experimental conditions. The obtained result is explained by different patterns of physical and chemical processes developing in the ignition of various fuel compositions.

Figs. B2 and B3 present typical video frames of the ignition and combustion of single particles of gel fuel compositions investigated in this study at $T_g=900$ °C. Videoframes of high-speed recording allow to conclude that there are significantly different patterns of processes that occur when particles of a typical gel fuel and drops of a combustible liquid are heated.

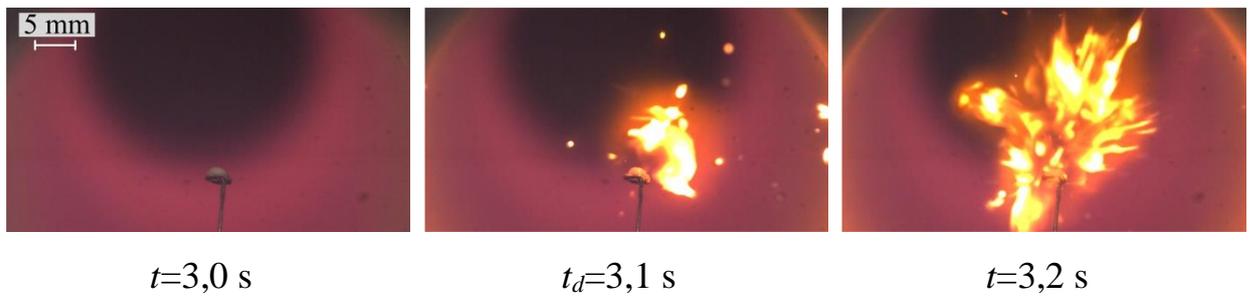


Fig. B2. Typical video frames of the ignition and combustion of a gel fuel particle (composition №1 – without solid particles) at $T_g=900\text{ }^\circ\text{C}$

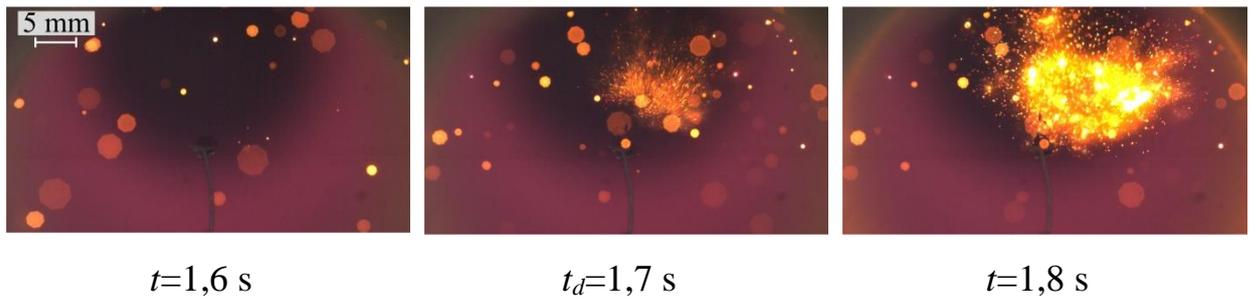


Fig. B3. Typical video frames of the ignition and combustion of gel fuel particles (composition №2 – with fine solid particles) at $T_g=900\text{ }^\circ\text{C}$

For the gel fuels considered in this research, in the first case (Fig. B2), the following pattern of physical and chemical processes is observed during the induction period:

- a great number of bubbles emerge in the near-surface droplet layer;
- bubbles increase in number and size, significantly changing the droplet shape;
- bubbles collapse, and the initial droplet is dispersed to produce a group of much smaller droplets;
- the previous process occurs with a release of combustible liquid vapors into the oxidizer medium through the thickener layer;
- under threshold conditions, the gas-phase ignition takes place in the vicinity of the droplet.

Unlike it is with liquid single-component fuels, combustion is initiated not in the immediate vicinity of the droplet but in a rather large area (Fig. B2). This positively affects the development of subsequent combustion of the fuel and

enhances the burnout of components. At the moment of the gel fuel ignition (composition №1), the flaming starts around one or several small fragments (Fig. B2, video frame at $t_d=3.1$ s) which separated and moved away from the droplet surface as a result of a micro-explosion. The temperature of these fine droplets is quite low. When they move around the initial droplet, evaporation proceeds at a relatively low rate. As the fine droplets are moving away from the initial droplet surface, the ambient temperature increases to T_g , enhancing evaporation. Under critical conditions, the fuel vapors are ignited around the moving fine droplet or a group of droplets. Then, the exothermic reaction is spread from this area all over the volume of the combustible gas-vapor mixture that was formed during the induction period around the gel fuel melt droplet (Fig. B2). Micro-explosions, accompanied by the droplet dispersion, intensify both the ignition and burnout of the fuel due to considerable growth of the surface area of liquid component evaporation.

In the second case (Fig. B3), a different pattern of physical and chemical processes during the gel fuel particle ignition is observed. At the initial stage of the gel fuel particle heating, fine solid particles are entrained by the combustible liquid vapors from the free surface. Due to the more rapid heating of these fine particles, they are ignited (Fig. B3, video frame at $t=1.6$ s). Yet this does not lead to the ignition of the gas-vapor mixture, since the concentration and temperature of the combustible liquid vapors around the particle are not high enough to initiate combustion. After some time, a gas-vapor mixture is formed around the fuel melt droplet. A set of processes occurs here that are similar to those developing during the ignition of oil-filled cryogels (composition №1), which were described above. A significant difference lies in the fact that as a result of the bubble collapse and fuel melt droplet dispersion, vapors and fine coal particles impregnated with it are blown into the high-temperature medium. Therefore, the gas-phase ignition of the gel fuel containing fine solid particles occurs quite evenly in a large area (Fig. B3).

At the moment of ignition (Fig. B3, video frame $t_d=1.7$ s), a large group of coal particles, moving and drawing away from the initial fuel droplet surface as a result of a micro-explosion, is ignited. The fuel vapors around the moving fine coal

particles are the first to ignite. The typical time of the combustible gas mixture formation around coal particles due to the evaporation of the combustible liquid (composition №2) is lower than that during the evaporation of fine melt droplets after the dispersion of the initial gel fuel droplet (composition №1). Therefore, the ignition delay times of composition №2 are lower than those of composition №1, other things being equal. The exothermic reaction process then spreads from the ignition area throughout the whole volume of the combustible gas-vapor mixture which is formed during the induction period and contains fine solid combustible particles.

Apart from the different ignition mechanisms of the fuel compositions (Figs. B2 and B3), there are significant differences in the characteristics of the micro-explosive dispersion of melt droplets of gel fuels №1 and №2. The obtained result (Fig. B4) is generally consistent with the ignition mechanisms of different fuel compositions.

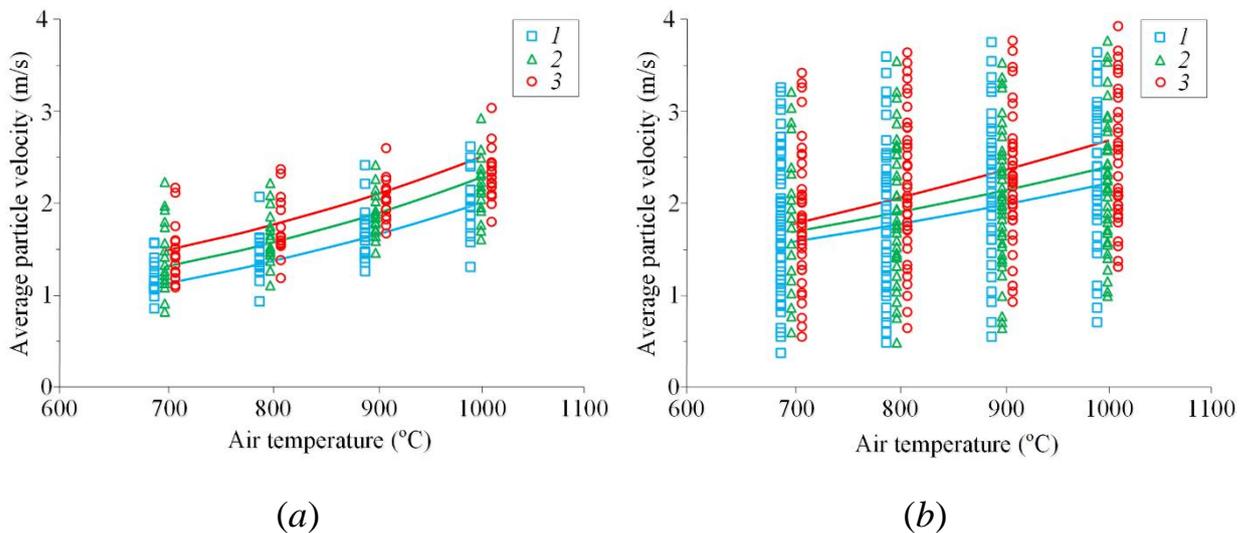


Fig. B4. Velocities of fine fragments during the dispersion of the melt droplet of gel fuels №1 (a) and №2 (b) at different rates of introducing fuel particles into the combustion chamber: 1 – 0.06 m/s; 2 – 0.08 m/s; 3 – 0.10 m/s

Fuel composition №1 is characterized by an increase in the average velocity of particles, emerging as a result of the micro-explosive dispersion, when the heating

source temperature or the rate of introducing the particles into the combustion chamber increases. It increases by 90–100% from 1.1 to 2.2 m/s (Fig. B4a) in the following parameter ranges: $T_g=700\text{--}1000\text{ }^\circ\text{C}$, $V_{in}=0.06\text{--}0.10\text{ m/s}$. This result is explained by the processes developing in the fuel melt droplet at the combustible liquid – thickener interface. The higher the heating intensity, the higher the temperature gradients in the heterogeneous structure of the fuel droplet. This leads to considerable growth of pressure in the bubbles of the near-surface layer and consequently, an increase in the energy supplied from the external energy source and spent on the droplet dispersion. The higher the value of this characteristic, the higher the velocity of fine fragments during the dispersion of the melt droplet of gel fuel №1 (Fig. B4a). In the case of fuel composition №2, the average values of equivalent velocities of fine fragments change less significantly (by 45–55% from 1.6 to 2.5 m/s) when the parameters T_g and V_{in} are varied in the same ranges (Fig. B4b). A substantial dispersion of the experimental data in Fig. B4b, as compared with the data in Fig. B4a, is explained by different ignition mechanisms of the fuel compositions. As it was mentioned above, in the ignition of particles of fuel composition №2, fine coal particles enter the oxidizer medium both during the evaporation of liquid components at the initial heating stage (under the conditions of the diffusion-convective heat and mass transfer in the gas medium) and as a result of the micro-explosive dispersion of the gel fuel melt droplet. In the first case, the particles velocities are 0.5–1.0 m/s, in the second case, they are 1–4 m/s.

Since fuel composition №2 is characterized by a less significant dependence of velocities of fine fragments during droplet dispersion under conditions of varying the parameters T_g and V_{in} (Fig. B4b), then the volumes of the burnout area change less scale (up to 9 times) in the range of 1,5–13,5 cm³ (Fig. B5b).

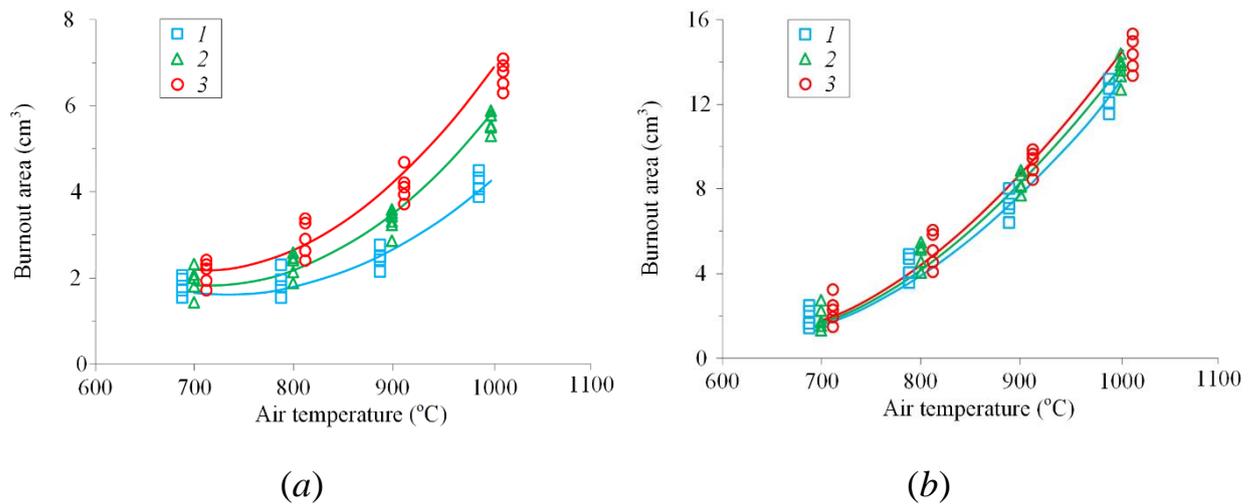


Fig. B5. The sizes of areas in which fine fragments burn out during the dispersion of melt droplets of gel fuels №1 (a) and №2 (b) at different rates of introducing fuel particles into the combustion chamber: 1 – 0.06 m/s; 2 – 0.08 m/s; 3 – 0.10 m/s

With similar characteristics of the experiment, the volumes of the burnup area change by more than 11 times in the range of 0.7–8.0 cm³ (Fig. B5a) for fuel composition №1. The size of the burnout area (about 15–25 mm in diameter) exceeds that of the initial fuel particle (2.8 mm in diameter) by 5–9 times. Thus, it is highly promising to use the micro-explosive dispersion of fuel particles (droplets) in actual practice to enhance the ignition and burnout of high-energy materials in combustion chambers, as it improves the main efficiency indicators of rocket booster engines and other power-producing units.

The operation of actual devices is impossible without controlling the temperature during combustion, since the limitations on the allowable temperatures of the combustion chamber wall materials are the main constraining factor for a wide transition to the fifth-generation ducted jet engines. In this research, for the first time, we identified the flame temperatures (Fig. B6) in the combustion of single gel fuel particles using the high-speed two-color pyrometry. The temperature trends of the flame during combustion were obtained in a series of 5 experiments conducted under identical conditions.

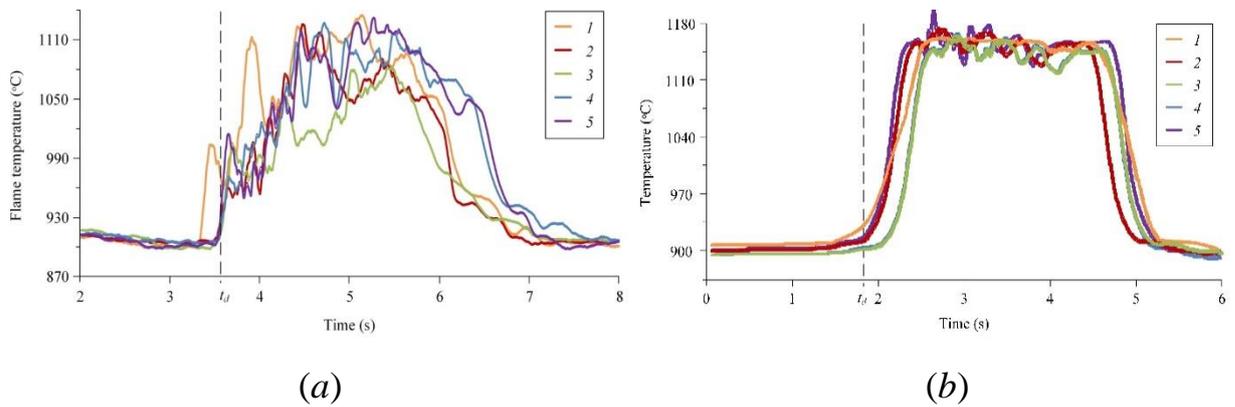


Fig. B6. Flame temperature during the combustion of gel fuel №1 (a) and №2 (b) at $V_{in}=0,08$ m/s and $T_g=900$ °C (a); 1–5 – serial numbers of experiments

Fuel composition №1 is characterized by a series of micro-explosions after the fuel particle ignition. The extrema on the temperature trends, obtained at $T_g=850–1000$ °C, are congruent with the ignition and combustion mechanism of fuel composition №1, described above, since they illustrate a series of micro-explosions occurring until the fuel components completely burn out (Fig. B6a). Adding fine solid combustible particles to the composition of gel fuel №2 does not only enhance the intensity of its ignition, but also provides a rather stable burnout of the fuel without significant temperature fluctuations during combustion (Fig. B6b).

4 Application of research results

The experimental data obtained in this research can be used as a basis for controlling the processes of ignition and combustion in power generating equipment. The research findings suggest that the patterns and characteristics of the ignition of gel fuels of different component compositions may differ greatly. Such great flexibility in the mechanisms and characteristics of combustion is one of the benefits of using promising gel fuels as compared with widespread solid and liquid fuels. The obtained results are the backbone for the subject development of gel fuels toward metallization of fuel compositions. So far, no criteria have been established for a reliable prediction of compositions, conditions and characteristics of the micro-explosive dispersion of gel fuel particles during ignition. One of the approaches to

developing such a predictive tool is based on the ratio of the amount of thermal energy supplied to a fuel particle in the induction period to the amount of kinetic energy during the movement of fine particles after the fuel melt droplet dispersion. Thus, the latter can be estimated using the results obtained in this study as source data. It can be concluded that the conducted research is not only an in-depth study of promising gel fuels but also a contribution to the development of the theory of combustion toward enhancement of physical and chemical processes under the conditions of micro-explosive dispersion.

References

1. Glushkov D.O., Pleshko A.O., Yashutina O.S. Influence of heating intensity and size of gel fuel droplets on ignition characteristics // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. Elsevier Ltd, 2020. Vol. 156. P. 119895. DOI:10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2020.119895.
2. Glushkov D.O., Paushkina K.K., Shabardin D.P., Strizhak P.A., Gutareva N.Y. Municipal solid waste recycling by burning it as part of composite fuel with energy generation // *Journal of Environmental Management*. Academic Press, 2019. Vol. 231. P. 896–904. DOI:10.1016/j.jenvman.2018.10.067.
3. Glushkov D.O., Feoktistov D.V., Kuznetsov G.V., Batishcheva K.A., Kudelova T., Paushkina K.K. Conditions and characteristics of droplets breakup for industrial waste-derived fuel suspensions ignited in high-temperature air // *Fuel*. 2020. Vol. 265. P. 116915. DOI:10.1016/j.fuel.2019.116915.
4. Aphale S.S., DesJardin P.E. Development of a non-intrusive radiative heat flux measurement for upward flame spread using DSLR camera based two-color pyrometry // *Combustion and Flame*. Elsevier Inc., 2019. Vol. 210. P. 262–278. DOI:10.1016/j.combustflame.2019.08.042.