

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Исследование характеристик воспламенения углеводородного горючего

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

Под редакцией Д.А. Ягодникова
А.В. Сухова

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана

Москва – 2023

УДК 621.4551(075.8)

ББК 39.65

Я30

Факультет «Энергомашиностроение»

Кафедра «Ракетные двигатели

Рекомендовано Научно-методическим советом

МГТУ им. Н.Э. Баумана в качестве учебно-методического пособия

Рецензент: Яновский Л.С.

Ягодников Д.А., Сухов А.В., Федотова К.В., Папырин П.В., Бурков А.С.

Я30 Исследование характеристик воспламенения углеводородного горючего / [Д.А. Ягодников и др.]; под редакцией Д.А. Ягодникова, А.В. Сухова. – Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023. – 42 с.: ил.

ISBN 978-5-7038-000-0

Приведены методические указания по выполнению лабораторных работ, предусмотренных программами дисциплин «Топлива и рабочие процессы в жидкостных ракетных двигателях (ЖРД)», «Топлива и рабочие процессы КРД». Учебно-методическое пособие по лабораторным работам предназначено для студентов, обучающихся по специальности 24.05.02 «Проектирование авиационных и ракетных двигателей». Учебно-методическое пособие может быть полезно для аспирантов соответствующего профиля.

УДК 621.4551(075.8)

ББК 39.65

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023

© Оформление. Издательство

МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023

ISBN

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	4
ВВЕДЕНИЕ.....	6
1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПРАВИЛ ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ	9
2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1. «ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРИОДА ЗАДЕРЖКИ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДНОГО ГОРЮЧЕГО»	11
2.1 Цель и задачи лабораторной работы №1	11
2.2 Краткие теоретические сведения по воспламенению углеводородного горючего	11
2.3 Описание лабораторной установки для определения периода задержки воспламенения углеводородного горючего.....	13
2.4 Подготовка и проведение эксперимента по определению периода задержки воспламенения углеводородного горючего.....	16
2.5 Обработка результатов эксперимента по определению периода задержки воспламенения углеводородного горючего.....	18
2.6 Контрольные вопросы по лабораторной работе №1	23
3 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2. «ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛОВ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДНОГО ГОРЮЧЕГО В ВОЗДУХЕ».....	25
3.1 Цель и задачи лабораторной работы №2	25
3.2 Теория воспламенения углеводородных горючих.....	25
3.3 Описание лабораторной установки и модельного газогенератора	30
3.4 Подготовка и проведение эксперимента по оценке пределов воспламенения углеводородного горючего в воздухе	34
2.5 Обработка результатов эксперимента и определение пределов воспламенения углеводородного горючего.....	37
2.6 Контрольные вопросы по лабораторной работе №2	41
ЛИТЕРАТУРА	42

ПРЕДИСЛОВИЕ

Программой дисциплины «Топлива и рабочие процессы в жидкостных ракетных двигателях (ЖРД)» предусмотрен обязательный цикл из четырёх лабораторных работ в виде лабораторного практикума. Данное издание содержит методические указания по выполнению первой и второй лабораторной работы этого практикума «Определение периода задержки воспламенения углеводородного горючего» и «Определение пределов воспламенения смеси воздуха с углеводородным горючим».

Данное пособие предназначено для студентов IV курса специалитета, проходящих обучение по специальности 24.05.02 «Проектирование авиационных и ракетных двигателей». В результате изучения материала пособия студенты смогут приобрести следующие компетенции:

- способность использовать основные законы естественно-научных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования;
- способность проводить вторичную обработку и анализ результатов экспериментальных исследований, стендовой, летной отработки и эксплуатации авиационных и ракетных двигателей и энергоустановок в составе ЛА;
- способность рассчитывать характеристики и конструировать жидкостные реактивные двигатели (ЖРД), их узлы и агрегаты.

В издании рассмотрены вопросы, посвящённые характеристикам процесса воспламенения углеводородных горючих с воздухом в модельном газогенераторе, а также периоду задержки воспламенения углеводородного горючего – водного раствора этанола различной концентрации в воздухе и в соляной кислоте. Рассматривается зависимость надёжности воспламенения от различных факторов, представлена методика определения срывных характеристик. Приводятся описания и методики работы на учебно-лабораторных установках и обработки результатов экспериментов.

Прохождение данной лабораторной работы предполагает предварительное освоение следующих дисциплин учебного плана:

1. «Математический анализ»;
2. «Химия»;
3. «Физика»;
4. «Механика жидкости и газа»;
5. «Термодинамика»;
6. «Теория тепломассообмена».

Лабораторные работы выполняются на экспериментальных установках, расположенных в стендовых корпусах отдела ЭМ1-4 НИИЭМ МГТУ им. Н.Э. Баумана на территории Дмитровского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана.

ВВЕДЕНИЕ

Полное время сгорания топлива складывается из промежутков времени, необходимых для последовательного развития процессов. При этом сами реакции горения протекают сравнительно быстро, в то время как прочие составляющие общего процесса – испарение компонентов, перемешивание горючего с окислителем, ускорение реакций и т.п. – происходят медленнее. Скорость горения в целом определяется наиболее медленным процессом.

Задачей всякого исследования является выявление закономерностей изучаемого процесса для определения способов его управления. Среди важных задач теории горения можно выделить нахождение способов его интенсификации для создания малогабаритных и высокоэффективных энергетических силовых установок. Успешное решение данной задачи возможно при наличии ясного представления о влиянии свойств компонентов топлива и организации процесса горения на его критические явления и явления распространения зоны реакции. К критическим явлениям горения, которые характеризуются резким изменением режима процесса при малом изменении внешних условий, относятся процессы вынужденного воспламенения (зажигания) и самовоспламенения.

При изучении процесса самовоспламенения топливной смеси выделяют медленную начальную стадию, которая характеризуется малым тепловыделением и незначительным повышением температуры, названную периодом индукции или периодом задержки самовоспламенения. В реальных условиях период задержки самовоспламенения определяют как физические факторы (прогрев, испарение компонентов и их смешение), так и химические (время индукции химических реакций). Эта величина играет существенную роль в рабочем процессе энергетических силовых установок, поэтому её установление, а также определение влияющих факторов являются важными задачами. Лабораторная работа №1 данного учебно-методического пособия посвящена определению периода задержки воспламенения углеводородного горючего.

В инженерной практике часто топливная смесь газов, в которой возможно стационарное и устойчивое горение, находится вне пределов самовоспламенения. В таком случае для инициирования процесса горения необходимо создать начальный очаг, то есть воспламенить топливную смесь от внешнего источника тепла. Данный процесс называется вынужденным воспламенением или зажиганием и может осуществляться различными способами: накаливаемым телом, горячим газом, электрической искрой или дугой, ударной волной и т.д. Разновидностью зажигания является инициирование реакции за счёт каталитического действия различных веществ.

Экспериментальное изучение процесса вынужденного воспламенения позволило установить, что инициирование горения при этом зависит от ряда особенностей источника зажигания и самой смеси. При зажигании нагретым телом важную роль играют его температура, размеры, каталитические эффекты, зависящие от материала тела и т.д. При искровом зажигании определяющими являются мощность искры, размеры искрового промежутка, размеры, форма и материал электродов, характер разряда, скорость движения топливной смеси газов и т.д. Для самой топливной смеси газов определяющими характеристиками являются её состав, давление и температура.

Каждой топливной смеси газов свойственна определенная область составов, характеризующая коэффициентом избытка окислителя, в которой заданный источник зажигания инициирует процесс устойчивого горения. Границы этой области называются границами воспламенения – бедная (относительно горючего) или нижняя граница, и богатая (относительно горючего) или верхняя граница.

При неограниченном увеличении мощности поджигающего источника в сосудах достаточно больших размеров границы воспламенения стремятся к определенным значениям составов смеси, за пределами которых её невозможно воспламенить никаким источником – это концентрационные пределы распространения пламени. Они не зависят от условий зажигания и, следовательно, их рассматривают как физико-химическую характеристику

смеси. Для заданного окислителя и горючего они зависят лишь от физических условий – давления и температуры топливной смеси газов.

Таким образом, для каждой топливной пары при заданных условиях по температуре и давлению существует такая минимальная энергия, которая неспособна зажечь смесь даже при оптимальной для воспламенения концентрации.

Поскольку переходный по своей природе процесс зажигания зависит от значительного количества факторов, то до настоящего времени не существует единой расчетной теории оценки его характеристик и параметров. Единственной возможностью получения информации о возможности воспламенения топливной смеси при заданных режимных параметрах и выбранном источнике зажигания является проведение экспериментального исследования.

Лабораторная работа № 2 данного учебно-методического пособия посвящена экспериментальному определению пределов воспламенения смеси углеводородного горючего, а именно, керосина марки ТС-1, с воздухом при различных значениях коэффициента избытка окислителя и давлении.

1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПРАВИЛ ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

1. Обучающиеся, не знающие правил техники безопасности, к выполнению лабораторных работ не допускаются.

2. Приступать к выполнению работы можно только с разрешения лаборанта или преподавателя.

3. При выполнении лабораторных работ необходимо соблюдать дисциплину и порядок. Посторонние разговоры и шум в лаборатории недопустимы. Во время проведения лабораторного пуска необходимо находиться на рабочем месте, указанном преподавателем.

4. Режим работы установки задает лаборант или преподаватель, проводящий лабораторную работу. Отклонения от режимов работы установки **категорически запрещаются.**

5. Включение и выключение установок производится только с разрешения лаборанта или преподавателя.

6. В случае нарушения нормальной работы установки не разрешаются устранение недостатков и регулировка без участия лаборанта или преподавателя.

7. Работу с химически активными и пожароопасными веществами проводить в одежде с короткими рукавами, в перчатках и защитных очках, только в присутствии лаборанта или преподавателя.

8. После проведения текущего испытания, а также после завершения работы на установке необходимо привести рабочее место в порядок, протереть элементы установки и вспомогательные приборы от остатков химически активных и пожароопасных веществ.

9. При появлении небольшого открытого пламени в процессе проведения эксперимента необходимо потушить его специальными средствами.

При прохождении лабораторного практикума запрещается:

1. проверять содержимое лабораторных ёмкостей по запаху;
2. убирать осколки стекла голыми руками (необходимо использовать пылесос);

3. включать и выключать силовые и осветительные рубильники без разрешения преподавателя или лаборанта;
4. оставлять работающую установку без присмотра;
5. производить исправления в электросистемах, находящихся под напряжением;
6. оставлять систему, находящуюся под напряжением, без присмотра;
7. заходить и протягивать руки за ограждения во время работы установки;
8. снимать заземляющие провода и работать с незаземленным электрооборудованием.

2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1. «ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРИОДА ЗАДЕРЖКИ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДНОГО ГОРЮЧЕГО»

2.1 Цель и задачи лабораторной работы №1

Целью лабораторной работы является изучение характеристик воспламеняющихся топлив и способа определения периода задержки воспламенения (τ_s). Для углеводородного горючего - водного раствора этанола различной концентрации в воздухе - экспериментальным путем определяется τ_s и влияние на него начальной температуры горючего.

Для достижения поставленной цели в процессе выполнения лабораторной работы должны быть решены следующие **задачи**:

- закрепление изученных ранее теоретических основ процесса самовоспламенения;
- изучение состава и принципа работы лабораторной установки;
- проведение экспериментального исследования;
- обработка и анализ результатов испытаний;
- составление отчета по лабораторной работе.

2.2 Краткие теоретические сведения по воспламенению углеводородного горючего

Химическое зажигание основано на использовании самовоспламеняющихся компонентов, которые могут применяться как самостоятельное топливо или как средство для воспламенения основного топлива.

Основными преимуществами применения химического самовоспламенения топлива являются.

1. Значительное упрощение всей системы запуска ДУ, так как никаких дополнительных устройств для начального воспламенения топлива в этом случае не нужно. Отсюда - более надежный пуск двигателя. Особенно важно это преимущество для двигателей многоразового запуска.

2. Меньшая опасность взрыва в камере сгорания при запуске ДУ, так как скопление в больших количествах топлива в камере невозможно.

3. Уменьшение длины зоны подготовительных процессов камеры, что приводило к уменьшению массы конструкции.

4. Более устойчивый процесс работы двигателя по отношению к низкочастотной неустойчивости.

В таблице 1 приведены характеристики воспламенения некоторых топливных пар.

Одним из основных параметров, характеризующих воспламеняемость топлива, является период задержки воспламенения τ_s , под которым понимается интервал времени от момента подачи первичного источника избыточной энергии до момента появления пламени.

Таблица 1 - Самовоспламеняемость компонентов ракетного топлива [1]

Окислитель→ Горючее ↓	Фтор F ₂	Кислород O ₂	Азотная кислота HNO ₃	Азотный тетраоксид N ₂ O ₄	Перекись водорода H ₂ O ₂	Серная кислота H ₂ SO ₄
Аммиак NH ₃	С	Н	К	К	Н	-
Этанол C ₂ H ₅ OH	Н	Н	Н	Н	Н	К
Гидразин N ₂ H ₄	С	Н	С	С	К	С
Керосин C _{7,21} H _{23,29}	С	Н	Н	Н	Н	К
Водород H ₂	С	Н	Н	Н	Н	К
Триэтиламин (C ₂ H ₅) ₃ N	С	Н	С	С	Н	К
НДМГ (CH ₃) ₂ N ₂ H ₂	С	Н	С	С	Н	С

Примечание: С - самовоспламеняющиеся топлива, Н - несамовоспламеняющиеся топлива, К - топлива, самовоспламеняющиеся в присутствии катализатора.

Очень важно знать значение τ_s , так как оно позволяет оценить качества топлива в тех или иных условиях запуска двигательной установки (ДУ). На период задержки воспламенения влияют прежде всего химические свойства заданных компонентов, которые могут существенно изменяться в процессе

хранения, например, от воздействия света, материала баков и т.д. Период задержки также зависит от условий смещения, опережения подачи одного из компонентов, давления в камере при запуске ДУ, температуры компонентов и др.

На практике применяют несколько методов определения τ_s и в соответствии с этими методами существуют различные схемы установок и приборов для определения периода задержки самовоспламенения. В данной лабораторной работе период τ_s задержки воспламенения определяют на приборе МФК, разработанном А. М. Масленниковым при участии А. Ф. Фроста и Г.Ф. Кнорре и модернизированном на кафедре Э-1 МГТУ им. Н. Э. Баумана. Этот прибор является переносным и может быть использован в различных условиях.

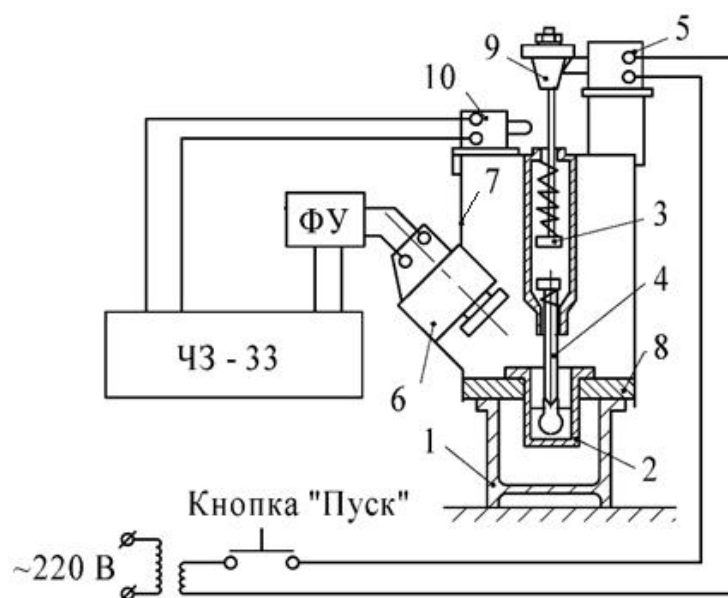
Определение τ_s на приборе МФК проще, чем на других приборах. Кроме того, получаемые результаты обладают достаточно высокой точностью. Однако условия эксперимента несколько отличаются от реальных условий воспламенения топлив в камере двигателя и поэтому результаты имеют сравнительную ценность.

В качестве основных компонентов топлива для определения τ_s в лабораторной работе используются следующие компоненты топлива:

- горючее: этиловый спирт технический (этанол);
- окислитель: серная кислота с добавкой перманганата калия.

2.3 Описание лабораторной установки для определения периода задержки воспламенения углеводородного горючего

Основными частями установки (рисунок 1), применяемой для определения τ_s , являются реактор и электронный миллисекундомер.

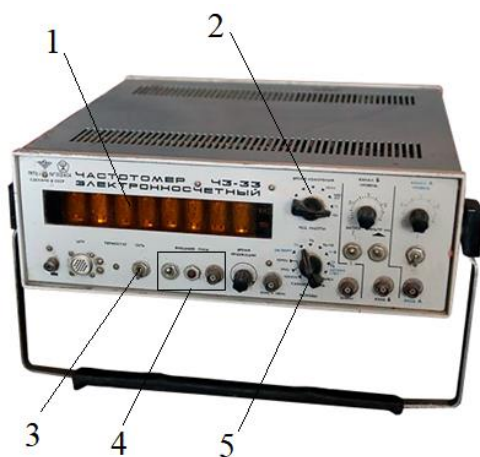


1 – термостат, 2 – тигель, 3 – ударник, 4 – бойок, 5 – электромагнит,
6 – фотодиод, 7 – защитный кожух, 8 – стол термостата, 9 – контактный
конус, 10 – концевой выключатель

Рисунок 1 - Схема лабораторной установки

Реактор состоит из термостата 1 с тиглем 2, ударника 3 с бойком 4, электромагнита 5, фотодиода 6 и защитного кожуха 7 с клапанами для отвода газов. Тигель компонента топлива устанавливают в специальное отверстие на фланце (столе) термостата 8. В зависимости от условий эксперимента термостат может быть заполнен горячей водой, льдом или находиться при температуре окружающей среды. В случае использования несамовоспламеняющихся компонентов для их воспламенения может использоваться нихромовая нить накаливания, подключенная к источнику постоянного тока 6 В и размещенная вблизи тигля.

Электронный миллисекундомер состоит из частотомера ЧЗ-33, работающего в режиме отсчета времени, и электронной схемы, вырабатывающей командные импульсы для частотомера (рисунок 2). Электронная схема, выполненная на полупроводниках, позволяет получить практически безынерционный запуск и выключение частотомера.



1 – цифровая панель, 2 – контроллер изменения положения метки времени и времени измерения, 3 – сеть, 4 – внешний пуск, 5 – настройка рода работы

Рисунок 2 - Частотомер электронно-счётный

Особенность данной лабораторной установки заключается в возможности исследовать характеристики воспламенения самовоспламеняющихся компонентов топлива. В этом случае работа установки осуществляется следующим образом. Первоначально в стеклянную капсулу закачивается горючее, она помещается в тигель, в который потом добавляется окислитель. При этом горючее и окислитель должны образовывать самовоспламеняющееся топливо. Ударник в исходном положении зафиксирован защелкой электромагнита. Ударник после выхода защелки электромагнита из паза падает на боек под действием пружины. В нижней части бойка в трубке находится ножка ампулы, шарик с горючим которой находится в тигле, заполненном окислителем. Резкий удар бойка разбивает ампулу, и в этот момент происходит смешение компонентов. В момент соприкосновения ударника с бойком (момент смешения компонентов) контактный конус 9 на головке ударника с помощью концевого выключателя 10 замыкает электрическую цепь, в результате чего начинается отсчет времени τ_s прибором ЧЗ-33. Излучение, появившееся в момент воспламенения горючей смеси, воздействует на фотодиод, который через фотоусилитель ФУ вырабатывает электрический импульс. Последний поступает на частотомер, прекращается отсчет времени. Значение полученного τ_s высвечивается на передней панели частотомера.

Защитный кожух 7, состоящий из задней стенки, прикреплённой к штативу реактора, верхней крышки и двух створок, которые закрываются на замок, служит для затемнения пространства и предохранения экспериментатора от осколков ампулы и возможных ожогов.

В случае использования несамовоспламеняющихся компонентов методика проведения эксперимента заключается в следующем. В тигель наливается жидкое углеводородное горючее, например, технический этиловый спирт, а в ампулу – окислитель, например, концентрированная серная кислота. Воспламенение этанола с серной кислотой осуществляется в присутствии катализатора – перманганата калия, добавляемого в ампулу с окислителем. По команде системы управления, включающей одновременно отсчет времени с помощью электронного миллисекундомера, происходит срабатывание и перемещение вниз бойка, разбивающего ампулу, что приводит к смешению компонентов топлива. После появления видимого пламени, регистрируемого фотосопротивлением, выдается команда на останов электронного миллисекундомера.

2.4 Подготовка и проведение эксперимента по определению периода задержки воспламенения углеводородного горючего

Эксперимент проводится с одним из горючих и окислителей, указанных выше. При проведении эксперимента реактор прибора МФК должен быть размещен в вытяжном шкафу, а электронный миллисекундомер и фотоусилитель - на столе вблизи вытяжного шкафа. Работающему на реакторе прибора перед опытом необходимо надеть очки, халат и резиновые перчатки. Для проведения эксперимента последовательно проводятся следующие операции.

1. Включить питание частотомера и электронной схемы.
2. Открыть створки защитного кожуха прибора. Поднять ударник 3 до момента входа защелки электромагнита 5 в стопорный паз ударника.
3. В чистый и сухой тигель 2 залить заданное количество углеводородного горючего с помощью шприца.

4. Вставить тигель в термостат 1.
5. Проверить стеклянную ампулу на отсутствие трещин и сколов, а также инородных веществ (капель воды, органических примесей и т.п.). При наличии взять другую ампулу.
6. Засыпать в чистую и сухую ампулу катализатор – перманганат калия с помощью мерной ложечки объёмом 0,2 мл.
7. При помощи пипетки аккуратно залить в ампулу заданное количество окислителя (концентрированной серной кислоты).
8. Чистой и сухой стеклянной палочкой перемешать окислитель с катализатором в ампуле. В результате реакции серная кислота и перманганат калия образуют марганцевый ангидрид, который является сильным окислителем, способным к самовоспламенению с этиловым спиртом.
9. Ножку ампулы с окислителем при помощи пинцета вставить в трубку бойка 4 и опустить в центр тигля 2.
10. Закрыть створки защитного кожуха.
11. Закрыть дверку вытяжного шкафа и приступить к проведению эксперимента.
12. Включить блок питания системы управления, электронный миллисекундомер и источник напряжения системы воспламенения.
13. Подать команду на запуск установки.
14. После остановки миллисекундомера записать зарегистрированное показание и дождаться окончания горения топлива.
15. Очистить экспериментальную установку от осколков ампулы, соблюдая правила техники безопасности, и насухо протереть тигель.

Указанные процедуры повторяются и для других начальных характеристиках горючего и окислителя, например, их соотношениях и температуре. Надежные данные для каждого значения τ_s можно получить, взяв среднее арифметическое из 5 экспериментов.

2.5 Обработка результатов эксперимента по определению периода задержки воспламенения углеводородного горючего

Лабораторная работа предусматривает получение экспериментальным путем зависимости периода задержки воспламенения от начальной температуры горючего T_0 или действительного соотношения компонентов K_m . Полученные данные должны быть обработаны методами математической статистики и представлены в виде графических зависимостей $\tau_s = f(T_0)$ или $\tau_s = g(K_m)$.

Для определения погрешности прямых измерений времени задержки самовоспламенения необходимо воспользоваться следующим алгоритмом:

1. Определить наибольшую абсолютную инструментальную погрешность ЧЗ-33 (Δ_a). Поскольку ЧЗ-33 является прибором с цифровым отсчетом измеряемой величины (в данной лабораторной работе – времени), то в качестве абсолютной погрешности следует принять значение, равное половине последнего цифрового разряда индикатора.

2. Вычислить среднее значение серии измерений времени задержки самовоспламенения по формуле:

$$\langle \tau_s \rangle = \frac{\sum_{i=1}^N \tau_{s_i}}{N}, \quad (1)$$

где τ_{s_i} – измеренное значение времени задержки самовоспламенения на i -м эксперименте, N – число экспериментов.

3. Вычислить среднее квадратическое отклонение измерений по формуле:

$$S_{\tau_s} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\tau_{s_i} - \langle \tau_s \rangle)^2}{N - 1}}. \quad (2)$$

4. Проверить экспериментальные значения на наличие промаха (грубой ошибки). Существует несколько критериев выявления и отбрасывания промахов, но ни один из них не является универсальным. Выбор критерия зависит от цели измерения, и решение отбросить какие-то данные принимается субъективно. В

лабораторной работе предлагается воспользоваться критерием Шовене. Из полученного ряда значений, полученного в N экспериментах, выбирается аномальное значение (τ_{s-j}) и вычисляется модуль его отклонения от среднего значения в долях выборочного среднего квадратического отклонения:

$$Z = \frac{|\tau_{s-j} - \langle \tau_s \rangle|}{S_{\tau_s}}. \quad (3)$$

Затем по таблице 2 необходимо определить количество опытов M , при котором полученный отсчёт нельзя считать промахом. Если $M > N$, то τ_{s-j} промах и его нужно удалить из обрабатываемой совокупности и пересчитать среднее квадратичное отклонение для $(N - 1)$ экспериментальных данных.

Таблица 2 – Отбор промахов по критерию Шовене

Z	M	Z	M	Z	M	Z	M	Z	M	Z	M
1	2	1,32	3	1,66	5	1,98	10	2,3	23	2,62	57
1,02	2	1,34	3	1,68	5	2	11	2,32	25	2,64	60
1,04	2	1,36	3	1,7	6	2,02	12	2,34	26	2,66	64
1,06	2	1,38	3	1,72	6	2,04	12	2,36	27	2,68	68
1,08	2	1,4	3	1,74	6	2,06	13	2,38	29	2,7	72
1,10	2	1,42	3	1,76	6	2,08	13	2,4	30	2,72	77
1,12	2	1,46	3	1,78	7	2,1	14	2,42	32	2,74	81
1,14	2	1,48	4	1,8	7	2,12	15	2,44	34	2,76	87
1,16	2	1,5	4	1,82	7	2,14	16	2,46	36	2,78	92
1,18	2	1,52	4	1,84	8	2,16	16	2,48	38	2,8	98
1,20	2	1,54	4	1,86	8	2,18	17	2,5	40	2,82	104
1,22	2	1,56	4	1,88	8	2,2	18	2,52	43	2,84	111
1,24	2	1,58	4	1,9	9	2,22	19	2,54	45	2,86	118
1,26	2	1,6	5	1,92	9	2,24	20	2,56	48	2,88	126
1,28	2	1,62	5	1,94	10	2,26	21	2,58	51	2,9	134
1,30	3	1,64	5	1,96	10	2,28	22	2,6	54	2,92	143

5. Вычислить выборочное среднее квадратическое отклонение среднего значения

$$S_{\langle \tau_s \rangle} = \frac{S_{\tau_s}}{\sqrt{N}}. \quad (4)$$

6. Определить безразмерный коэффициент доверия (Стьюдента) t_α для заданной доверительной вероятности и полученного числа экспериментов по таблице 3 статистических данных.

Таблица 3 – Коэффициент доверия (Стьюдента)

Число изм.	Доверительная вероятность α_Δ					
N	0,5	0,9	0,95	0,98	0,99	0,999
2	1	6,3	12,7	31,8	63,7	636,6
3	0,82	2,9	4,3	7,0	9,9	31,6
4	0,77	2,4	3,2	4,5	5,8	12,9
5	0,74	2,1	2,8	3,7	4,6	8,6
6	0,73	2,0	2,6	3,4	4,0	6,9
7	0,72	1,9	2,4	3,1	3,7	6,0
8	0,71	1,9	2,4	3,0	3,5	5,4
9	0,71	1,9	2,3	2,9	3,4	5,0
10	0,7	1,8	2,3	2,8	3,2	4,8
20	0,69	1,7	2,1	2,5	2,8	3,8
>20	0,67	1,6	2,0	2,5	2,8	3,3

Так для числа экспериментов $N = 10$ и надежности $\alpha_\Delta = 95\%$ значение коэффициента Стьюдента равно 2,3. Чем больше доверительная вероятность, тем надежнее оценка интервала и, вместе с тем, шире его границы.

7. Вычислить случайную погрешность по формуле:

$$\Delta_{\tau_s} = t_\alpha S_{\langle \tau_s \rangle}. \quad (5)$$

8. Вычислить полную абсолютную погрешность по формуле:

$$\Delta \tau_s = \sqrt{\Delta_a^2 + \Delta_{\tau_s}^2}. \quad (6)$$

9. Вычислить полную относительную погрешность по формуле:

$$\delta_{\tau_s} = \frac{\Delta \tau_s}{\langle \tau_s \rangle}. \quad (7)$$

10. После округлений результат измерения времени задержки самовоспламенения необходимо записать в виде:

$$\tau_s = \langle \tau_s \rangle \pm \Delta \tau_s \text{ с} \quad \delta = _\% \quad \alpha_\Delta = 0,95.$$

Отчет по лабораторной работе должен включать результаты в виде таблицы 4.

Таблица 4 – Пример таблицы для заполнения результатов лабораторной работы

$\Delta_a = \text{_____ мс}$					
$T_{0_1} = \text{_____ К}$ или $K_{m_1} = \text{_____}$					
№ эксп.	1	2	3	4	5
τ_{si} , мс					
				$\langle \tau_s \rangle$, мс	
				S_{τ_s} , мс	
				$S_{\langle \tau_s \rangle}$, мс	
				Δ_{τ_s} , мс	
				$\Delta \tau_s$, мс	
				δ_{τ_s} , %	
$\tau_{s1} = \langle \tau_s \rangle \pm \Delta \tau_s \text{ мс} \quad \delta_{\tau_s} = \text{___ \%} \quad \alpha_{\Delta} = 0,95.$					
$T_{0_2} = \text{_____ К}$ или $K_{m_2} = \text{_____}$					
№ эксп.	1	2	3	4	5
τ_{si} , мс					
				$\langle \tau_s \rangle$, мс	
				S_{τ_s} , мс	
				$S_{\langle \tau_s \rangle}$, мс	
				Δ_{τ_s} , мс	
				$\Delta \tau_s$, мс	
				δ_{τ_s} , %	
$\tau_{s2} = \langle \tau_s \rangle \pm \Delta \tau_s \text{ мс} \quad \delta_{\tau_s} = \text{___ \%} \quad \alpha_{\Delta} = 0,95.$					
$T_{0_3} = \text{_____ К}$ или $K_{m_3} = \text{_____}$					
№ эксп.	1	2	3	4	5
τ_{si} , мс					
				$\langle \tau_s \rangle$, мс	
				S_{τ_s} , мс	
				$S_{\langle \tau_s \rangle}$, мс	
				Δ_{τ_s} , мс	
				$\Delta \tau_s$, мс	
				δ_{τ_s} , %	
$\tau_{s3} = \langle \tau_s \rangle \pm \Delta \tau_s \text{ мс} \quad \delta_{\tau_s} = \text{___ \%} \quad \alpha_{\Delta} = 0,95.$					

В таблице 5 представлен пример заполненной таблицы, а на рисунке 3 приведен примерный вид получаемой графической зависимости $\tau_s = f(T_0)$.

Таблица 5 – Пример таблицы результатов лабораторной работы

$\Delta_a = 0,005 \text{ мс}$					
$T_{0_1} = 271 \text{ К}$					
№ эксп.	1	2	3	4	5
$\tau_{si}, \text{ мс}$	3,631	3,747	3,696	3,701	3,777
$\langle \tau_s \rangle, \text{ мс}$					3,71
$S_{\tau_s}, \text{ мс}$					0,064
$S_{\langle \tau_s \rangle}, \text{ мс}$					0,029
$\Delta_{\tau_s}, \text{ мс}$					0,0804
$\Delta \tau_s, \text{ мс}$					0,0806
$\delta_{\tau_s}, \%$					2,172
$\tau_{s1} = 3,71 \pm 0,08 \text{ с} \quad \delta_{\tau_s} = 2,2\% \quad \alpha_\Delta = 0,95.$					
$T_{0_2} = 293 \text{ К}$					
№ эксп.	1	2	3	4 (промах)	5
$\tau_{si}, \text{ мс}$	3,172	3,076	3,19	4,703	3,127
$\langle \tau_s \rangle, \text{ мс}$					3,14
$S_{\tau_s}, \text{ мс}$					0,05
$S_{\langle \tau_s \rangle}, \text{ мс}$					0,025
$\Delta_{\tau_s}, \text{ мс}$					0,08149
$\Delta \tau_s, \text{ мс}$					0,08165
$\delta_{\tau_s}, \%$					2,599
$\tau_{s2} = 3,14 \pm 0,08 \text{ с} \quad \delta_{\tau_s} = 2,6\% \quad \alpha_\Delta = 0,95.$					
$T_{0_3} = 323 \text{ К}$					
№ эксп.	1	2	3	4	5
$\tau_{si}, \text{ с}$	2,851	3,014	2,917	2,799	2,893
$\langle \tau_s \rangle, \text{ мс}$					2,89
$S_{\tau_s}, \text{ мс}$					0,093
$S_{\langle \tau_s \rangle}, \text{ мс}$					0,0414
$\Delta_{\tau_s}, \text{ мс}$					0,1161
$\Delta \tau_s, \text{ мс}$					0,1162
$\delta_{\tau_s}, \%$					4,01
$\tau_{s3} = 2,89 \pm 0,11 \text{ с} \quad \delta_{\tau_s} = 4,0\% \quad \alpha_\Delta = 0,95.$					

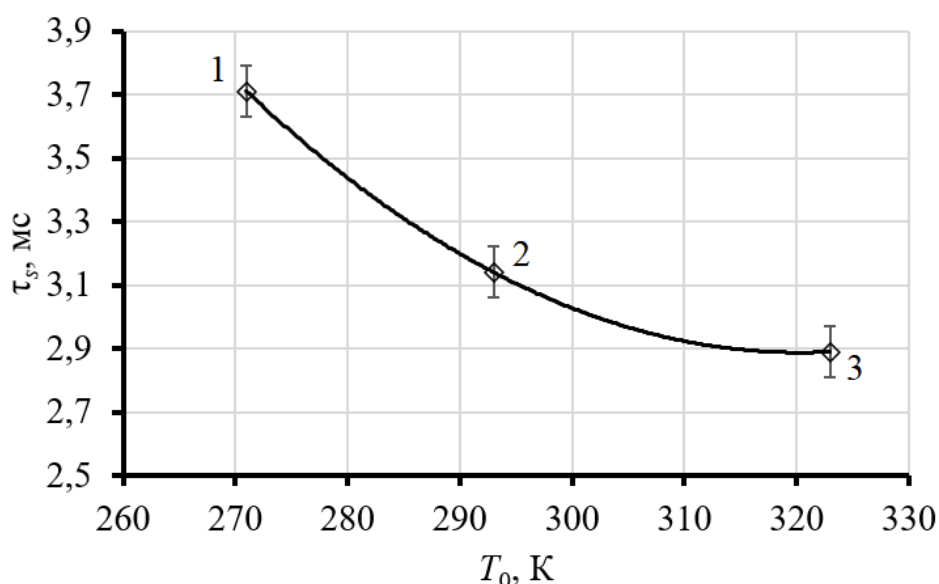


Рисунок 3 – Пример оформления зависимости периода задержки самовоспламенения от температуры горючего

2.6 Контрольные вопросы по лабораторной работе №1

1. Какие характеристики воспламенения можно определять на приборе МФК?
2. Какие самовоспламеняющиеся компоненты вы знаете?
3. Какие самовоспламеняющиеся компоненты могут воспламеняться на приборе МФК?
4. Какие несамовоспламеняющиеся компоненты могут исследоваться на приборе МФК?
5. Каким образом осуществляется воспламенение несамовоспламеняющиеся компонентов на приборе МФК?
6. Сколько каналов регистрации задействовано в лабораторной установке? Какие это каналы?
7. Какое действие необходимо выполнить для определения периода задержки воспламенения?
8. Какое горючее используется в лабораторной установке?
9. Как проводится отсчет времени при определении периода задержки воспламенения?

10. Какой физический принцип положен в основу определения периода задержки воспламенения?
11. Какие зависимости периода задержки воспламенения и от каких параметров можно определить в лабораторной работе?
12. Какие конструкционные материалы используются в конструкции рабочего участка и почему?
13. Каким образом определяется полная абсолютная погрешность измерения времени задержки самовоспламенения?
14. Каким образом определяется наибольшая абсолютная инструментальная погрешность ЧЗ-33?
15. Каким образом экспериментальные значения проверяются на наличие промаха?

3 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2. «ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛОВ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДНОГО ГОРЮЧЕГО В ВОЗДУХЕ»

3.1 Цель и задачи лабораторной работы №2

Целью лабораторной работы является изучение особенностей процесса вынужденного воспламенения и определение характеристик зажигания углеводородно-воздушной смеси в зависимости от коэффициента избытка окислителя и давления в камере сгорания (КС) модельного газогенератора (ГГ).

Для достижения поставленной цели в процессе выполнения лабораторной работы должны быть решены следующие **задачи**:

- закрепление изученных ранее теоретических основ процесса вынужденного воспламенения топливных смесей;
- изучение состава и принципа работы лабораторной установки;
- проведение огневых стендовых испытаний (ОСИ) на модельном ГГ на компонентах воздух-керосин (марки ТС-1);
- обработка и анализ результатов ОСИ.

3.2 Теория воспламенения углеводородных горючих

В камерах сгорания большинства ракетных и реактивных двигателей топливная смесь, как правило, не воспламеняется сама по себе. Для её воспламенения необходимо в небольшом объёме данной смеси каким-либо образом ускорить химические реакции. Это можно сделать за счёт введения в смесь катализатора, источника активных центров (радикалов) или дополнительной теплоты, в качестве которой могут использоваться нагретая проволока, дежурное пламя, горячий газ, ударная волна, электрическая искра (ёмкостная или индуктивная) и т.д.

При этом существуют *границы воспламенения* (по составу, температуре и давлению смеси), за которыми смесь не зажигается заданным источником, а также *пределы воспламенения*, за которыми смесь не зажигается любым источником при любых условиях. Для обеспечения надёжной работы камеры

сгорания или условий пожарной безопасности необходимо устанавливать границы и пределы воспламенения.

Впервые на существование концентрационных границ зажигания указали Малляр и Ле-Шателье в 1883 г. Они установили, что в заданном сосуде для заданного источника зажигания существует определенные граничные значения концентраций топливной смеси, за которыми она не воспламеняется.

Концентрационные пределы воспламенения в значительной степени являются физико-химическими константами топливных смесей, поскольку по определению они не зависят от мощности источника поджигания и объёма, в котором происходит горение, а только от свойств самой смеси и режимных параметров: рода топлива, температуры, давления и т.д.

Как показывают многочисленные эксперименты, диапазон концентраций, в котором возможно распространение пламени, оказывается тем шире, чем больше максимальная нормальная скорость пламени (u_{\max}), или, соответственно, чем выше максимальная температура пламени. Существующие данные по пределам показывают, что «бедные» ($\alpha < 1$) пределы оказываются для всех типов топлива примерно одинаковыми, а «богатые» ($\alpha > 1$) имеют тенденцию к возрастанию с уменьшением молекулярной массы, так что при этом предельный диапазон воспламенения расширяется.

В таблице 6 представлены стехиометрические коэффициенты, концентрационные пределы воспламенения и скорость нормального распространения пламени для некоторых простых горючих в воздухе.

Таблица 6 – Характеристики воспламенения простых горючих с воздухом [2, 3]

Горючее	Формула	K_{m0}	Концентрация горючего в % по объёму			α по пределам воспламенения		u_{\max} , см/с
			Стех.	Нижний	Верхний	Нижн.	Верхн.	
Водород	H ₂	34,5	29,5	4,0	75	10,1	0,14	32,5
Ацетилен	C ₂ H ₂	13,3	7,75	2,5	81	3,57	0,018	8,9
Этилен	C ₂ H ₄	14,8	6,56	2,7	34	2,51	0,135	7,4
Метан	CH ₄	17,23	9,5	5	15	1,98	0,59	3,4
Бензол	C ₆ H ₆	13,3	2,73	1,4	7,1	1,96	0,36	3,34

Изопарафины имеют несколько более узкий концентрационный диапазон воспламенения, чем линейные углеводороды. Циклопарафины имеют примерно такой же диапазон воспламенения, как и нормальные парафины с таким же числом атомов углерода.

Состав природных углеводородных горючих зависит от вида перерабатываемой нефти и применяемых в технологии переработки нефтехимических процессов. Обобщенные данные по составу некоторых марок горючих (типа керосина) для ракетных и реактивных двигателей представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Групповой углеводородный и элементный составы реактивных горючих [3, 4]

Марка горючего (керосин)	Групповой углеводородный состав, % (мас.)				Элементный состав, % (мас.)		K_{m0}	ρ , кг/м ³
	Парафи- новые	Олефи- новые	Нафте- новые	Аромати- ческие	С	Н		
ТС-1	42 – 52	1,1 – 2,0	30 – 49	11 – 21	85,7 – 85,8	14,0 – 14,1	14,73	779,6
РТ	53 – 58	0,2 – 0,3	25 – 30	12 – 22	85,8 – 86,1	13,9 – 14,2	14,73	778,0
Т-8	21 – 50	-	26 – 45	14 – 18	85,8 – 86,0	13,9 – 14,1	14,72	789,5
Т-6	12 – 20	-	75 – 80	3 – 6	86,4 – 86,6	13,4 – 13,6	14,59	841,0
Т-2	40 - 43	1,3 – 1,5	42 - 50	14 - 16	85,5 – 85,7	14,3 – 14,5	14,78	766,3

Для холодной смеси керосина ТС-1 с воздухом (293 К) при атмосферном давлении справедливы следующие характеристики воспламенения [3]:

- нижний концентрационный предел распространения пламени 1,5 % (об.);
- верхний концентрационный предел распространения пламени 7,7 % (об.);
- минимальная воспламеняющая энергия электрического разряда 0,2 – 0,25 мДж;

- температура самовоспламенения 485 К;
- плотность паров 7 кг/м³;
- коэффициент диффузии паров горючего в воздухе $5,29 \cdot 10^{-6}$ м²/с;
- теплота испарения 360 кДж/кг.

В смеси горючего с окислителем источник воспламенения, например, электрическая искра, создает узкую зону химических реакций, которая в результате переноса теплоты и активных центров (радикалов) распространяется от одного слоя смеси к другому. Таким образом, процесс распространения зоны реакции (распространение пламени) представляет собой ряд последовательно идущих непрерывных процессов вынужденного воспламенения. Эта зона интенсивных химических реакций и больших градиентов температуры (концентраций) называется фронтом пламени, скорость распространения которого определяется процессами тепломассообмена от продуктов сгорания к горючей смеси, а также диффузией различных веществ, содержащихся в исходных веществах, в промежуточных и конечных продуктах сгорания.

Для ответа на вопрос, какова физическая природа существования концентрационных пределов распространения пламени, необходимо проанализировать тепловой баланс данного процесса. С уменьшением скорости тепловыделения возрастает относительная роль скорости теплопотерь и при их некоторых конечных значениях избыточной скорости тепловыделения оказывается недостаточно для обеспечения нагрева следующих холодных слоёв свежей смеси. Поэтому фронт пламени оказывается неспособным распространяться в данной смеси [4].

В отличие от пределов самовоспламенения концентрационные границы вынужденного воспламенения зависят от ряда источников теплопотерь, определяемых спецификой проведения эксперимента, а именно, от геометрии камеры сгорания, мощности, геометрии и вида источника поджигания и т.п.

Изучение зависимости границ вынужденного воспламенения от давления, температуры и т.п. проводится, как правило, при постоянной мощности источника зажигания. Для всех простых углеводородных горючих отмечаются

два предела, а именно «богатый» и «бедный». «Бедный» предел соответствует смеси горючего и окислителя с коэффициентом избытка окислителя $\alpha < 1$, а «богатый» $\alpha > 1$. Увеличение начальной температуры смеси расширяет границы (пределы) зажигания, но сравнительно слабо. «Бедные» границы с увеличением температуры практически не изменяются, «богатые» границы более заметно возрастают в линейной зависимости от начальной температуры смеси.

Известно также, что границы вынужденного воспламенения гомогенной смеси сужаются с ростом средней скорости потока. Исключение представляют двухфазные смеси, для которых с ростом средней скорости (ростом турбулентности) границы (пределы) вынужденного воспламенения могут расширяться из-за улучшения локального состава смеси за счёт турбулентной диффузии газа и частиц. Диффузионное горение при турбулентном режиме характеризуется отсутствием четкого деления на зоны исходных компонентов и продуктов сгорания, что позволяет провести аналогию с микрообъёмной моделью турбулентного горения перемешанной смеси, которая объясняет эффект увеличения скорости горения в турбулентном потоке. В малых турбулентных объёмах происходит быстрый процесс молекулярного перемешивания исходной смеси с продуктами сгорания. В тех объёмах, где после смешения температура превышает температуру самовоспламенения, смесь может сгореть значительно быстрее, чем по законам ламинарного горения [5]. Образующиеся при этом продукты реакции вновь смешиваются с исходной смесью, и таким образом происходит распространение пламени.

В камерах сгорания распыливание жидкого горючего происходит в непосредственной близости от зоны горения, и его капли не успевают полностью испариться непосредственно перед зоной горения и тем более равномерно перемешаться с воздухом. Поэтому требуется установить пределы воспламенения таких двухфазных (гетерогенных) смесей. Известно, что при горении жидкого горючего в воздухе для капель горючего наименьших размеров пламя по характеристикам близко к газофазному режиму горения подобной смеси на «бедном» пределе. При увеличении размера капель пламя начинает

сосредоточиваться на дискретных центрах горения вокруг индивидуальных капель горючего, что делает изучение характеристик процессов воспламенения и горения гетерогенных смесей крайне затруднительным. В ряде работ показано, что границы воспламенения крупных капель горючего в газообразном окислителе сдвигаются в зону «богатых» смесей [1]. При этом в области воспламенения всегда должен быть определенный средний уровень концентрации паров горючего, и чем шире спектр колебаний концентраций пара вокруг среднего, с тем большей вероятностью произойдет зажигание при сравнительно низком среднем уровне.

3.3 Описание лабораторной установки и модельного газогенератора

Объектом испытания (ОИ) является стендовый модельный газогенератор (ГГ), работающий на топливе «воздух + керосин», схема которого представлена на рисунке 4. Газогенератор состоит из цилиндрической КС 1 и сменного вкладыша критического сечения 2, изготовленного из графита. Для предотвращения прогара огневой стенки используется проточное охлаждение водой, поступающей в каналы охлаждения 3 через коллектор подвода охладителя 8. Нагретая вода отводится через штуцер слива охладителя 9. С целью перераспределения расхода воздуха, подаваемого в камеру сгорания, а также для турбулизации газовых потоков и повышения полноты сгорания компонентов топлива, подача воздуха распределена на 3 зоны: основной расход воздуха поступает в камеру через штуцер 5, подача оставшейся части осуществляется через коллекторы 6 и 7.

В качестве горючего используется керосин марки ТС-1, поступающий в камеру из бака через штуцер 4. Воспламенение топливной смеси осуществляется электроискровым методом при помощи системы зажигания мощностью 450 Вт, в состав которой входит две свечи 12 типа А 17. В процессе испытаний регистрируются параметры продуктов сгорания в камере, а также подогрев охлаждающей жидкости. Измерения давления осуществляется датчиком, размещенным в позиции 10. Температура продуктов сгорания замеряется

термопарой, вводимой через штуцер 11. Подогрев охлаждающей жидкости определяется при помощи дифференциальной термопары ДТ2.

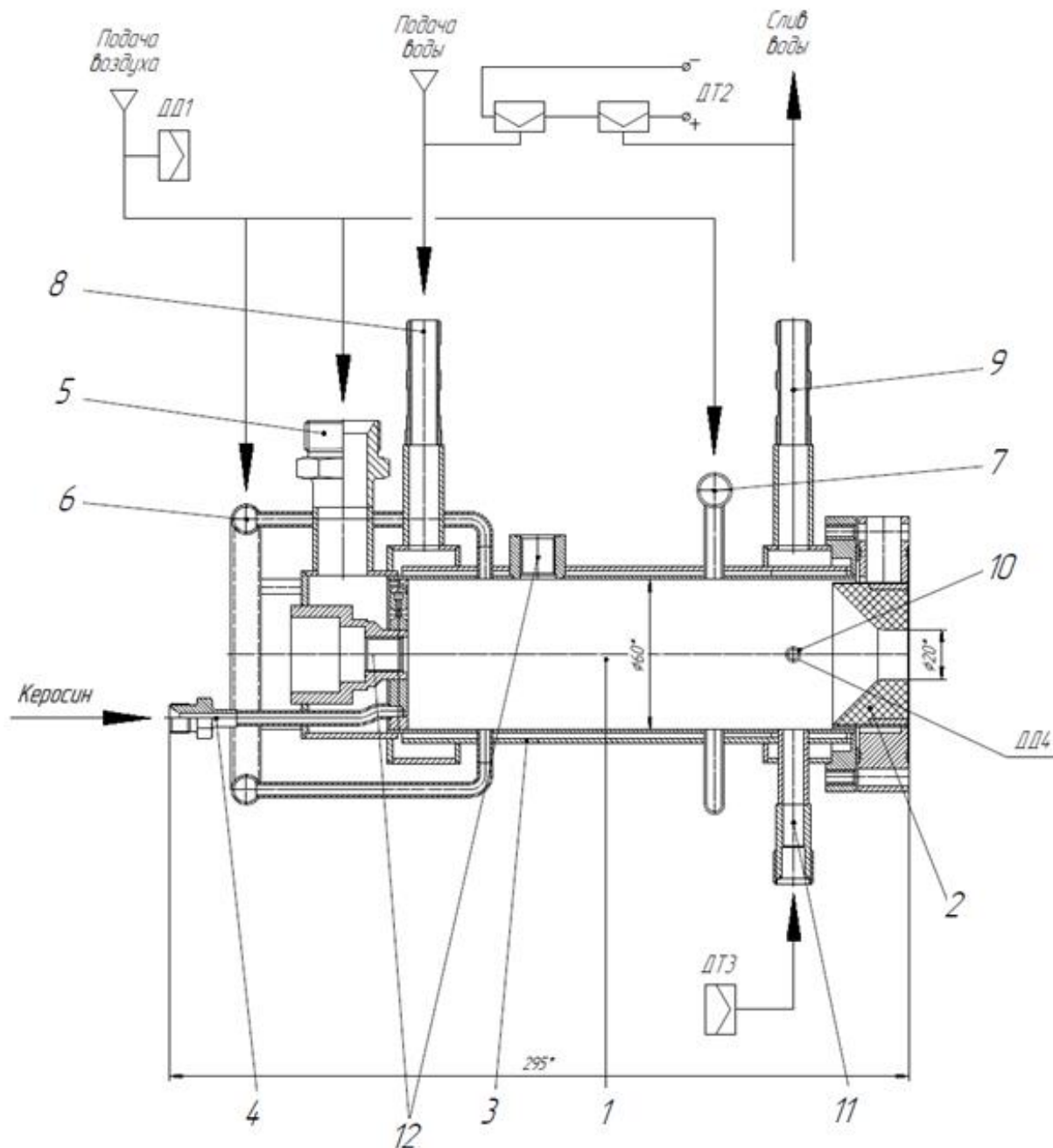


Рисунок 4 – Стендовый модельный газогенератор

1 – камера сгорания; 2 – вкладыш критического сечения; 3 – рубашка охлаждения; 4 – штуцер подвода горючего; 5 – штуцер подвода воздуха; 6 – первый коллектор воздуха; 7 – второй коллектор воздуха; 8 – коллектор подвода охладителя; 9 – коллектор слива охладителя; 10 – вводной штуцер для датчика давления; 11 – вводной штуцер для термопары; 12 – места установки воспламенительных устройств

The diagram illustrates a fuel system for a gas engine. It features two main fuel sources: a 'Воздух' (Air) tank and a 'Керосин' (Kerosene) tank. The air tank feeds into a line with valve ВН1, pressure sensor МН1, control valve КР1, pressure sensor МН2, solenoid valve ПК1, and check valve КО1. The kerosene tank feeds into a line with valve ВН2, pressure sensor МН3, control valve КР2, pressure sensor МН4, and pressure sensor ДД3. Both lines converge at a junction with pressure sensor ДД1 and temperature sensor ДТ1. This junction leads to a complex assembly including a solenoid valve ЗС1, a pressure sensor ЭК4, a pressure sensor РМ1, and a temperature sensor ДТ2. The assembly also includes a 'Слив воды' (Water drain) outlet. The fuel then passes through a series of valves and sensors: КО2, РМ2, ЭК1, and Ж2. A 'Сброс воздуха' (Air release) line with valve КИ7 and valve ВН3 is also shown. The system includes various other components like a pressure sensor ДД2, a pressure sensor ДД4, a temperature sensor ДТ3, and a pressure sensor ДД3. The fuel finally enters the engine through valve Ж1. The engine is shown in a detailed cross-section view.

ДД1 – ДД4 – датчики давления; ДТ1 – ДТ3 – датчики температуры; ВН1 – ВН3 – вентили; КР1 – КР2 – клапаны редукционные; ЭК1 – ЭК3 – электроклапаны; ПК1 – пневмоклапан; КО1 – КО3 – клапаны обратные; КП – клапан предохранительный; ПС – пробка сливная; Ф1 – фильтр; РМ1 – РМ2 – турбинные датчики расхода; ЗС1 – звуковое расходомерное сопло; Ж1 – Ж2 – жиклеры; МН1 – МН4 – манометры; СЗ1 – СЗ2 – свечи зажигания

32

воздухом из бака и через магистраль попадает в камеру сгорания. Давление наддува контролируется при помощи манометра МН4. Необходимый расход горючего задается при помощи жиклера Ж1. Также предусмотрена дублирующая магистраль подачи керосина, предназначенная для двухступенчатой подачи керосина. С целью предотвращения попадания в камеру загрязнений на магистраль подачи горючего установлен фильтр Ф, а для предотвращения заброса давления на магистрали установлены обратные клапаны КО2 и КО3. Камера охлаждается водой, подаваемой по магистралям подачи и слива. Воспламенение топливной смеси осуществляется электроискровыми свечами зажигания С31 и С32.

В процессе проведения эксперимента контролируются и регистрируются следующие параметры:

- давление и температура воздуха в магистрали – датчиками ДД1 и ДТ1,
- давление наддува бака с керосином – датчиком ДД3,
- подогрев охлаждающей жидкости – дифференцированной термопарой ДТ2, схема подключения которой представлена на рисунке 6,
- давление и температура продуктов сгорания измеряются датчиками ДД4 и ДТ3.

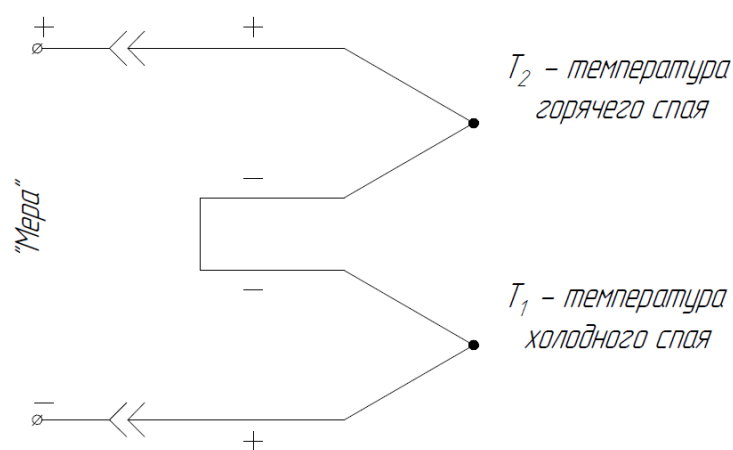


Рисунок 6 – Схема подключения дифференцированной термопары

На рисунке 7 представлена структурная схема регистрации сигналов с датчиков, используемая на испытательном стенде. С датчика сигнал поступает

на промежуточный преобразователь, где происходит его предварительная обработка. Преобразованный сигнал подается на усилитель. С усилителя сигнал поступает на регистратор (регистрирующий орган), тип которого определяется первичным преобразователем. Регистратор связан с ПЭВМ, выступающей в качестве устройства хранения и первичной обработки данных эксперимента.

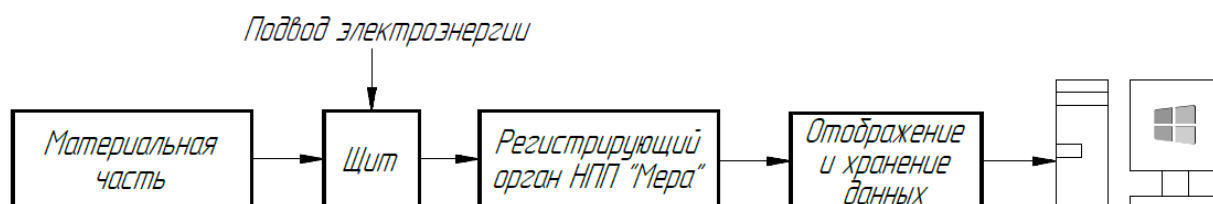


Рисунок 7 – Структурная схема регистрации сигналов с датчика

3.4 Подготовка и проведение эксперимента по оценке пределов воспламенения углеводородного горючего в воздухе

Весь комплекс по подготовке и проведению испытаний, а также процедур по исполнительной части, монтажу и разбору стендового модельного газогенератора осуществляется в соответствии с требованиями технической безопасности и проводится согласно технологическому процессу, представленному в таблице 8.

Таблица 8 – Технологический процесс проведения ОСИ

№ п/п	Операция	Ответственный исполнитель
1	Сборка экспериментальной установки	Начальник участка сборки
2	Запись циклограммы	Оператор пульта управления стендом
3	Монтаж установки на стенд	Механик стендового комплекса
4	Заправка бака и магистралей	Механики стенда
5	Проверка термопар, установка датчиков давления	Монтажники измерительного сектора
6	Объявление готовности «30 минут»	Ответственный инженер пуска
7	Набор давления в магистралях и баке	Механик стенда

№ п/п	Операция	Ответственный исполнитель
8	Объявление готовности «15 минут», эвакуация персонала из стендового комплекса	Ответственный инженер пуска
9	Объявление готовности «5 минут»	Ответственный инженер пуска
10	Объявление готовности «1 минута»	Ответственный инженер пуска
11	Включение системы воспламенения	Ответственный инженер пуска
12	Запуск и работа согласно циклограмме пуска	Оператор пульта управления стендом
13	Команда «отбой», вентиляция стенда, контрольная выдержка 15 минут	Ответственный инженер пуска, оператор пульта управления стендом
14	Разборка и осмотр установки	Механик стенда, ответственный инженер пуска

Отработка типовой циклограммы проведения ОСИ выполняется в определенной последовательности, представленной в таблице 9, и обеспечивается системой управления стендом, включающей блоки проверки электрических цепей, управления процессами, контроля срабатывания стендовой арматуры, системы единого времени.

Таблица 9 – Циклограмма проведения испытаний

№	τ, с	Команда	Режим
1	-5,0	Включение электроклапана ЭК3 подачи воды в рубашку охлаждения	Ручной
2	-3,0	Включение видеокамеры	Ручной
3	0	Включение команды «старт» на регистраторы режимных параметров	Ручной
4	5,0	Включение электроискровой системы воспламенения	Ручной
5	8,0	Включение электроклапана ЭК1 подачи керосина в камеру	Ручной
6	9,0	Включение клапана ПК1 подачи воздуха в камеру	Ручной

№	τ , с	Команда	Режим
7	12,0	Выключение электроискровой системы воспламенения после воспламенения смеси	Ручной по команде
8	39,0	Выключение электроклапана ЭК1 подачи керосина в камеру	Ручной по команде
9	44,0	Выключение клапана ПК1 подачи воздуха в камеру	Ручной по команде
10	49,0	Выключение электроклапана ЭК3 подачи воды в рубашку охлаждения	Ручной по команде
11	49,0	Выключение видеокамеры	Ручной по команде
12	50,0	Команда «стоп»	Ручной

Система измерений стенда позволяет получать, регистрировать и проводить первичную обработку информации об основных режимных параметрах работы модельной установки. С этой целью применяются необходимые первичные преобразователи, устанавливаемые на стендовые магистрали или на камере сгорания модельного ГГ.

В таблице 10 приведены сведения о параметрах используемых датчиков и измерительных приборов, а также предельных основных приведенных погрешностях измерений, определяемых по паспортным данным устройств, входящих в измерительный канал параметра.

Таблица 10 – Параметры используемых датчиков

Обозначение на ПГС	Измеряемый параметр	Размерность	Максимальное значение	Тип датчика	Предельная основная приведенная погрешность, %
PM1	$Q_{охл}$	л/с	1,00	ТДР 11	$\pm 0,4$
PM2	$Q_{Г}$	л/с	0,04	ТДР 4	± 1
ДД1	$p_{в}$	атм	100	ДДВ 100	$\pm 0,5$
ДД3	$p_{б}$	атм	100	ДДВ 100	$\pm 0,5$
ДД4	$p_{к}$	атм	40	Корунд 40	$\pm 0,25$
ДТ1	$T_{в}$	$^{\circ}C$	150	ТСМ	$\pm 0,2$
ДТ2	$T_{охл_диф}$	$^{\circ}C$	700	ТХК	$\pm 0,4$
ДТ3	$T_{К}$	$^{\circ}C$	1800	ТВР	$\pm 0,5$

Примечание: ТДР – турбинный датчик расхода, ДДВ – датчик давления вибросигнальный, Корунд 40 – датчик избыточного давления, ТСМ – термопреобразователь сопротивления, ТХК – термопара из материала хромель-копель, ТВР – термопара из материала вольфрамрений-вольфрамрений.

2.5 Обработка результатов эксперимента и определение пределов воспламенения углеводородного горючего

Испытания проводятся при заданном значении коэффициента избытка окислителя α с использованием набора вкладышей критического сечения площадью $F_{кр}$.

Коэффициент избытка окислителя определяется по следующему выражению:

$$\alpha = \frac{\dot{m}_в}{\dot{m}_{гор} \cdot K_{m0}}, \quad (8)$$

где $\dot{m}_{гор}$ – массовый расход горючего; $\dot{m}_в$ – массовый расход воздуха; K_{m0} – стехиометрическое соотношение.

Для заданного массового расхода воздуха необходимо обеспечить потребное давление подачи. Массовый расход воздуха определяется при помощи расходомерного сопла с использованием формулы сверхзвукового истечения:

$$\dot{m}_в = \mu_c \frac{p_в F_{кр}}{\sqrt{RT_в}} \sqrt{k} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}}, \quad (9)$$

где $\mu_c = 0,95...0,98$ – коэффициент расхода сопла, определяемый точностью изготовления и его диаметром; $p_в$ – давление воздуха перед расходомерным соплом; $T_в$ – температура воздуха перед соплом; k – показатель адиабаты воздуха; R – газовая постоянная воздуха.

Расход горючего Q_r регистрируется при помощи турбинного расходомера РМ2. Для ограничения расхода горючего в магистрали подачи керосина установлен жиклер, площадь отверстия которого определяется следующей формулой:

$$f_{\text{отв}} = \frac{0,91 \cdot \dot{m}_{\text{гор}}}{\sqrt{p_6 - p_k}}, \quad (10)$$

где $\Delta p \geq 0,2 \text{ МПа}$ – перепад давления на жиклере, обеспечение которого необходимо для обеспечения необходимого качества распыливания и уменьшения влияния давления продуктов сгорания на расход через жиклёр; p_k – давление в камере; p_6 – давление наддува в баке с керосином.

Коэффициент избытка окислителя рассчитывается по следующей формуле:

$$\alpha = \frac{\dot{m}_b}{K_{m0} Q_{\Gamma} \rho_{\text{гор}}}, \quad (11)$$

где $\rho_{\text{гор}} = 780 \text{ кг/м}^3$ – плотность керосина.

Скорость потока топливной смеси на входе в камеру сгорания определяется по следующей формуле:

$$v_k = \frac{\dot{m}_{\Sigma}}{\rho_{\text{см}} F_{\text{к}}}, \quad (12)$$

где $\dot{m}_{\Sigma} = \dot{m}_b + \dot{m}_{\text{гор}}$ – суммарный массовый расход топлива; $F_{\text{к}}$ – площадь поперечного сечения камеры сгорания; $\rho_{\text{см}} = \frac{p_k}{R_{\text{см}} \cdot T_k}$ – плотность топливной смеси; $R_{\text{см}}$ – газовая постоянная топливной смеси; T_k – температура топливной смеси на входе в камеру сгорания.

Для определения тепловых потерь необходимо рассчитать подогрев охлаждающей жидкости. Расход охладителя регистрируется при помощи турбинного расходомера РМ1.

Подогрев жидкости можно определить аналитическим методом по следующей формуле:

$$\Delta T_{\text{теор}} = \frac{q_{\Sigma} F_{\text{бок}}}{c_{p_{\text{охл}}} \dot{m}_{\text{охл}}}, \quad (13)$$

где q_{Σ} – суммарный тепловой поток в камере; $F_{\text{бок}}$ – площадь теплоотдающей поверхности тракта; $c_{p_охл}$ – удельная изобарная теплоемкость жидкости; $\dot{m}_{\text{охл}}$ – массовый расход охладителя, регистрируемый при помощи турбинного расходомера РМ1.

Для определения температуры внутренней стенки необходимо решить систему уравнений.

1) Уравнение Ньютона-Рихмана для горячей стенки:

$$q_{\Sigma} = \alpha_{\Gamma} (T_{\text{к}} - T_{w_{\Gamma}}), \quad (14)$$

где α_{Γ} – коэффициент теплоотдачи горячего газа; $T_{w_{\Gamma}}$ – температура стенки камеры со стороны горячих газов.

Чтобы определить коэффициент теплоотдачи горячего газа можно использовать критериальную формулу Гухмана-Илюхина [6]:

$$\alpha_{\Gamma} = 0,0206 c_{p_w} \mu_w^{0,18} \frac{\dot{m}_{\Sigma}}{D^{1,82}} \left(\frac{T_{\text{к}}}{T_{w_{\Gamma}}} \right)^{0,35}, \quad (15)$$

где c_{p_w}, μ_w – теплоёмкость и вязкость продуктов сгорания при температуре стенки со стороны горячих газов, $D = 0,06$ м – диаметр камеры сгорания.

2) Уравнение Ньютона-Рихмана для стенки со стороны охлаждающей жидкости:

$$q_{\Sigma} = \alpha_{\text{ж}} (T_{w_{\text{х}}} - T_{\text{ж}}), \quad (16)$$

где $\alpha_{\text{ж}}$ – коэффициент теплоотдачи хладоагента; $T_{w_{\text{х}}}$ – температура стенки камеры со стороны охлаждающей жидкости; $T_{\text{ж}}$ – температура охлаждающей жидкости.

Коэффициент теплоотдачи хладоагента определяется по формуле [6]:

$$\alpha_{\text{ж}} = 0,021 \lambda_{\text{ж}}^{0,57} \frac{c_{\text{ж}}^{0,43}}{\mu_{\text{ж}}^{0,37}} \frac{(\dot{m}_{\text{ж}}/F_{\text{ж}})^{0,8}}{d_{\text{ж}}^{0,2}}, \quad (17)$$

где $\lambda_{\text{ж}}, \mu_{\text{ж}}, c_{\text{ж}}$ – теплопроводность, вязкость и теплоёмкость жидкости, $\dot{m}_{\text{ж}}$ – секундный расход хладоагента через рубашку охлаждения, $F_{\text{ж}}$ – площадь

поперечного сечения охлаждающего тракта, $d_{\text{э}} = 4F_{\text{ж}}/\Pi$ - эквивалентный диаметр поперечного сечения канала, Π – полный (смоченный) периметр сечения независимо от того, какая часть этого периметра участвует в теплообмене.

3) Уравнение Фурье:

$$q_{\Sigma} = \frac{\lambda_w}{\delta_w} (T_{w_{-\Gamma}} - T_{w_{-X}}), \quad (18)$$

где λ_w - коэффициент теплопроводности материала стенки камеры; δ_w - толщина стенки камеры.

Реальный подогрев охлаждающей жидкости $\Delta T_{\text{охл_диф}}$ регистрируется при помощи дифференцированной термопары ДТ2.

Тепловые потери можно оценить по следующей зависимости:

$$\chi = 1 - \frac{\Delta T_{\text{охл_диф}}}{\Delta T_{\text{теор}}}. \quad (19)$$

Для оценки эффективности рабочего процесса может использоваться коэффициент расходного комплекса, равный отношению экспериментального $\beta_{\text{эксп}}$ к теоретическому $\beta_{\text{теор}}$ значению:

$$\Phi_{\beta} = \frac{\beta_{\text{эксп}}}{\beta_{\text{теор}}}. \quad (20)$$

Экспериментальное значение расходного комплекса определяется по формуле:

$$\beta_{\text{эксп}} = \frac{P_{\text{к}}}{F_{\text{кр}} \dot{m}_{\Sigma}}. \quad (21)$$

Теоретическое значение расходного комплекса определяется по данным эксперимента ($p_{\text{к}}$, α) при помощи программы «Terra» или по следующей зависимости:

$$\beta_{\text{теор}} = \frac{\sqrt{R_{\text{см}} T_{\text{к}}}}{A(k)} = \frac{\sqrt{R_{\text{см}} T_{\text{к}}}}{\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{1}{k-1}} \sqrt{\frac{2k}{k+1}}}.$$
(22)

Данный эксперимент проводится при фиксированных соотношениях компонентов топливной смеси (значениях α) с использованием набора вкладышей критического сечения.

Результаты расчетов должны быть представлены в таблицах 11, 12, 13.

Таблица 11 – Результаты расчета при $\alpha = 0,9$

$d_{кр}$							
v_K , м/с							
φ_β							

Таблица 12 – Результаты расчета при $\alpha = 1,0$

$d_{кр}$							
v_K , м/с							
φ_β							

Таблица 13 – Результаты расчета при $\alpha = 1,1$

$d_{кр}$							
v_K , м/с							
φ_β							

2.6 Контрольные вопросы по лабораторной работе №2

1. В чем разница между границами и пределами воспламенения?
2. От чего зависят концентрационные пределы воспламенения?
3. В чем заключается физическая природа существования концентрационных пределов распространения пламени?
4. Каким образом изменятся границы воспламенения двухфазной смеси при увеличении диаметра капель горючего?

5. Из каких основных узлов состоит стендовый модельный газогенератор? Как осуществляется подача компонентов в камеру сгорания?
6. Сколько каналов регистрации задействовано в установке? Какие это каналы?
7. Какое горючее используется в лабораторной установке? Какие свойства горючего имеют значение для данной работы?
8. В чем заключается подготовка к огневым испытаниям?
9. Из каких этапов состоит циклограмма испытаний?
10. Опишите порядок обработки результатов эксперимента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сухов А.В., Парыгин К.Э., Сергеев А.В. и пр. Топлива жидкостных ракетных двигателей: учеб. пособие. - М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. 37 с.
2. Раушенбах Б.В., Белый С.А., Беспалов И.В. и пр. Физические основы рабочего процесса в камерах сгорания воздушно-реактивных двигателей. – М.: Машиностроение, 1964. 526 с.
3. Яновский Л.С., Харин А.А., Бабкин В.И. Основы химмотологии. – М.-Берлин: Директ-Медиа, 2016. 482 с.
4. Дубовкин Н.Ф., Маланичева В.Г., Массур Ю.П. и пр. Физико-химические и эксплуатационные свойства реактивных топлив: Справочник. – М.: Химия, 1985. 240 с.
5. Зельдович Я.Б., Баренблатт Г.И., Либрович Б.Б., Махвиладзе Г.М. Математическая теория горения и взрыва. – М.: Наука, 1980. 478 с.
6. Померанцев В.В., Арефьев К.М., Ахмедов Д.Б. Основы практической теории горения: Учебное пособие. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986. 312 с.
7. Добровольский М.В. Жидкостные ракетные двигатели. Основы проектирования. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2022. 472 с.