

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)»

на правах рукописи



Ташев Виталий Петрович

**УГЛЕВОДОРОДНОЕ ГОРЮЧЕЕ НА ОСНОВЕ КЕРОСИНА С
ПРИСАДКАМИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ
ЭФФЕКТИВНОСТИ ЖРД**

Специальность 05.07.05

«Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных
аппаратов»

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Козлов Александр Александрович

Москва - 2014

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. ОБЗОР РАБОТ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ПРИСАДОК К ГОРЮЧЕМУ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ	12
1.1 Использование растворов высокомолекулярных полимеров для повышения энергетической эффективности ЖРД	12
1.2 Исследовательские работы по созданию гиперголического топлива	22
1.3 Выводы по главе.....	30
ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РАСТВОРОВ ПИБ В КЕРОСИНЕ	33
2.1 Объекты исследования.....	33
2.2 Методы проведения исследований.....	34
2.3 Обобщенные результаты исследований.....	36
2.3.1 Результаты определения показателей качества по ТУ 38.001244-81	36
2.3.2 Результаты испытаний на сохраняемость	41
2.3.3 Результаты измерения давления насыщенных паров.....	41
2.3.4 Результаты определения поверхностного натяжения	42
2.3.5 Результаты определения теплотехнических характеристик	42
2.3.6 Результаты хромато-масс-спектрометрического исследования.	43
2.4 Выводы по главе.....	45
ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДОБАВКИ ПИБ НА ПОЛНОТУ СГОРАНИЯ ТОПЛИВА	47
3.1 Исследование влияния добавки полиизобутилена к керосину на мелкость распыливания	47
3.1.1 Описание установки для исследования распыла	50
3.1.2 Лазерный измеритель дисперсности распыла капель	52
3.1.3 Методика проведения испытаний и результаты измерений	55
3.2 Исследование влияния добавки полиизобутилена к керосину на полноту сгорания топлива.....	65
3.2.1 Описание огневого стенда для испытаний ЖРДМТ	65
3.2.2 Описание конструкции смесительной головки	72
3.2.3 Результаты огневых экспериментов и теоретических расчетов	76

3.3 Выводы по главе.....	86
ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ САМОВОСПЛАМЕНЕНИЯ КЕРОСИНА С ПИРОФОРНЫМИ ДОБАВКАМИ.....	87
4.1 Результаты термодинамического расчета горения и истечения топлива ВПВ – керосин с пирофорными добавками.....	92
4.2 Лабораторные исследования по самовоспламенению топливной пары керосин-ВПВ.....	96
4.3 Результаты огневых испытаний РД МТ на самовоспламеняющихся экологически чистых компонентах.....	101
4.4 Выводы по главе.....	104
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	106
Список сокращений.....	108
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	109

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследований. Одним из главных и весьма сложных вопросов при проектировании ракет-носителей (РН) является выбор компонентов топлива (КТ). Несмотря на обилие химических веществ, пригодных для использования в качестве компонентов ракетного топлива (КРТ), далеко не все из них нашли применение в ракетной технике [1]. Кроме высокой энергетики, КРТ должны отвечать множеству разнообразных, порой противоречивых, экономических, эксплуатационных, экологических и иных требований [2].

Экологически чистые и высокоэнергетические топливные пары, такие как «жидкий кислород – жидкий водород» (ЖК–ЖВ), «жидкий кислород – сжиженный природный газ» (ЖК–СПГ) наиболее перспективные топлива для будущего применения. Однако криогенные компоненты ЖВ и СПГ пока еще весьма дороги и их эксплуатационные показатели не высоки. В реальных условиях ракетчики предпочитают использовать компоненты безопасные и простые в эксплуатации, а также те, для которых уже налажена инфраструктура. Из-за высокой токсичности и дороговизны производство топлива «гептил – амил» прекращено и не рассматривается при проектировании перспективных РН. Основным углеводородным горючим для ракетных двигателей на сегодняшний день остается керосин.

Как ракетное горючее, в паре с ЖК керосин широко используется для одной или нескольких ступеней многих РН: все семейство Р-7 (СССР/Россия), «Зенит» (СССР/Украина), «Энергия» (СССР), Saturn-I/IV/V, Delta I-III, Atlas (США), N1, N2, H1 (Япония). Китай также планирует использование керосина в перспективном семействе РН модульной конструкции [3].

На первый взгляд топливо «керосин – ЖК» достигло высокой степени проработки, и дальнейших перспектив повышения энергетических возможностей ЖРД на этих компонентах не просматривается. Тем не менее в 1970–1980-х годах химиками было найдено решение для увеличения энергетических показателей керосина. Было разработано и передано в эксплуатацию несколько видов

синтетического горючего. Одним из таких горючих был «Синтин» - синтетическое высокоэнергетическое углеводородное ракетное топливо. Почти единственный вид применения — использование в «синтиновой» модификации разгонного блока «ДМ», для увеличения полезной нагрузки. Также синтин использовался на ракете-носителе «Союз-У2» (его использование позволило увеличить полезную нагрузку на 200 кг) [4]. В отличие от большинства других вариантов высокоэффективного углеводородного топлива, синтин является химически устойчивым и может храниться неограниченно долго. Однако, такое горючее отличается крайней сложностью технологии получения, поэтому дорого в использовании и практически не применяется. Кроме того, после длительного исследования была обнаружена повышенная токсичность этого горючего. Производство синтина было прекращено в 1996 году.

Еще одной альтернативой классическому керосину является УВГ, известное под названием «боктан». Это горючее было разработано в результате совместных усилий Института нефтехимического синтеза имени А.В.Топчиева и Всесоюзного НИИ органического синтеза. Новое горючее было близко по своей структуре к синтину, но более предпочтительное по показателям токсичности [5]. Перспективность применения горючего боктан оценили такие организации как НПО «Энергомаш», РКК «Энергия», однако из-за отсутствия производственной базы в настоящее время боктан не используется. Совместно с ВНИИОС ведется разработка технического проекта создания на промышленной основе этого нового горючего.

Проводимые в начале 90-х годов прошлого столетия испытания в КБХМ нового горючего, разработанного ГИПХ под названием «Омар», показали сильное закоксовывание продуктами сгорания смесительных элементов двигателя и невозможность повторных запусков [6]. Попытки работы в импульсном режиме иногда приводили к взрывам в полости КС. В итоге стало понятно, что «Омар» не годится для применения в ДМТ и двигателях многократного включения. Кроме того, показатели токсичности нового горючего не обнадеживали. По некоторым

параметрам ПДК показывали 2-й класс (как у АТ). В 1995 году работы по «Омару» были остановлены.

Специалистами Научно-производственного объединения «Энергомаш» ведется разработка нового горючего под названием «ацетам». Самого большого эффекта от использования этого горючего можно достичь, применяя его на разгонных блоках. Баллистические расчёты показали, что для ракеты-носителя "Союз-2.1Б" замена кислородно-керосинового двигателя разгонного блока на кислородно-ацетамовый позволит увеличить массу полезной нагрузки на 30-40% [7].

При сложившейся в последние годы частоте пусков для спутников одной и той же массы можно снизить количество пусков ракет-носителей на 3-5 ежегодно. Таким образом, применение ацетама не только существенно повышает энергетику существующих средств выведения, но и даёт большую экономию.

Поскольку двигатели на кислородно-ацетамовом топливе близки к кислородно-керосиновым, можно на базе имеющихся российских ракет-носителей создать модернизированные летательные аппараты, обладающие энергетическими возможностями ракет-носителей с кислородно-водородными разгонными блоками, но при этом более простые в эксплуатации и значительно менее затратные по стоимости пусковых услуг.

Помимо топлива ацетама в настоящее время в НПО Энергомаш разрабатывается еще одно перспективное направление, это добавка в кислородно-керосиновое топливо присадок на основе полиизобутилена [8,30,32-40]. Присутствие в компоненте топлива ЖРД полимерной присадки позволяет уменьшить как потребляемую мощность турбины ТНА из-за повышения КПД и улучшения кавитационных характеристик насосов агрегатов подачи, так и потребляемую мощность турбины за счет уменьшения потерь давления в тракте регенеративного охлаждения камеры двигателя. При этом в двигателях с дожиганием генераторного газа достигается снижение удельной мощности турбины, что повышает надежность и обеспечивает возможность форсирования

по тяге. В двигателях без дожигания уменьшается расход рабочего тела на привод турбины, что улучшает проектно-баллистические параметры РН в целом.

Но очевидные преимущества свойств компонента ракетного топлива с полимерной присадкой, позволяющих снижать гидропотери в трактах ЖРД с одной стороны и такие явления, сопровождающие течение разбавленных полимерных растворов, как снижение конвективного теплообмена и ухудшение распыления жидкости в форсунках с другой стороны, составляют противоречие и препятствуют практическому применению полимерных присадок в РКТ. Однако это противоречие может быть частично снято, если принять во внимание свойство значительного ослабления влияния растворенного полимера на характеристики турбулентного течения в протяженных каналах маленького сечения, при больших числах Рейнольдса и высокой температуре жидкости – так называемую деградацию полимерного раствора. В гидравлических трактах ЖРД (центробежные насосы, тракты регенеративного охлаждения, форсунки и др.) происходят различные физические процессы: турбулентные течения в каналах разной геометрии и кинематики течения, интенсивный конвективный теплообмен, кавитация, процессы распыления и испарения жидкости и др. Физические параметры среды в этих трактах изменяются в очень широких пределах. По мере продвижения компонента топлива с полимерной присадкой от входа в двигатель до смесительной головки КС, из-за гидродинамического и теплового воздействия происходит деградация специфических свойств разбавленных полимерных растворов, в том числе вышеупомянутых свойств, негативно влияющих на работу ЖРД.

Таким образом, по-прежнему остается невыясненным вопрос о влиянии полимерной добавки на полноту сгорания топлива. Это исследование на полноразмерных ЖРД хотя и не требует изготовления новой материальной части, однако является сложным и затратным процессом аналогично огневым испытаниям двигателя. Поэтому исследование влияния полимерных добавок к керосину на полноту сгорания топлива целесообразно и менее затратно проводить на ЖРД МТ с использованием вытеснительной системы подачи топлива.

Абсолютно новым и перспективным направлением в повышении энергетики ЖРД с помощью присадок к горючему является разработка новых экологически чистых самовоспламеняющихся топлив.

Актуальность такого исследования обусловлена тем, что использование новых самовоспламеняющихся топливных пар позволит получить ряд преимуществ по сравнению с традиционными самовоспламеняющимися компонентами. Это - экологичность, простота использования, а также упрощение конструкции системы воспламенения и, как следствие, повышение надежности двигателя в целом.

Постепенный переход на экологически чистые компоненты топлива и отказ от токсичных, таких как АТ+НДМГ несомненно выдвигает ракетное двигателестроение на новый уровень. Однако, в связи с этим переходом возникает множество трудностей для достижения того энергетического уровня и надежности двигателей, в которых используются самовоспламеняющиеся топлива, так как среди экологически чистых топливных пар нет самовоспламеняющихся. Исследование и разработка такого топлива может составить серьезную конкуренцию традиционно используемым компонентам.

Анализируя возможные пути повышения энергетической эффективности ЖРД перспективными топливами, можно сделать вывод, что использование различных присадок к традиционному горючему такому, как керосин, позволит достичь желаемого эффекта с минимальными затратами.

Целью настоящей диссертационной работы является исследование возможности использования модифицированного углеводородного горючего на основе керосина с различными присадками для повышения энергетической эффективности ЖРД.

Для достижения поставленной цели в работе сформулированы и решены **следующие задачи:**

1) Выполнен аналитический обзор состояния проблемы по использованию полимерных и пиррофорных добавок к керосину для повышения энергоэффективности ракетных двигателей;

2) Проведено комплексное исследование по определению физико-химических свойств растворов с различной концентрацией добавки ПИБ и соответствию их нормам по ТУ 38.001244-81;

3) По результатам гидравлических испытаний произведена оценка степени влияния полимерной добавки к керосину на эффективность распыливания центробежными форсунками;

4) Выполнено экспериментальное исследование по определению полноты сгорания кислородно-керосинового топлива с присадкой ПИБ на экспериментальном РД МТ. Выполнена оценка степени влияния добавки на тепловое состояние двигателя.

5) Рассмотрена возможность использования нового самовоспламеняющегося топлива. Произведены термодинамические расчеты для оценки степени экологичности, а также влияния добавки на удельный импульс. Проведены экспериментальные исследования по самовоспламенению керосина с энергетическими добавками с различными окислителями в лабораторных условиях и на реальном РД МТ.

Научная новизна исследования. Проведено комплексное исследование свойств керосина с различной концентрацией добавки ПИБ. Получены данные по влиянию полимера на распыл керосина центробежными форсунками с разной геометрической характеристикой. Проведена оценка степени влияния присадки ПИБ на полноту сгорания топлива в ЖРД МТ, а также выявлена зависимость тепловых потоков в стенку КС при использовании внутреннего (завесного) охлаждения стенки керосином с присадкой полимера.

Проведено исследование новой самовоспламеняющейся топливной пары керосин+ВПВ (или газообразный кислород) с пирофорными добавками. Получены данные по задержке и границе надежного воспламенения в зависимости от концентрации добавки в керосине.

Практической значимостью работы являются полученные экспериментальные зависимости качества распыла, а также полноты сгорания от концентрации добавки полимера, которые позволят скорректировать методику

расчета центробежных форсунок и дать рекомендации по границам применимости керосина с полимерной присадкой в ЖРД МТ. Полученные зависимости характера влияния полимерной добавки на тепловое состояние двигателя помогут оценить возможность использования керосина с добавкой ПИБ для завесного охлаждения в ракетных двигателях малых тяг.

Использование новой самовоспламеняющейся топливной пары из экологически чистых компонентов позволит отказаться от системы воспламенения и достичь более высоких эксплуатационных показателей. Полученные данные по задержке и определению зависимости воспламенения от концентрации пирофорной добавки являются основой для будущих исследований в данном направлении. Это дает более полное понимание механизма самовоспламенения и позволяет решать дальнейшие задачи по разработке систем смешения и воспламенения в ЖРД.

Апробация результатов исследования. Основные результаты исследований, проведенных в работе докладывались и обсуждались на:

- 10-й Международной конференции «Авиация и космонавтика – 2011», Москва, 2011г.,
- Международной молодежной научной конференции «XX Туполевские чтения», Казань, 2012г.,
- Всероссийской молодежной научно-технической конференции «КОСМОС 2012», Самара, 2012г.,
- 4-й Общероссийской молодежной научно-технической конференции «Молодежь. Техника. Космос.» Санкт-Петербург, 2012г.,
- 8-й международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия 2013», Иваново, 2013г.

Публикации. По результатам научных исследований, изложенных в диссертации, опубликовано 5 печатных работ, из которых 2 в рецензируемых научных журналах, рекомендуемых ВАК Министерства образования и науки РФ.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав с выводами, заключения и списка использованных источников из 71 наименования.

Содержание работы изложено на 115 страницах и иллюстрировано 40 рисунками и 25 таблицами.

ГЛАВА 1. ОБЗОР РАБОТ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ПРИСАДОК К ГОРЮЧЕМУ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ

1.1 Использование растворов высокомолекулярных полимеров для повышения энергетической эффективности ЖРД

Модернизация ЖРД чаще всего направлена на повышение удельного импульса тяги или на форсирование двигателя по тяге, что позволяет увеличить массу выводимого ПГ. Повышение удельного импульса обеспечивается организацией более совершенного рабочего процесса в камере и применением компонентов топлива, имеющих большую теплопроизводительность. В качестве примера можно привести кислородно-керосиновые двигатели 14Д21, 14Д22 (модернизация двигателей 11Д511, 11Д512) для блоков А – Д РН серии «Союз», в которых новая смесительная головка с однокомпонентными форсунками за счет улучшения смесеобразования в КС позволила повысить удельный импульс тяги на 4,6 и 6,2 с соответственно [37]. Использование нового синтетического углеводородного горючего «синтин» в двигателе 11Д511ПФ (модернизация 11Д511) повысила удельный импульс тяги на 6,5 с. Форсирование ЖРД по тяге достигается увеличением давления в КС и секундного расхода топлива через камеру [3]. Типичным примером модернизации ЖРД в этом направлении является форсирование двигателя первой ступени РН «Протон» на высококипящих компонентах топлива АТ и НДМГ [30,37]. В исходном варианте этот двигатель (РД253, 1965 г) имел давление в КС $p_k = 150 \text{ кгс/см}^2$. С целью увеличения массы ПГ, на базе двигателя РД253 был создан двигатель РД275 (14Д14), у которого давление в КС составило $p_k = 160,5 \text{ кгс/см}^2$, что позволило повысить тягу на 7,7 %. Применение двигателя РД275 в РН «Протон» увеличило массу ПГ, выводимого на низкую околоземную орбиту (НОО) на 600 кг. В свою очередь форсирование по тяге двигателя РД275, который получил индекс РД276 (14Д14М), на 5,3 % вследствие повышения давления в КС до $p_k = 168,5 \text{ кгс/см}^2$ позволило увеличить массу ПГ, выводимого на геостационарную орбиту (ГСО) на 150 кг. При форсировании ЖРД по тяге возрастают требуемые давления подачи компонентов топлива и окружные скорости ротора ТНА. Для увеличения

мощности турбины ТНА приходится повышать температуру генераторного газа на входе в турбину и(или) перепад давления на турбине в двигателях с дожиганием, а в двигателях «открытой схемы» повышать либо температуру, либо расход генераторного газа через турбину. Таким образом, повышается энергонапряженность агрегатов системы подачи двигателя, в первую очередь ТНА и газогенератора. За все время существования ракетно-космической техники, в результате непрерывного ее развития, характеристики и параметры агрегатов системы подачи приблизились к предельно высокому уровню. Чрезмерный рост энергонапряженности приводит к недопустимым динамическим нагрузкам элементов конструкции двигателя (следовательно, повышение уровня вибраций и снижение усталостной прочности), снижению стойкости к возгоранию в газовых трактах и к появлению других трудностей. Поэтому прогресс в области ракетного двигателестроения одновременно идет в двух противоположных направлениях. Вместе с непрерывным ростом тяги ЖРД проводятся научно-конструкторские мероприятия, направленные на повышение энергетической эффективности ЖРД, то есть на поиск и реализацию тех «внутренних резервов», которые позволят сохранить в допустимых пределах вышеупомянутые параметры двигателя, определяющие его работоспособность. Основным объектом, на который направлены эти мероприятия, является ТНА, так как именно на этот агрегат приходится по разным источникам от 50 до 70 % отказов и аварий при отработке двигателя [34,35]. В отраслевых научных публикациях имеется достаточно подробный анализ этой ситуации и сформулированы направления дальнейшего повышения энергетической эффективности ЖРД. Одним из этих направлений является снижение энергонапряженности агрегатов системы подачи за счет улучшения экономичности турбонасосных агрегатов и кавитационных характеристик насосов подачи топлива. Однако запас технических мероприятий в этих направлениях практически иссяк. Достигнутый к настоящему времени уровень КПД в насосах агрегатов подачи ЖРД достаточно высок. Что касается повышения антикавитационных качеств, то в одних случаях это приводит к уменьшению КПД

и увеличению массы насосов; в других же случаях требуется усложнение конструкции насосного агрегата и даже всей системы подачи, что тоже может приводить к увеличению массы. Дальнейшее улучшение экономичности и кавитационных характеристик насосов системы подачи представляет весьма трудоемкую и затратною задачу, требующую применения сложных расчетов трехмерных потоков жидкости и последующей экспериментальной отработки узлов и агрегатов на модельных и натуральных установках.

Выходом из сложившейся ситуации может быть применение модернизированного горючего на основе керосина с добавкой полимера.

Использование высокомолекулярных полимеров в качестве агентов, снижающих гидравлическое сопротивление, берет свое начало еще с середины прошлого столетия. В 1948 г. английский химик Б.Томс установил, что при течении разбавленного раствора полиметилметакрилата в монохлорбензоле трение между турбулентным потоком и трубопроводом значительно снижается [9]. Открытие этого эффекта дало импульс для исследований в области гидродинамики и реологии разбавленных растворов полимеров. К настоящему времени найдено и изучено большое количество присадок высокомолекулярных полимеров (ВМП), снижающих гидравлическое сопротивление в турбулентном потоке жидкостей различного рода, применение которых позволяет решать множество проблем, связанных с энергосбережением.

Практически все полимеры, обладающие нужной растворимостью и достаточно высокой молекулярной массой (более $2 \cdot 10^6$) способны снижать гидравлическое сопротивление. К настоящему времени накоплен большой опытный материал по исследованию водных растворов таких полимеров как полиэтиленоксид (ПЭО) и полиакриламид (ПАА). Из-за простоты их использования, а также высокой гидродинамической эффективности, эти полимеры нашли широкое практическое применение в разных отраслях промышленности. В работе [10] представлена возможность использования эффекта Томса для снижения гидродинамических шумов и уменьшения лобового сопротивления движению подводных и надводных объектов.

Использование полимерной присадки в воде при тушении пожаров делает струю более устойчивой к разрушению и увеличивают ее дальность [11]. Водорастворимые полимеры также применяются при разрушении горных пород [12,13] и для гидравлического размыва донных отложений в нефтяных резервуарах [14].

В медицине давно обратили внимание на сходство реологических свойств крови и разбавленных растворов полимеров. Опыты на экспериментальных животных показали, что при внутривенном введении растворов синтетического полиэтиленоксида марки WSR-301 уменьшается артериальное давление и увеличивается минутный объем кровообращения без увеличения частоты сердцебиения [16,17].

Не меньший интерес представляют собой полимеры, растворимые в углеводородных жидкостях. В последние десятилетия их активно изучают, и они все больше находят применение у нефтеперекачивающих компаний, т.к. их использование позволяет достичь ощутимого снижения энергозатрат на транспорт нефти [18-20].

Еще в 1967 - 1969 гг. отечественные исследователи, а также ученые других стран показали высокую эффективность высокомолекулярного полиизобутилена (ПИБ) в качестве агента, снижающего сопротивление при течении нефти и нефтепродуктов. Добавление небольшого количества (0,01 до 0,05% (масс.)) этого полимера турбулентное трение снижалось на 40 - 70% [19]. Это позволяет увеличить пропускную способность магистральных трубопроводов без изменения рабочего давления на перекачивающих насосных станциях или же понизить рабочее давление, сохраняя заданный расход.

Компания «ConocoPhillips», эксплуатирующая Трансаляскинский магистральный нефтепровод в 1979 году применила полимерную присадку CDR-101 [21], впрыскивание которой привело к увеличению суточной пропускной способности нефтепровода и позволило сократить число насосных станций с проектных 12 до 11. В дальнейшем была разработана новая антитурбулентная присадка (АТП) CDR-102, использование которой на нефтепроводе в штате

Техас позволило получить 20%-е снижение гидродинамического сопротивления. В настоящее время почти четверть всей сырой нефти, перекачиваемой по трубопроводам США, содержат АТП, а география их применения включает также нефтеперерабатывающие регионы Мексики, Венесуэлы, Норвегии и страны Ближнего Востока [22,23].

В нашей стране впервые АТП была применена в 1991 году на магистральном трубопроводе Александровское - Анжеро-Судженск [24,25]. Добавка ВАОЛ, представляла собой 10%-й раствор высших сополимеров α -олефинов в гептане. Эффект снижения гидродинамического сопротивления от использования присадки составил 21%, при содержании полимера в потоке всего 40 г/м³. При использовании той же присадки, полученной по усовершенствованной технологии, на нефтепроводе Тихорецк - Новороссийск в 1993 году, сопротивление было снижено на 23% при концентрации полимера 7 г/м³ [26,27]. Это показало, что отечественная антитурбулентная присадка ВАОЛ не уступает зарубежным аналогам. К достоинствам этой присадки также следует отнести отсутствие негативных последствий на процессы нефтепереработки при ее использовании в концентрации не превышающей 100 г/м³. В последние годы вместо высоковязких присадок растворного типа все чаще используют полимерные суспензии в маловязкой дисперсионной среде [28,29], обладающие рядом преимуществ. Основными достоинствами АТП нового поколения является более высокое (в три-четыре раза) содержание в них активного вещества (полимера) и значительно меньшая вязкость, что существенно облегчает технологический процесс их ввода в магистральный трубопровод.

Приведенные примеры практического использования полимеров для гашения турбулентности свидетельствуют о высоком прикладном потенциале эффекта снижения гидродинамического сопротивления. Так АТП, растворимые в углеводородах, нашли свое применение и в ракетно-космической отрасли в качестве добавки к компонентам топлива, снижающей гидравлическое сопротивление в трактах подачи ЖРД.

В конце 80-х годов в НПО Энергомаш начали проводить исследования, которые показали, что применение модифицированных компонентов ракетного топлива с улучшенной реологией на основе высокомолекулярных присадок позволяют добиться ощутимого повышения энергетической эффективности эксплуатируемых ЖРД и РН для увеличения массы полезного груза [30,32-40]. Положительный эффект заключается в придании компоненту жидкого ракетного топлива свойства лучшей текучести в гидравлических трактах системы подачи ЖРД. Это реализуется путём введения в высококипящие КЖРТ микроскопического количества (сотые доли процента от массы КЖРТ) высокомолекулярной добавки. Такой присадкой к керосину для кислородно-керосиновых ЖРД является высокомолекулярный полиизобутилен (ПИБ) [31].

В [32] представлены результаты анализа возможностей повышения энергетических характеристик кислородно-керосиновых ЖРД и тяговооружённости ракет-носителей семейства «Союз». За счёт применения в них модифицированного ракетного горючего – керосина с добавкой растворимого высокомолекулярного полиизобутилена происходит существенное уменьшение гидравлических потерь на трение в системе подачи горючего в камеру ЖРД. В работе была сделана оценка уменьшения запаса рабочего тела на привод турбины ТНА применительно к маршевым двигателям 14Д21, 14Д22, 11Д55 РН «Союз», а также рассмотрена возможность и эффективность форсирования двигателей по тяге с соответствующим увеличением удельного импульса на земле, без доработки их конструкции.

Применение присадки ПИБ для экономии рабочего тела на привод турбины ТНА на борту РН является наиболее простым вариантом получения прироста массы выводимого ПГ. Расчетные значения экономии составляют: перекиси водорода ~ 450 кг (двигатели 14Д21 и 14Д22) и компонентов топлива – кислорода и керосина ~ 76 кг (двигатель 11Д55). Использование ПИБ в двигателе 14Д23, который может быть применён в качестве маршевого двигателя 3-ей ступени РН «Союз», позволяет либо уменьшить температуру генераторного газа на входе в турбину ТНА приблизительно на 52°С. на номинальном режиме, либо

использовать избыток мощности турбины в 7,2 % для форсирования двигателя по тяге без увеличения теплонапряжённости конструкции [34].

Работоспособность ЖРД с полимерной присадкой ПИБ и эффективность её применения подтверждена огневыми испытаниями кислородно-керосиновых двигателей: РД170 тягой на земле 740 тс, двигателя 14Д22 тягой на земле ~80 тс и двигателя 11Д58М тягой в пустоте ~8 тс. [33].

При этих испытаниях повышение напора насосов горючего составило 5,5 – 6,5 %. Повышение суммарного кпд насосов горючего составило 12 – 17%. Снижение гидрпотерь в трактах регенеративного охлаждения камер составило 20 – 24 %. Такой эффект позволяет снизить потребляемую мощность насоса горючего на 20 – 25 %. При этом суммарная мощность турбонасосного агрегата (ТНА) снижается на 7 – 8 %.

В [36] представлены экспериментальные зависимости величин коэффициентов сопротивления от числа Рейнольдса при течении в капиллярах разных диаметров для растворов разных концентраций сверхвысокомолекулярного сополимера высших альфа-олефинов и промышленного полиизобутилена в нефрасе (продукт нефтеперегонки бензиновой фракции). Рассмотрена возможность использования полиальфа-олефинов как альтернативы полиизобутилена в качестве присадки к углеводородным компонентам ракетного топлива для снижения гидродинамических потерь в магистралях горючего ЖРД.

На *Рисунке 1* представлены графики, показывающие снижение трения при течении керосина с добавкой ПИБ разных концентраций С% в спиральных фрезерованных каналах сечением 2×2 мм, имитирующих каналы регенеративного охлаждения камер современных ЖРД [38].

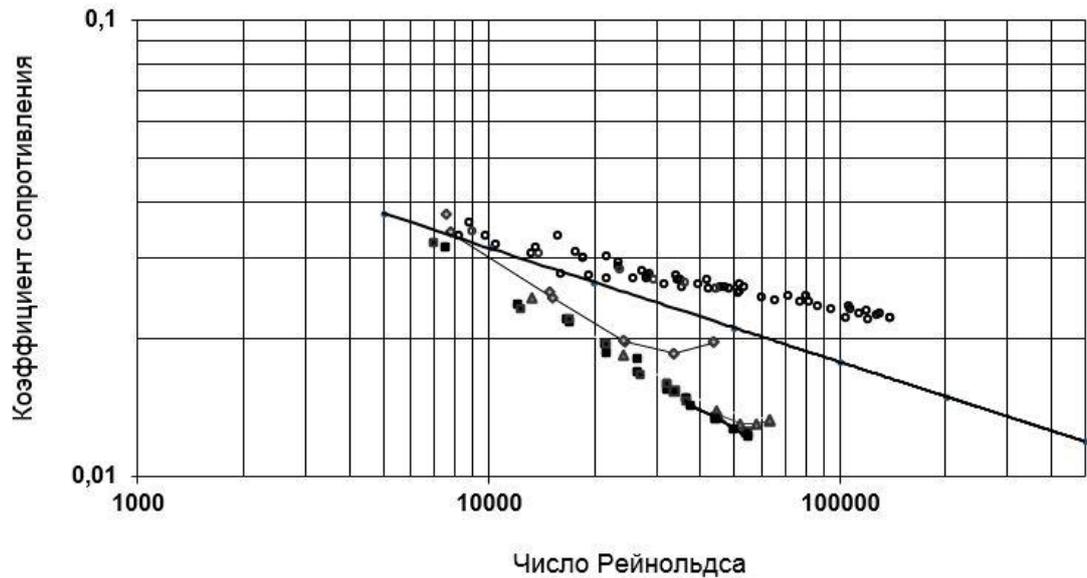


Рисунок 1. Снижение трения при течении керосина с добавкой ПИБ разных концентраций в спиральных каналах сечения 2×2 мм. ● – формула Блазиуса; ○ – $C=0$; ◇ – $C=0,008$ %; Δ – $C=0,02$ %; ■ – $C=0,05$ %

Видно, что эффект снижения трения проявляется в турбулентной области течения и с ростом числа Re увеличивается. Для концентраций ПИБ в керосине 0,02 и 0,05 %, на том же режиме течения ($Re=4 \cdot 10^4$), снижение сопротивления составило приблизительно 46 %. Но начиная с некоторого значения характер зависимостей λ от Re меняется. Это происходит из-за так называемой деструкции полимера [39]. В каналах регенеративного охлаждения камер ЖРД из-за влияния высокой температуры охлаждаемых стенок и воздействия турбулентных возмущений происходит деструкция растворенных макромолекул, в результате чего ослабевают негативный эффект снижения конвективного теплообмена, и характеристики течения горючего с присадкой приближаются к характеристикам чистого керосина. Поэтому, в случае применения в ЖРД полимерных присадок, процесс деструкции следует рассматривать как положительное качество, так как он играет роль своеобразного регулятора с отрицательной обратной связью специфических свойств течения полимерных растворов.

В связи с тем, что сополимер 1-гексена с 1-децем имеет существенно более высокую молекулярную массу по сравнению с ПИБ, возникает вопрос о предельно возможной концентрации сополимера 1-гексена с 1-децем в

керосине, при которой его текучесть остается приемлемой для перекачки методом вытеснения, например сопоставимой с текучестью концентрированного раствора ПИБ. На *Рисунке 2* представлены зависимости от концентрации при 20 °С величин кинематической вязкости растворов ПИБ в керосине Т-6, нефрасе С2; сополимера 1-гексена с 1-деценом в дизельном топливе (вязкость 2,5 сСт), близком по характеристикам керосину Т-6 и в нефрасе С2. Измерения вязкостей производились методом капиллярной вискозиметрии с помощью вискозиметров типа ВПЖ. Из графика видно, что в одинаковых условиях (один и тот же растворитель, одинаковая концентрация) вязкость растворов сополимера 1-гексена с 1-деценом заметно выше, чем растворов ПИБ. Это объясняется существенной разницей величин молекулярных масс этих полимеров. Видно также, что вязкость растворов обоих полимеров сильно зависит от вязкости чистых растворителей. Судя по зависимости вязкости от концентрации сополимера 1-гексена с 1-деценом в дизельном топливе, величина $C = 0,5...0,7 \%$ вполне приемлема как контрольный уровень при приготовлении концентрированного раствора этого полимера в керосине.

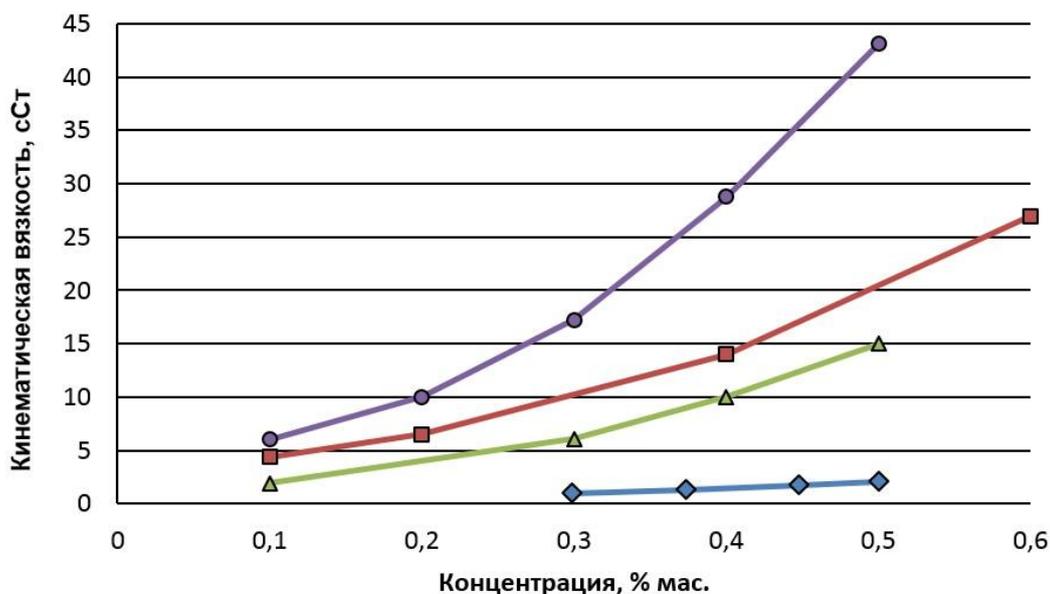


Рисунок 2. Зависимость кинематической вязкости от концентрации растворов при 20 °С: ■ – ПИБ в керосине Т-6 и ◆ – в нефрасе С2; ● – сополимера 1-гексена с 1-деценом в дизельном топливе и ▲ – в нефрасе С2.

Приведенные данные о снижении гидродинамического трения в капиллярах и о величинах вязкостей концентрированных растворов сополимера 1-гексена с 1-деценом в нефрасе дают основание рассматривать этот класс полимеров как возможную присадку к углеводородным компонентам ракетного топлива для уменьшения гидравлических потерь в системе подачи горючего в камеру ЖРД. При этом полимеры высших альфа-олефинов могут иметь преимущество перед ПИБ. Например, объем концентрированного раствора сополимера 1-гексена с 1-деценом для проведения полноразмерного огневого испытания двигателя РД191 составил бы 30 литров и менее. Столь маленькая емкость может быть принадлежностью двигателя. В этом случае при практическом применении полимерных присадок из технологической цепочки исключаются наземная инфраструктура и собственно ракета-носитель.

На *Рисунке 3* представлены результаты расчёта прироста массы ПГ в зависимости от концентрации присадки, сделанного для каждой ступени РН «Союз-У» [32]. Наибольший вклад в увеличение массы ПГ вносит экономия компонентов топлива – кислорода и керосина маршевого двигателя третьей ступени 11Д55 (блок И).

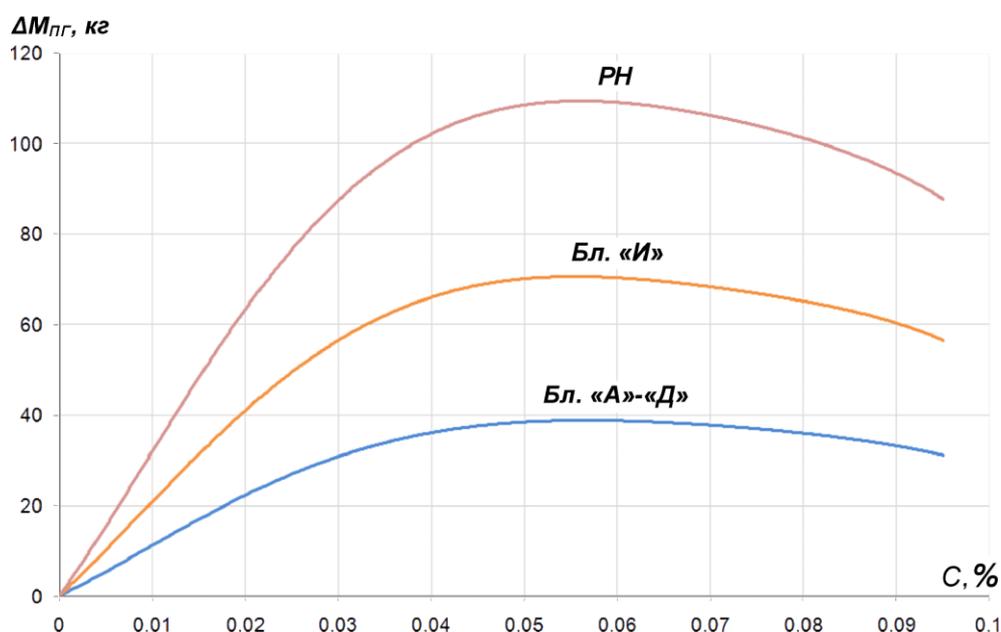


Рисунок 3. Зависимость прироста массы ПГ, выводимого РН «Союз-У», от концентрации присадки.

В [40] проанализированы возможности увеличения массы ПГ РН семейства «Союз» при использовании высокомолекулярных присадок к горючему и перечислены задачи, которые можно было бы решить с помощью присадки ПИБ в керосине:

- расширение номенклатуры космических аппаратов (КА), запускаемых РН;
- добавление малых КА (нано, микро, миниспутников) в качестве попутного груза к основному КА;
- расширение функциональных возможностей КА и космических платформ путём дооснащения их дополнительными блоками аппаратуры.

1.2 Исследовательские работы по созданию гиперголического топлива

Самовоспламенение - распространенный процесс, присущий очень многим веществам. Обычно самовоспламенение веществ происходит при достижении определенной температуры, которая называется температурой самовоспламенения. Но существуют вещества и смеси способные самовоспламенятся и при комнатной (и даже ниже) температуре без воздействия видимого источника тепла.

Механизм работы таких смесей - самоускоряющаяся экзотермическая реакция протекающая с воспламенением смеси. Вследствие этого, время воспламенения таких смесей зависит от внешней температуры, давления, химического состава смесей и др. По понятным причинам хранение готовых смесей не рекомендуется. При очень высокой скорости развития процесса самовозгорания могут быть получены и самодетонирующие смеси (например, смесь алюминиевой пыли, угля и перекиси водорода или смесь нитрата аммония с перманганатом калия).

По скорости воспламенения вещества и смеси можно разделить на: воспламеняющиеся немедленно (1-2 секунды после смешивания реагентов), воспламеняющиеся через непродолжительное время (0,1-5 минут после

смешивания реагентов) и воспламеняющиеся через продолжительное время (более 5 минут после смешивания реагентов). Следует заметить, что эта классификация очень условна, вследствие сильной зависимости времени воспламенения от внешних условий (состав смеси, температура воздуха, влажность воздуха и реагентов, их концентрация). Большинство смесей и веществ воспламеняются немедленно после смешивания или попадания на воздух.

Представления о причинах теплового самовоспламенения в качественной форме даны Я. Вант-Гоффом в 1883 году. Среди отечественных исследователей теорию теплового самовоспламенения в 1928 году разработал Н. Н. Семенов [41]. Теплота, выделяющаяся при медленном протекании экзотермической реакции, рассеивается в окружающее пространство. При некоторых условиях температуры, давления и теплоотвода теплота не успевает передаться в окружающее пространство, вследствие чего температура в зоне реакции прогрессивно повышается. С ростом температуры скорость реакции и скорость теплообразования увеличиваются, увеличивается также и скорость теплоотвода, однако медленнее, чем скорость реакции. Температура, начиная с которой выделяющаяся теплота больше отводимой, называется температурой самовоспламенения; она зависит как от химического состава смеси, так и от условий теплоотдачи. Начиная с температуры самовоспламенения происходит прогрессивное саморазогревание смеси и самоускорение реакции, приводящее к тепловому самовоспламенению или взрыву. Температуру теплового самовоспламенения можно вычислить, если известны тепловые характеристики горючей газовой смеси (тепловой эффект, теплопроводность) и кинетика реакций горения (константа скорости, энергия активации). При определённых внешних условиях скорость разветвления цепей становится больше скорости обрыва цепей. Вследствие этого медленно идущая реакция может перейти в самоускоряющуюся. При этом температура смеси не имеет существенного значения и реакция будет идти самоускоряясь из-за разветвления цепей, если даже температура смеси будет поддерживаться постоянной. Наиболее распространённым типом самовоспламенения является комбинированное цепочно-тепловое.

В 1937 году в Германии начались работы по исследованию компонентов ракетного топлива [43]. На одной из первых ракет А-4, сконструированных немцами, планировалось использовать жидкий кислород и смесь спирта с водой в соотношении 70/30 в качестве топлива. 80-процентная перекись водорода Хельмута Вальтера использовалась для привода жидкостных насосов.

Высококонцентрированная перекись водорода (80-83%) впервые стала доступной примерно в 1934 году, и Вальтер использовал её в качестве однокомпонентного топлива.

Но перекись водорода - это не только однокомпонентное топливо, но и очень неплохой окислитель. И Вальтер разработал топливо для него, которое он назвал "Ц-Штофф". (Сама перекись называлась "Т-Штофф"). Гидразин-гидрат, $N_2H_4 \cdot H_2O$, самовоспламенялся при контакте с перекисью (Вальтер был, возможно, первым разработчиком топлив, обнаружившим этот феномен) и Ц-Штофф состоял из 30 процентов гидразин-гидрата, 57 процентов метанола и 13 процентов воды и 30 мг/литр меди в виде купроцианида калия, для улучшения зажигания и в качестве катализатора горения. Метанол и вода добавлялись потому, что гидразин-гидрат было сложно найти - настолько сложно, что к концу войны его содержание в Ц-Штоффе снизилось до пятнадцати процентов. В Мессершмитт 163-Б использовались Ц-Штофф и Т-Штофф [43].

В Брауншвейге в 1937-1938 годах доктор Отто Лац и доктор Вольфганг С. Ногеррах начали работать над комбинацией Ц-Штоффа и Т-Штоффа. Также разработками новых видов топлива занялась компания БМВ, в 1939 году получившая контракт от Люфтваффе на разработку ракетной системы JATO с использованием комбинации Ц- и Т-Штоффа. И фон Зборовский, представитель БМВ, с начала 1940 года начал работать над комбинацией азотной кислоты и метанола, и в 1941 году убедительно продемонстрировал свои достижения идеальным тридцатисекундным испытанием двигателя с тягой три тысячи фунтов силы.

В ходе исследований, в начале 1940 года было сделано весьма важное открытие - некоторые топлива (первыми были анилин и скипидар)

самовоспламенялись при контакте с азотной кислотой. Ногеррах присоединился к проводимым в БМВ поискам топлив, имеющих это интересное свойство. Его кодовое название для азотной кислоты было "Игнол", а для его топлив - "Эргол", и как человек, знакомый с греческим, он придумал слово "Гипергол" для самовоспламеняющихся комбинаций. "Гипергол" и производные слова, такие как прилагательное "гипергольный", прочно вошли не только в немецкий, но и в английский языки.

Обнаружение эффекта самовоспламенения было очень важным. Иногда используются электрические системы зажигания - а иногда пиротехнические устройства. Но все эти системы были ненадежными, и каждая добавляла ненужных сложностей. Очевидно, что самовоспламеняющиеся топлива позволяют выкинуть все системы зажигания, и предоставить химии делать свою работу. Вся конструкция становится гораздо проще и более надёжной.

Но сложности были и тут. Если компоненты топлива попадают в камеру сгорания и мгновенно воспламеняются - это хороший показатель. Но если они попадают в камеру, успевают в ней накопиться и воспламеняются только потом - происходит взрыв, обычно разрушающий двигатель, а также и окружающее оборудование. Общепринятый термин для этого эффекта - "жёсткий старт". Таким образом, зажигание самовоспламенением должно быть очень быстрым, или оно становится хуже, чем бесполезным. Немцы установили верхний предел в 50 миллисекунд в качестве задержки зажигания, которое было приемлемым.

Первые измерения задержки зажигания были довольно примитивными. Во время поисков веществ, которые бы активно реагировали с азотной кислотой, Зборовски с Мюллером пропитывали салфетку очередным веществом-кандидатом, обрызгивали её азотной кислотой и наблюдали, насколько быстро она вспыхнет, либо произойдет ли воспламенение вообще. Ими был обнаружен интересный эффект. Старые, использованные салфетки из механических мастерских вспыхивали гораздо быстрее свежих, пропитанных тем же составом. Следы железа и меди из мастерской, в форме металлов или солей, работали

катализаторами возгорания. С тех пор к компонентам стали добавлять мелкодисперсные порошки металлов для улучшения воспламенения.

Следующим более современным подходом по определению задержки самовоспламенения был метод, при котором каплю горючего-кандидата вводили в кислоту объёмом с чайную ложку, определяя способность к самовоспламенению. И к моменту окончания Великой Отечественной войны в БМВ было испытано больше 2000 потенциальных топлив.

Было разработано много топлив, весьма различающихся между собой, и вместе с тем очень похожих, поскольку число веществ, которые самовоспламенялись при контакте с азотной кислотой, и при этом доступны в нужных количествах, было ограничено. Тройные амины, такие как триэтиламин, самовоспламенялись, и ещё лучше самовоспламенялись ароматические амины, такие, как анилин, толуидин, ксилидин, N-метиланилин. Большинство из испытанных смесей - простые топлива, состоящие из молекул одного вещества, основывалось на семействе анилина, часто с добавками триэтиламина, плюс иногда таких веществ как диметилбензол, бензол, бензин, тетрагидрофуран, пирокатехин и иногда других алифатических аминов. Разработанная в БМВ «Тонка 250» включала 57 процентов ксилидина и 43 процента триэтиламина (она использовалась в ракете «Тайфун»), а Тонка 500 содержала толуидин, триэтиламин, анилин, бензин, бензол и ксилидин. Ногеррах добавил фурфуроловый спирт к Тонке 250, получив «Эргол-60», который он считал «лучшим» самовоспламеняющимся топливом, и в докладе о нём мечтательно добавил, что фурфуроловый спирт легко доступен в Соединённых Штатах - в отличие от Германии.

Примерно в 1942 или 1943 году работы в И.Г.Фарбене стали постепенно смещаться с исследований смесей, похожих на Тонку и Эргол, с которыми они работали вначале, на топлива, основанные на "Визолах", которые представляли собой виниловые эфиры. Виниловые эфиры бурно самовоспламенялись с MS-10, смесью, состоящей из 10 процентов серной кислоты и 90 процентов азотной, и задержка воспламенения меньше зависела от температуры, чем при

использовании чистой азотной кислоты. Однако, MS-10 оказалась коррозионно активной и со временем окисляла нержавеющую сталь.

В 1943 году доктор Хеллер запатентовал смесь, которая состояла из 57,5 процентов Визола-1 (винилбутиловый эфир) или Визола-6 (винилэтиловый эфир), 25,8 процентов Визола-4 (дивинилбутандиоловый эфир), 15 процентов анилина, и 1,7 процентов пентакарбонила железа или нафтената железа (железо добавлялось к горючему, а не к окислителю, потому что окислитель содержал серную кислоту, а сульфаты железа нерастворимы в азотной кислоте). На эту тему было много разных вариаций топлив, иногда с заменой n-бутилового компаунда на винилизобутиловый эфир. Так или иначе, более 200 смесей было испытано, среди которых меньше десяти было найдено достаточно полезными. "Оптолин" был смесью анилина, визола, ароматических углеводородов, иногда аминов, бензина и пирокатехина.

Многие агентства Германии того времени пытались найти добавки, которые при добавлении в небольших количествах делали бензин или бензол или метанол самовоспламеняющимся с кислотой. Вещества типа карбонильного железа и селенида натрия отчасти работали, но такой успех был больше академическим, т.к. эти добавки были слишком редкими, дорогими или слишком агрессивными, чтобы с ними работать.

Также велись поиски и возможных окислителей, одним из которых был тетранитрометан (ТНМ). Это хороший окислитель, имеющий определённые преимущества. Он долгохраним, обладает большей эффективностью, чем азотная кислота и имеет довольно высокую плотность, так что он не требует больших баков. Но он плавился при $+14^{\circ}\text{C}$, а также он взрывоопасен. Смесь в состоянии эвтектики с N_2O_4 , 64 процента ТНМ и 36 процентов N_2O_4 , не замерзает до -30°C , и гораздо менее чувствительна, чем чистый ТНМ, но всё ещё считалась опасной, поэтому ее использование также было приостановлено.

Очередной неосуществившейся идеей того времени было гетерогенное топливо - суспензия, или пульпа, металлического порошка, например, алюминиевого, в жидком топливе, например, бензине. Идея была предложена

несколькими авторами, среди них Цандером в России и Зангером в Австрии, и Хайнц Мюллер в БМВ провёл испытания, используя алюминиевый или магниевый порошок и дизельное масло. Эффективность была очень низкая - давление в камере было 50-100 psi вместо 300, как они рассчитывали, из-за неполного сгорания металла. Но в остальном результаты были впечатляющими. Испытания однокомпонентных топлив (которые назывались «Монерголы») продолжались до конца войны. В 1937-1938 годах основная работа делалась с растворами N_2O или NH_4NO_3 в аммиаке. Но результатами этих экспериментов были лишь взрывы и разрушенные двигатели. Тем не менее, в наши дни разработки пульпообразного топлива вновь набирают обороты [46].

Также существовала комбинация топлив, которую в БМВ и в АРИБ называли "Литерголами". Перекись или закись азота, N_2O , впрыскивалась в двигатель, в котором были закреплены несколько стержней пористого угля. Закись азота способна к экзотермическому разложению на кислород и азот, а перекись - на кислород и пар, и они могут работать как однокомпонентные топлива.

Исследования компонентов топлив в Соединённых Штатах сильно походило на исследования в Германии. В Америке не было А-4 и высококонцентрированная перекись водорода была недоступной в этой стране, но рассматривались другие окислители.

Американские исследователи использовали 76 процентную хлорную кислоту, тетранитрометан, но основным окислителем, использовавшимся в США в составе топливных пар, была красная дымящаяся азотная кислота (КДАК), содержащая 6-7 процентов N_2O_4 . Они пробовали сжигать в тигле разные горючие с этой кислотой - бензин, петролейный эфир, керосин, метиловый и этиловый спирт, скипидар, льняное масло, бензол и т.д. Кислота поддерживала горение. Также было обнаружено, что гидразин-гидрат и бензол гипергольны с ней. В США КДАК была лучшим окислителем, и исследователи того времени считали, что единственным источником проблем, связанным с кислотой, является её коррозионная активность, которая может быть преодолена использованием коррозионно-стойких материалов. Однако, при работе с КДАК и бензином ещё в

1941 году ученые немедленно столкнулись с проблемой. Её почти невозможно поджечь. И если же это все-таки удавалось, то они чаще всего получали взрыв вместо надёжного зажигания, которого они пытались добиться. Проблема была решена использованием другого горючего. Анилин и КДАК при контакте давали надежное воспламенение, которое происходило сразу, а процесс горения отличался устойчивостью.

К первому апреля 1942 года в США работал на стенде мотор на 1000 фунтов тяги, а пятнадцатого он помог взлёту среднего бомбардировщика А20-А - это был первый полёт с жидкостным ЯТО в соединённых Штатах.

Но перспективы использования такой топливной пары были обречены. Во-первых, анилин был очень редким веществом во время войны. Во-вторых, он очень ядовит и быстро проникает под кожу. И в-третьих, он замерзает при $-6,2^{\circ}\text{C}$ и поэтому является топливом строго для летних кампаний.

В остальном военный период характеризовался двумя тесно связанными исследовательскими темами. Одна из них была направлена на снижение температуры замерзания анилинового топлива, другая пыталась как-нибудь сделать бензин самовоспламеняющимся с азотной кислотой.

В ЛРД смешивали анилин с ортотолуидом, близким аналогом, и получили эвтектику, замерзающую при -32°C . Но о-толуидин был такой же редкостью, как и анилин, и хотя смесь успешно работала на стендах, она никогда не дошла до промышленного использования. Более практичной добавкой был получаемый из шелухи овсянки фурфуриловый спирт, которого в то время не было в Германии. 20% фурфурилового спирта в анилине снижали температуру замерзания до $-17,8^{\circ}\text{C}$, а эвтектика, 51% анилина и 49% фурфурилового спирта, имела температуру замерзания -42°C . Фурфуриловый спирт самовоспламенялся примерно так же, как и анилин.

Одной из лучших добавок также являлась смесь ксилидинов, но требовалось добавить примерно 50%, чтобы обеспечить надёжное и быстрое самовоспламенение - что делало ксилидины не добавкой, а большей частью топлива.

В работе [66] рассмотрена возможность реализации воспламенения топлива (ВПВ + керосин) за счет небольшой добавки (3%) к керосину ацетилацетоната марганца ($\text{Mn}(\text{C}_5\text{H}_7\text{O}_2)_3$). Для растворения порошкообразного ацетилацетоната в керосине потребовалось растворить его предварительно в ксилидине. Однако, при хранении на свету ацетилацетонат марганца выделяется из раствора в виде мелких кристаллов и под действием гравитации оседает на дно емкости.

Опыт иностранных исследователей, а также отечественные разработки показывают, что самовоспламеняющиеся топлива, как правило, представляют собой сложные химические соединения, зачастую высокотоксичные. Некоторые из них не удовлетворяют эксплуатационным требованиям. Тем не менее, поиски новых компонентов, а также возможных их вариаций для получения самовоспламеняющейся топливной пары не прекращаются.

Недавно в нашей стране компания «РТ-Химкомпозит» разработала высокоэффективную технологию производства орбитального пускового горючего ПГ-2 [44]. Предприятие «ГНИИХТЭОС», входящее в холдинг «РТ-Химкомпозит», наряду с производством продукта, проводит весь комплекс исследований по определению качественных показателей используемого сырья для его производства, а также контрольные испытания по аттестации горючего ПГ-2 и его паспортизацию. Мощность созданного производства пускового горючего способна обеспечить потребности космической отрасли в данном продукте.

1.3 Выводы по главе

В результате анализа доступных литературных источников установлено:

1. Введение в керосин полимерной присадки ПИБ существенно снижает гидродинамические потери на трение в магистралях горючего двигателя, в основном в агрегатах подачи и в тракте регенеративного охлаждения камеры. Такой эффект позволяет снизить потребляемую мощность насоса и,

следовательно, потребную мощность турбонасосного агрегата (ТНА). Снижение мощности ТНА способствует снижению энергонапряженности двигателя в целом;

2. Феномен снижения гидропотерь на трение при турбулентном течении жидкости с малыми полимерными добавками происходит из-за взаимодействия макромолекул полимера с турбулентными структурами в пристенной зоне течения, в результате чего происходит подавление поперечного турбулентного переноса. Работоспособность ЖРД с полимерной присадкой ПИБ и эффективность ее применения подтверждена огневыми испытаниями двигателей РД170 тягой 740тс, двигателя 14Д22 тягой ~ 80 тс и двигателя 11Д58М тягой ~8 тс. В частности, получены следующие данные:

- Не обнаружено отрицательного влияния присадки на рабочий процесс в КС (на удельный импульс тяги, на вибро-акустические характеристики);
- Не обнаружено отрицательного влияния присадки на регенеративное охлаждение камер;
- В продуктах сгорания не выявлено токсичных веществ, в частности формальдегида при проведении ОИ двигателя РД 170 с присадкой ПИБ.

3. Применение полимерной присадки в ЖРД с дожиганием турбогаза позволяет понизить температуру генераторного газа на входе в турбину при номинальном значении тяги либо, не повышая температуру генераторного газа, форсировать двигатель по тяге, что позволит увеличить массу ПГ, выводимого носителем;

4. В двигателях без дожигания уменьшение потребной мощности ТНА позволит уменьшить запас рабочего тела турбины на борту РН (для РН серии «Союз»: в блоках А – Д на 450 – 500 кг, в блоке И на 76 кг). Это позволит увеличить массу ПГ;

5. В результате анализа проведенных исследований по самовоспламенению топлив можно заключить, что большинство исследуемых ранее композиций, являющихся гиперголическими, были далеки от возможности реального использования в ракетных двигателях. Многие из них являлись

высокотоксичными химическими веществами, не удовлетворяли требованиям к воспламенению в ЖРД, а также не обладали необходимыми эксплуатационными качествами. В условиях современных требований к компонентам топлива ЖРД необходимо создание такой пары, которая соответствовала бы высоким показателям экологичности, теплопроизводительности, а также обладала хорошими эксплуатационными показателями. Кроме этого, необходима достаточная сырьевая база и недороговизна производства. Самовоспламеняющиеся компоненты, безусловно, дают много преимуществ, таких как отказ от системы воспламенения, работа в импульсном режиме и др. Исходя из отмеченного, целесообразно создание нового горючего на основе уже имеющегося, например керосина, с незначительной его модификацией.

ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РАСТВОРОВ ПИБ В КЕРОСИНЕ

По заданию ОАО «НПО Энергомаш» проведено комплексное исследование свойств растворов высокомолекулярного полиизобутилена в ракетном горючем РГ-1 (нафтил) разных концентраций и соответствие их нормам ТУ 38.001244-81 [45]. Определение степени изменения свойств керосина и корректировка ТУ помогут ускорить внедрение нового горючего и использовать на действующих кислородно-керосиновых двигателях в качестве основного.

В процессе исследования было изучено влияние добавки высокомолекулярного ПИБ на фракционный, элементный и углеводородный составы керосина, а также на его физические, эксплуатационные свойства и на теплофизические характеристики.

Изучение свойств и характеристик керосина с добавкой ПИБ проводились в зависимости от содержания (концентрации) полимера в растворе. Диапазон концентраций выбран экспериментально из условия максимальной эффективности применения полимерной присадки ПИБ в ЖРД.

2.1 Объекты исследования

Для проведения исследований ОАО «НПО Энергомаш» предоставило раствор высокомолекулярного полиизобутилена в нафтиле концентрации 0,5%, из которого путем разбавления с чистым нафтилом приготавливались лабораторные образцы для изучения. Все образцы приготовлены из одной партии топлива.

1. Образец №1 – топливо нафтил, соответствующее требованиям ТУ 38.001244-81;
2. Образец № 2 – топливо нафтил с добавкой полиизобутилена (ПИБ) в количестве 0,01 % масс.;
3. Образец № 3 – топливо нафтил с добавкой ПИБ в количестве 0,05 % масс.;
4. Образец № 4 – топливо нафтил с добавкой ПИБ в количестве 0,1 % масс.

2.2 Методы проведения исследований

При проведении исследований использовались нижеследующие методы и методики.

1. Стандартные лабораторные методы испытаний по ТУ 38.001244-81, а также по ГОСТ 21261, ГОСТ ЕН ИСО 12937, ГОСТ Р ЕН 13016:

- метод определения плотности с использованием электронного плотномера DA-500 с автоматическим термостатированием при 20⁰С;

- метод определения фракционного состава с использованием автоматического прибора OptiDist, заключающийся в перегонке определенного количества топлива при фиксированных условиях и постоянных наблюдениях за объемом конденсата;

- метод определения кинематической вязкости, заключающийся в измерении времени истечения определенного объема термостатированного при определенной температуре топлива под действием силы тяжести через калиброванный стеклянный капиллярный вискозиметр;

- метод определения температуры начала кристаллизации, заключающийся в охлаждении топлива с заданной скоростью до появления кристаллов углеводородов и фиксирования температуры;

- метод определения низшей теплоты сгорания топлива, заключающийся в сжигании определенного количества топлива в калориметрической бомбе в среде сжатого кислорода;

- метод определения фактических смол, который заключается в испарении определенного объема топлива при заданной температуре с последующим определении массы остатка;

- испытание на медной пластинке, которое заключается в выдерживании в топливе при 50⁰С пластинки из электролитической меди и который характеризует наличие в топливе коррозионно-активных соединений;

- метод определения кислотности, характеризующий содержание органических кислот в топливе, который заключается в извлечении этиловым спиртом из топлива кислых соединений с последующим титрованием раствором КОН в присутствии индикатора;

- метод определения термоокислительной стабильности в статических условиях, заключающийся в окислении топлива в герметической стальной бомбе с последующим определением массы нерастворимого осадка, растворимых и нерастворимых смол;

- метод определения водорастворимых кислот и щелочей, который заключается в извлечении органических кислот и щелочей из топлива и определения величины pH;

- метод определения содержания растворенной воды по методу Карла Фишера (потенциометрическое титрование на автоматическом титраторе);

- метод определения зольности, характеризующую содержание солей органических и минеральных кислот, который заключается в сжигании навески топлива с последующим прокаливанием твердого остатка до постоянной массы;

- метод определения давления насыщенных паров с помощью автоматического прибора ERAVAP, заключающийся в введении известного объема термостатированного и насыщенного воздухом образца при требуемом соотношении жидкость: пар в вакуумированную камеру и измерении общего давления в камере, эквивалентного давлению паров образца и парциальному давлению растворенного воздуха;

- метод определения поверхностного натяжения путем вытягивания жидких пленок образца, заключающийся в измерении силы, которую надо приложить рамке, контактирующей с поверхностью жидкости, чтобы отделить ее от этой поверхности.

2. Стандартная методика хромато-масс-спектрометрического анализа, применяемая с целью определения в топливе массовой доли следующих групп углеводородов:

- алканы (нормального и изостроения);

- нафтены (углеводороды, имеющие в своей структуре циклические фрагменты, без двойных и кратных связей);
- ароматические углеводороды (углеводороды, содержащие в структуре бензольные кольца);
- непредельные углеводороды (углеводороды, содержащие двойные и кратные связи).

3. Расчетные методы определения теплотехнических и эксплуатационных свойств топлива.

2.3 Обобщенные результаты исследований

2.3.1 Результаты определения показателей качества по ТУ 38.001244-81

Результаты анализа образцов по ТУ 38.001244-81 представлены в *Таблицах 1-4*. При проведении исследований не проводилось определение некоторых показателей качества топлива (массовые доли общей серы, меркаптановой серы, сероводорода и ароматических углеводорода, а также йодное число), т.к. указанные показатели в основном характеризуют сохраняемость топлив при длительном хранении или предназначены для оценки сырья и технологии производства топлива на предприятии. Опыт эксплуатации нафтила свидетельствует о несущественном изменении величин, указанных показателей.

Результаты определения показателей качества по ТУ 38.001244-81 показывают, что добавление ПИБ в концентрациях от 0,01 до 0,1 % масс. в целом не ухудшает качество топлива. Исключение составляют значения содержания фактических смол, которые для образцов №№ 2-4 превышают норму для нафтила. Это может быть связано с особенностями метода испытаний, при котором сначала происходит нагрев до 180⁰С, а затем выпариванием водой. При проведении испытаний по этому методу после нагрева до 180⁰С в течение 1 часа наблюдалось выпадение ПИБ в осадок, что и привело к повышенному результату. При этом осмоления или изменения цвета самого топлива не происходило. Указанный показатель в основном характеризует склонность топлива к образованию

отложений (продуктов окисления, конденсации и полимеризации) при нагревании в топливной системе бензиновых, дизельных и газотурбинных двигателей.

Таблица 1. Результаты анализа образца 1 по ТУ 38.001244-81

Наименование показателей	Метод испытания	Норма по ТУ 38.001244	Результат анализа
1. Плотность при 20°C, кг/м ³	ГОСТ 3900	833±3	835,6
2. Фракционный состав: температура начала перегонки, °C 10% отгоняется при температуре, °C 50% отгоняется при температуре, °C 90% отгоняется при температуре, °C 98% отгоняется при температуре, °C	ГОСТ 2177	Не ниже 195 Не выше 210 Не выше 235 Не выше 260 Не выше 270	196 207 219 246 257
3. Кинематическая вязкость, мм ² /с: при 20 °C при минус 40 °C	ГОСТ 33	Не менее 2,5 Не более 25	2,54 18,16
4. Температура начала кристаллизации, °C	ГОСТ 5066, метод А	Не выше минус 60	Ниже минус 60
5. Низшая теплота сгорания, кДж/кг	ГОСТ 21261	Не менее 43000	43135
6. Содержание фактических смол, мг на 100 см ³ топлива	ГОСТ 1567, 8489	не более 2,0	1,5
7. Испытание на медной пластинке при 100 °C в течение 3 ч	ГОСТ 6321	Выдерживает	Выдерживает
8. Кислотность, мг КОН на 100 см ³ топлива	ГОСТ 5985	Не более 0,5	0,05
9. Термоокислительная стабильность в статических условиях при 150 °C: — количество осадка, мг/100 см ³ топлива; — количество смол, нерастворимых в топливе, мг на 100 см ³ ; — количество смол, растворимых в топливе, мг на 100 см ³ .	ГОСТ 11802 и п.4.2 ТУ 38.001244	Не более 2,0 Не более 2,0 Не нормируется	Отсутствие Отсутствие 19,8
10. Содержание водорастворимых кислот и щелочей	ГОСТ 6307 и п. 4.3 ТУ 38.001244	Отсутствие	Отсутствие

11. Содержание механических примесей и воды	п.4.4 ТУ 38.001244	Отсутствие	Отсутств ие
12. Содержание растворенной воды, %	ГОСТ Р ЕН ИСО 12937	Не установлено	0,0006
13. Зольность, %	ГОСТ 1461	Не более 0,003	0,0004

Таблица 2. Результаты анализа образца 2 по ТУ 38.001244-81

Наименование показателей	Метод испытания	Норма по ТУ38.001244	Результат анализа
1. Плотность при 20°C, кг/м ³	ГОСТ 3900	833±3	835,6
2. Фракционный состав: температура начала перегонки, °C	ГОСТ 2177	Не ниже 195	196
10% отгоняется при температуре, °C		Не выше 210	207
50% отгоняется при температуре, °C		Не выше 235	220
90% отгоняется при температуре, °C		Не выше 260	245
98% отгоняется при температуре, °C		Не выше 270	257
3. Кинематическая вязкость, мм ² /с: при 20 °C при минус 40 °C	ГОСТ 33	Не менее 2,5 На более 25	8,04 19,27
4. Температура начала кристаллизации, °C	ГОСТ 5066,метод А	Не выше минус 60	Минус 65
5. Низшая теплота сгорания, кДж/кг	ГОСТ 21261	Не менее 43000	43145
6. Содержание фактических смол, мг на 100 см ³ топлива	ГОСТ 1567, 8489	не более 2,0	22
7. Испытание на медной пластинке при 100 °C в течение 3 ч	ГОСТ 6321	Выдерживает	Выдерживает
8. Кислотность, мг КОН на 100 см ³ топлива	ГОСТ 5985	Не более 0,5	0,05
9. Термоокислительная стабильность в статических условиях при 150 °C: количество осадка, мг/100 см ³ топлива количество смол, нерастворимых в топливе, мг на 100 см ³ количество смол, растворимых в топливе, мг на 100 см ³	ГОСТ 11802 и п.4.2 ТУ 38.001244	Не более 2,0 Не более 2,0 Не нормируется	1,4 1,25 6,13
10. Содержание водорастворимых кислот и щелочей	ГОСТ 6307 и п. 4.3 ТУ 38.001244	Отсутствие	Отсутств ие

11. Содержание механических примесей и воды	п.4.4 ТУ 38.001244	Отсутствие	Отсутств ие
12. Содержание растворенной воды, %	ГОСТ Р ЕН ИСО 12937	Не установлено	0,0006
13. Зольность, %	ГОСТ 1461	Не более 0,003	0,0004

Таблица 3. Результаты анализа образца 3 по ТУ 38.001244-81

Наименование показателей	Метод испытания	Норма по ТУ 38.001244	Результ ат анализа
1. Плотность при 20°C, кг/м ³	ГОСТ 3900	833±3	835,6
2. Фракционный состав: температура начала перегонки, °C	ГОСТ 2177	Не ниже 195	196
10% отгоняется при температуре, °C		Не выше 210	207
50% отгоняется при температуре, °C		Не выше 235	220
90% отгоняется при температуре, °C		Не выше 260	245
98% отгоняется при температуре, °C		Не выше 270	257
3. Кинематическая вязкость, мм ² /с: при 20 °C при минус 40 °C	ГОСТ 33	Не менее 2,5 Не более 25	9,63 23,08
4. Температура начала кристаллизации, °C	ГОСТ 5066,метод А	Не выше минус 60	Минус 65,1
5. Низшая теплота сгорания, кДж/кг	ГОСТ 21261	Не менее 43000	43111
6. Содержание фактических смол, мг на 100 см ³ топлива	ГОСТ 1567, 8489	не более 2,0	32,5
7. Испытание на медной пластинке при 100 °C в течение 3 ч	ГОСТ 6321	Выдерживает	Выдержи вает
8. Кислотность, мг КОН на 100 см ³ топлива	ГОСТ 5985	Не более 0,5	0,04
9. Термоокислительная стабильность в статических условиях при 150 °C: количество осадка, мг/100 см ³ топлива количество смол, нерастворимых в топливе, мг на 100 см ³ количество смол, растворимых в топливе, мг на 100 см ³	ГОСТ 11802 и п.4.2 ТУ 38.001244	Не более 2,0 Не более 2,0 Не нормируется	Отсутст вие 2,0 16,0
10. Содержание водорастворимых кислот и щелочей	ГОСТ 6307 и п. 4.3 ТУ 38.001244	Отсутствие	Отсутст вие
11. Содержание механических примесей и воды	п.4.4 ТУ	Отсутствие	Отсутст

	38.001244		вие
12. Содержание растворенной воды, %	ГОСТ Р ЕН ИСО 12937	Не установлено	0,0006
13. Зольность, %	ГОСТ 1461	Не более 0,003	0,0006

Таблица 4. Результаты анализа образца 4 по ТУ 38.001244-81

Наименование показателей	Метод испытания	Норма по ТУ 38.001244	Результат анализа
1. Плотность при 20°C, кг/м ³	ГОСТ 3900	833±3	835,7
2. Фракционный состав: температура начала перегонки, °C	ГОСТ 2177	Не ниже 195	196
10% отгоняется при температуре, °C		Не выше 210	207
50% отгоняется при температуре, °C		Не выше 235	220
90% отгоняется при температуре, °C		Не выше 260	245
98% отгоняется при температуре, °C		Не выше 270	257
3. Кинематическая вязкость, мм ² /с: при 20 °C при минус 40 °C	ГОСТ 33	Не менее 2,5 Не более 25	11,41 27,47
4. Температура начала кристаллизации, °C	ГОСТ 5066, метод А	Не выше минус 60	Минус 64,9
5. Низшая теплота сгорания, кДж/кг	ГОСТ 21261	Не менее 43000	43125
6. Содержание фактических смол, мг на 100 см ³ топлива	ГОСТ 1567, 8489	не более 2,0	65,0
7. Испытание на медной пластинке при 100 °C в течение 3 ч	ГОСТ 6321	Выдерживает	Выдерживает
8. Кислотность, мг КОН на 100 см ³ топлива	ГОСТ 5985	Не более 0,5	0,03
9. Термоокислительная стабильность в статических условиях при 150 °C: количество осадка, мг/100 см ³ топлива количество смол, нерастворимых в топливе, мг на 100 см ³ количество смол, растворимых в топливе, мг на 100 см ³	ГОСТ 11802 и п.4.2 ТУ 38.001244	Не более 2,0 Не более 2,0 Не нормируется	Отсутствует вие 6,75 18,0
10. Содержание водорастворимых кислот и щелочей	ГОСТ 6307 и п. 4.3 ТУ 38.001244	Отсутствие	Отсутствует вие
11. Содержание механических примесей и воды	п.4.4 ТУ 38.001244	Отсутствие	Отсутствует вие

12. Содержание растворенной воды, %	ГОСТ Р ЕН ИСО 12937	Не установлено	0,0006
13. Зольность, %	ГОСТ 1461	Не более 0,003	0,0006

2.3.2 Результаты испытаний на сохраняемость

Результаты испытаний на сохраняемость, проведенные по МИ 11.207-2009 «Методика прогнозирования сохраняемости топлив в составе изделий вооружения и военно-специальной техники и в войсковых условиях хранения» представлены в *Таблице 5*. Режим ускоренного теплового старения – умеренная климатическая зона, срок хранения – 10 лет.

Испытания на сохраняемость в присутствии образцов Ст.3 свидетельствуют о стабильности образцов, введение ПИБ в топливо нафтил не приводит к изменению характеристик и не меняет механизм окисления топлива.

Таблица 5. Результаты исследований на сохраняемость по МИ 11.207-2009

Наименование показателя	Результаты испытаний		
	Образец № 1	Образец № 2	Образец № 3
1. Кислотность, мг КОН на 100 см ³ топлива	0,06	0,06	0,06
2. Термоокислительная стабильность в статических условиях при 150 °С: количество осадка, мг/100 см ³ топлива	Отсутствие	1,5	1,3
количество смол, нерастворимых в топливе, мг на 100 см ³	Отсутствие	Отсутствие	Отсутствие
количество смол, растворимых в топливе, мг на 100 см ³	19,0	8,0	15,0
3. Содержание фактических смол, мг на 100 см ³ топлива	2,0	25,0	35,0

2.3.3 Результаты измерения давления насыщенных паров

Результаты измерения давления насыщенных паров образцов по ГОСТ Р ЕН 13016 представлены в *Таблице 6*. Испытания проводились на приборе ERAVAR.

Таблица 6. Результаты измерения давления насыщенных паров

Наименование показателя	Результаты испытаний			
	Образец № 1	Образец № 2	Образец № 3	Образец № 4

Давление насыщенных паров при 37,8 ⁰ С, кПа	5,5	5,7	6,5	6,9
--	-----	-----	-----	-----

Значения давления насыщенных паров изменяются незначительно на уровне погрешности метода определения.

2.3.4 Результаты определения поверхностного натяжения

Результаты определения величины поверхностного натяжения образцов, выполненные на цифровом тензиометре Kruss K100MK2 по ГОСТ Р 50003-92, представлены в *Таблице 7*.

Таблица 7. Результаты измерения поверхностного натяжения

Наименование показателя	Результаты испытаний			
	Образец № 1	Образец № 2	Образец № 3	Образец № 4
Поверхностное натяжение при 25 ⁰ С, мН/м	27,7	27,4	27,4	27,4

Как видно, значения поверхностного натяжения образцов №№ 1-4 не изменяются.

2.3.5 Результаты определения теплотехнических характеристик

Результаты определения и расчета теплотехнических характеристик образцов представлены в *Таблице 8*.

Таблица 8. Расчетные значения теплотехнических характеристик

Наименование показателя	Результаты испытаний			
	Образец № 1	Образец № 2	Образец № 3	Образец № 4
Низшая теплота сгорания, кДж/кг	43135	43145	43111	43125
Теплоемкость при 20 ⁰ С, кДж/(кг*К)	1,898	1,898	1,898	1,898
Теплопроводность при 20 ⁰ С, Вт/(м*К)	0,122	0,112	0,112	0,112
Теплота испарения, кДж/кг	12,4	12,4	12,4	12,4

Расчет зависимости теплоемкости (кДж/кг*К) от температуры проводился по уравнению Ватсона:

$$Cp, = \frac{3,98 \cdot 10^{-5} \cdot M_B}{(0,1745 - 0,0835 \cdot T_{пр})^{2,8}}, \quad (1)$$

где $T_{пр}$ – приведенная температура, $T_{пр} = T_{расч}/T_{кр}$,

$T_{расч}$ – температура, рассчитываемых условий, К;

$T_{кр}$ – критическая температура, К;

M_B - молекулярная масса.

Расчет зависимости теплопроводности (Вт/(м*К)) от температуры проводился через зависимость изобарной теплоемкости:

$$\lambda = 0,422 \times 10^{-4} * Cp * \rho * \sqrt[3]{\rho/M}, \quad (2)$$

где ρ – плотность, кг/м³;

M – молярная масса г/моль.

Расчет зависимости теплоты испарения $\Delta H_{исп}$, кДж/кг проводился по формуле:

$$\Delta H_{исп} = \frac{4,575 \times T_1 \times \lg \frac{P_2}{P_1}}{T_2 - T_1}, \quad (3)$$

где T_1 – температура, рассчитываемых условий, К;

T_2 – температура экспериментальная, К;

P_1 – давление насыщенных паров при T_1 , Па;

P_2 – давление насыщенных паров при T_2 , Па.

Значения физико-химических показателей нафтила с добавкой ПИБ не отличаются от аналогичных значений нафтила. Зависимости плотности и вязкости нафтила с ПИБ от температуры аналогичны значениям для нафтила.

2.3.6 Результаты хромато-масс-спектрометрического исследования.

Анализ проведен хромато-масс-спектрометрическим методом на приборе Varian 4000 Internal с хроматографом CP 3800 фирмы Varian по методике МИ

11.217-2012 «Методика определения углеводородных горючих методом газовой хроматографии с масс-спектрометрическим детектированием».

Хроматографическое разделение проводили на капиллярной колонке 60 м x 0.25 мм со слабополярной неподвижной жидкой фазой VF-5ms в режиме программирования температуры. Для определения соотношения изомеров и количества примесей, содержащихся в образцах, использовали следующий режим: 120°C – 2°/мин – 300°C. Температура инжектора 300°C. Регистрация хроматографических пиков осуществлялась в режиме записи полного ионного тока (ПИТ) с ионизацией электронами, скорость сканирования 0,1 сек/сканирование. Энергия ионизирующих электронов 70 эВ. Идентификация соединений осуществлялась по программе библиотечного поиска. Использована библиотека NIST 05.

На *Рисунке 4* приведены хроматограммы по ПИТ образца №4 в сравнении с образцом №1. Из сравнения кривых видно, что хроматограмма исследованного образца №4 в пределах погрешности совпадает с хроматограммой образца топлива №1. Среди компонентов исследованных образцов отсутствуют кислородсодержащие соединения и непредельные соединения. Также следует отметить, что в исследованном образце не происходит накопления высокомолекулярных соединений с временами выхода более 35 минут. Однако, присутствие на хроматограммах сравнительно интенсивных пиков с большими временами выхода (более 30 минут) может указывать на возможные процессы поликонденсации, что при длительном хранении может привести к ухудшению некоторых физико-химических свойств (фракционный состав, количество фактических смол и т.п.).

Результаты сравнительного хромато-масс-спектрометрического исследования образцов позволяют считать, что групповой состав образцов №№2-4 идентичен нафтилу (образец №1), количество основных компонентов топлива не изменилось, существенных изменений, способных повлиять на качество топлива, не обнаружено.

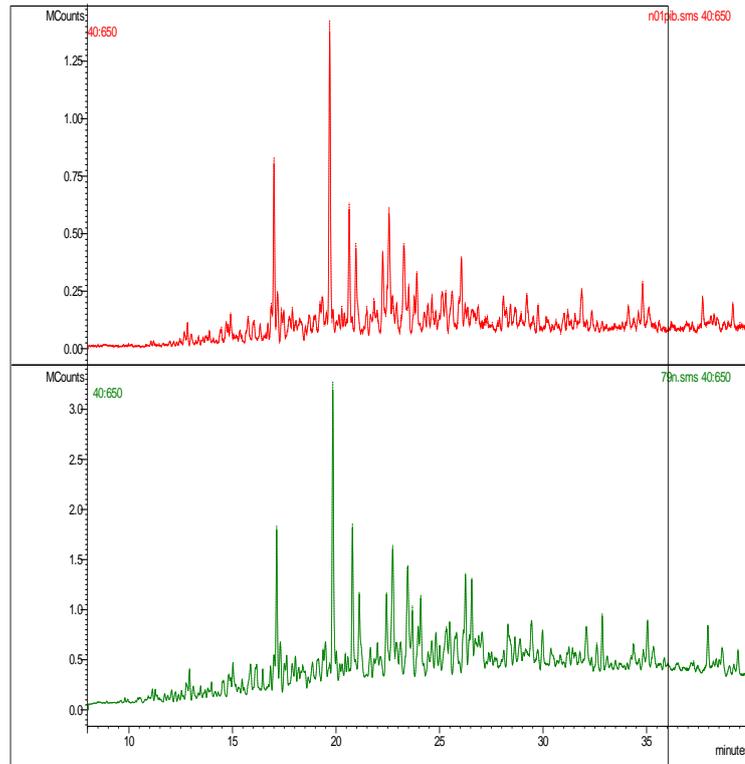


Рисунок 4. Хроматограмма по ПИТ образца №4 (вверху) в сравнении с образцом №1 (внизу)

2.4 Выводы по главе

1. Образцы №№ 2-4 с добавкой ПИБ в концентрациях 0,01; 0,05; 0,1 % масс. соответствуют требованиям ТУ 38.001244-81, за исключением значений показателя «содержание фактических смол». Учитывая наблюдаемые в процессе проведения анализа изменения образцов, а также исследования, которые показали, что повышение концентрации фактических смол свыше норм ТУ 38.001244-81 приводит к ухудшению теплообмена, однако, не ухудшает коксообразование, целесообразно рассмотреть вопрос корректировки норм для топлива с ПИБ.

Кроме этого наблюдается увеличение значений показателей «количество смол, нерастворимых в топливе», и «количество смол, растворимых в топливе», однако они находятся в пределах, установленных ТУ 38.001244-81.

2. Кинематическая вязкость увеличивается практически линейно пропорционально увеличению концентрации ПИБ в топливе, и при концентрации

0,1 % масс. находятся на верхнем диапазоне значений, установленных ТУ 38.001244-81.

3. Анализ образцов и расчеты, проведенные на их основе, свидетельствуют об идентичности основных физико-химических, эксплуатационных показателей, критических параметров топлива нафтила и топлива нафтил с ПИБ.

ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДОБАВКИ ПИБ НА ПОЛНОТУ СГОРАНИЯ ТОПЛИВА

3.1 Исследование влияния добавки полиизобутилена к керосину на мелкость распыливания

Наиболее вероятным механизмом влияния полимерной добавки на полноту сгорания является распыливание жидкого горючего.

Мелкость распыла жидкости, как известно, зависит от многих факторов: типа форсунки, конструкции и производительности, гидравлических характеристик, перепада давления и др. [49]. Тонкость распыла форсунки является качественным критерием, определяющим полноту сгорания топлива, и характеризуется среднемассовым диаметром образующихся капель. Чем меньше средний диаметр капель, тем лучше распыл и, соответственно, смешение и выгорание топлива будет более равномерным и полным.

Для конкретной конструкции форсунки диаметр капель зависит от диаметра сопла, вязкости распыляемой жидкости, плотности, поверхностного натяжения и плотности среды, в которую распыляется жидкость.

Для оценки тонкости распыла жидкости применяют различные методы, иногда сильно отличающиеся друг от друга. Наиболее распространенными прямыми методами измерения распыла являются: получение отпечатков капель на воспринимающей поверхности – пластине, покрытой слоем сажи; улавливание капель жидкости; замораживание капель и метод с использованием парафина; микрофотографирование капель. Обработка материалов, полученных при использовании этих методов, сводится к измерению диаметров либо самих капель, либо фотографий капель или их отпечатков. Полученный материал позволяет построить суммарные кривые распределения.

К косвенному и наиболее перспективному методу измерения мелкости распыла относится оптический метод, основанный на явлении рассеяния плоской монохроматической волны света каплями жидкости. Кривая, характеризующая интенсивность рассеянного света на углу (индикатриса рассеяния) может быть

использована для определения функции распределения капель по размерам в объеме аэрозоля, попадающего в световой пучок.

При больших значениях параметра $\rho=2\pi a/\lambda$ рассеяние света происходит в основном на малые углы. Например, при длине волны света $\lambda=0,6$ мкм каплю можно считать большой, если $a>3$ мкм, что справедливо даже для аэрозолей, получаемых акустическими форсунками. Свет, рассеянный на малый угол β_p от направления луча, не зависит от показателя преломления и других свойств жидкости и среды и имеет интенсивность:

$$I(\beta_p) = I_0 \alpha^2 \frac{J_1^2(\rho\beta_p)}{\beta_p^2}, \quad (4)$$

где I_0 – интенсивность падающего света;

$J_1(x)$ – функция Бесселя первого рода первого порядка.

В полидисперсной системе для однократного рассеяния, т.е. при не очень большой концентрации аэрозоля, интенсивности света от отдельных частиц суммируются, и, таким образом, индикатрису можно выразить формулой

$$\bar{I}(\beta_p) = \frac{I_0}{\beta_p^2} \int_0^\infty f(\alpha) \alpha^2 J_1^2(\rho\beta_p) d\alpha, \quad (5)$$

где $f(\alpha)$ – счетная функция распределения капель по размерам.

Верхний предел интеграла (5) может быть конечным, например, в случае аэрозолей с конечным верхним пределом. Условие однократного рассеяния можно контролировать согласно неравенству

$$\ln I_0 I \leq 3, \quad (6)$$

где I – интенсивность света в центральном пучке.

Рассматривая уравнение (5) как интегральное относительно $f(\alpha)$, получим его решение:

$$f(\rho) = -\frac{2}{\rho^2} \int_0^\infty \rho\beta_p J_1(\rho\beta) Y_1(\rho\beta_p) \varphi(\beta_p) d\beta_p \quad (7)$$

где

$$\varphi(\beta_p) = \pi \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^3 \frac{d}{d\beta_p} \left[\frac{\bar{I}(\beta_p)}{I_0} \beta_p^3 \right], \quad (8)$$

$Y_1(x)$ – функция Бесселя 2-го рода первого порядка.

Таким образом, по формуле (7) можно найти функцию распределения капель по размерам.

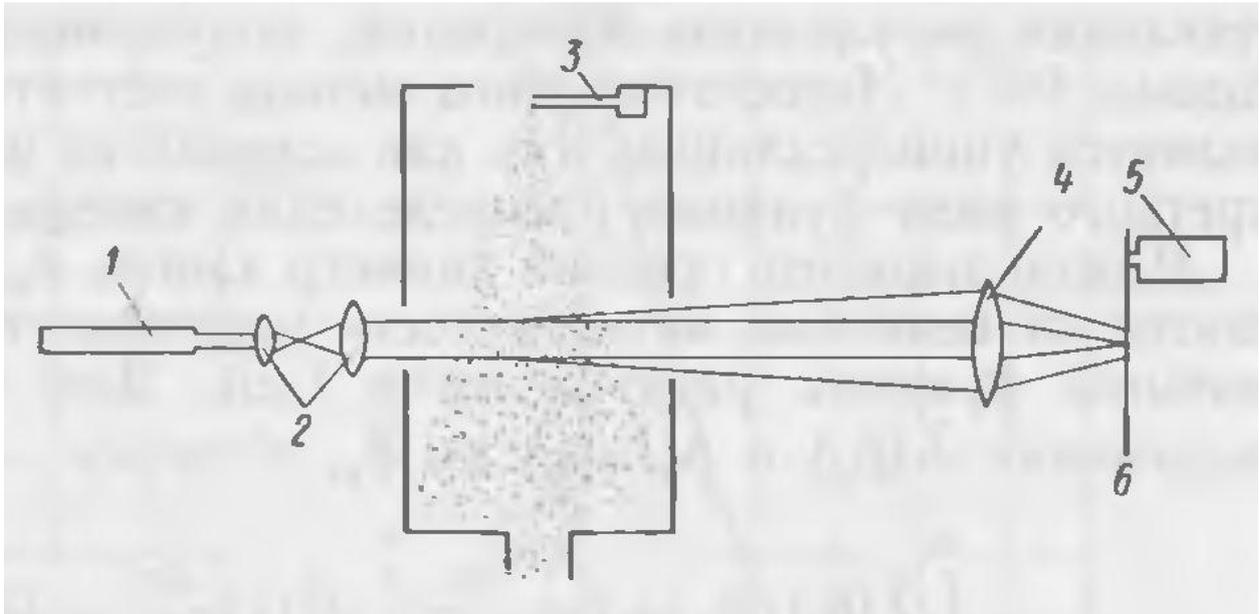


Рисунок 5. Схема установки для измерения индикатрисы рассеяния.

Установка (Рисунок 5) для измерения индикатрисы рассеяния света состоит из источника монохроматического света 1 (в настоящее время применяют оптические квантовые генераторы, например гелий-неоновый лазер, генерирующий электромагнитные колебания с длиной волны $\lambda=0,6$ мкм), оптической коллимирующей системой 2 с углом расхождения лучей менее 10^{-3} рад, распыливающего устройства 3, собирающей линзы 4, фотоприемника 5, расположенного в фокальной плоскости 6 собирающей линзы. В качестве фотоприемника используют фотоумножители или фотодиоды, сигналы с которых регистрируются на самописцах в зависимости от расстояния r между диафрагмой фотоприемника и осью луча, которое связано с углом $\beta_p = r/F$, где F —фокусное расстояние собирающей линзы, которое намного больше длины пути луча в рассеивающей среде. Измерение интенсивности света проводят вне фокального пятна (обычно $\beta_{p \min} \approx 10^3$ рад) до $\beta_{p \max} \approx 10^{-1}$ рад. При этом следует учесть световой фон, возникающий вследствие рассеяния света на элементах оптической системы.

Возможна регистрация интенсивности рассеянного света также на фотопленку с последующим фотометрированием. Полученные зависимости $I(\beta_p)$ обрабатываются по формулам (7),(8) на ЭВМ и получают функции распределения капель по размерам.

3.1.1 Описание установки для исследования распыла

Для исследования распыла керосина был спроектирован и изготовлен специальный каплеуловитель с вытяжной вентиляционной системой. Это объясняется необходимостью выполнения требований техники безопасности при гидравлических проливках форсунки и смесительной головки на керосине. Помимо этого оптические системы, используемые для регистрации распределения капель по размеру, необходимо защитить от попадания мельчайших капель воздушно-жидкостной смеси, которые возникают при распылении, на линзы приборов.

Каплеуловитель (*Рисунок б*) состоит из трубы, верхней крышки, в которую вмонтирована система подачи форсунки в рабочую область, двух отверстий для регистрации качества распыла, нижней крышки с патрубком слива керосина и системы принудительной вытяжки смеси с вентилятором во взрывозащищенном исполнении [61].

Вертикальное положение каплеуловителя исключает влияние гравитационных сил на факел распыла.

Керосин из системы подачи поступает в форсунку через трубку подачи. Крепление трубки в крышке позволяет регулировать положение форсунки относительно оси лазерной установки, т.е. исследовать качество распыла на разной длине факела. Вентилятор производительностью 2300 м³/мин высасывает смесь, обеспечивает при этом приток чистого воздуха из окружающей среды из боковых отверстий. В области расположения оптики возникают направленные воздушные потоки, препятствующие полету капель в сторону линз.

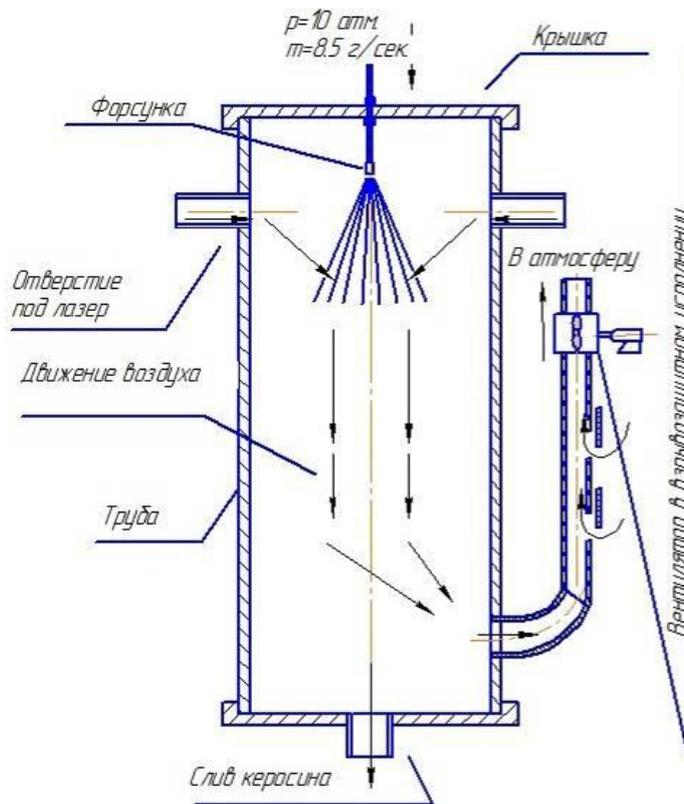


Рисунок 6. Схема каплеуловителя для исследования распыла керосина.



Рисунок 7. Внешний вид каплеуловителя с окном для лазерного луча.

Созданный каплеуловитель обеспечивает нормы безопасности, позволяет проводить замер дисперсности капель распыла керосина и исключает попадание капель компонента на регистрирующую аппаратуру и оптические линзы.

3.1.2 Лазерный измеритель дисперсности распыла капель

Система дистанционного лазерного измерителя обеспечивает регистрацию диаграммы рассеяния аэрозольного облака на расстоянии до 2 м от измерительного объёма. В результате математической обработки определяются размеры и концентрация входящих в облако частиц (фазодисперсный состав). Структурная схема системы измерения представлена на *Рисунке 8*.

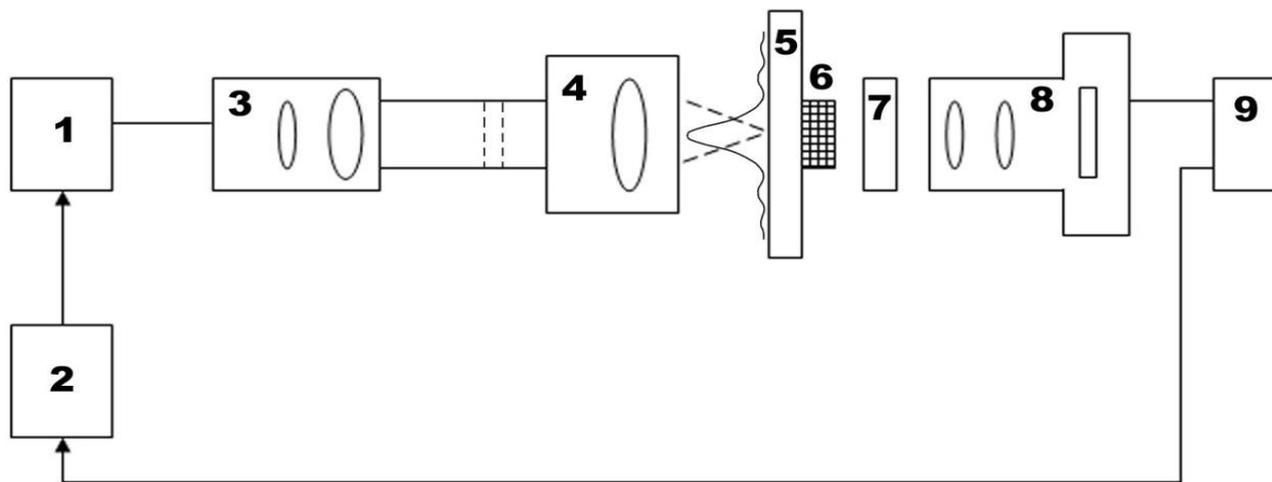


Рисунок 8. Структурная схема базового дистанционного лазерного измерителя.

1 – блок лазерных излучателей; 2 – блок управления лазерными излучателями; 3 – блок передающей оптики; 4 – блок приемной оптики; 5 – светорассеивающий экран; 6 – маска; 7 – фильтр; 8 – цифровой фотоаппарат; 9 – компьютер

Эта система содержит: блок лазерных излучателей 1, блок управления лазерными излучателями 2, блок передающей оптики 3, содержащий полевую диафрагму и в ряде случаев коллиматор, формирующий зондирующие лучи и размеры измерительного объёма, и блок приёмной оптики 4, содержащий Фурье-линзы. Фурье-линзы имеют фокусное расстояние 50-100 см, световой диаметр - 10-20 см. Фокусное расстояние линз, входящих в коллиматор, от 10 мм до 20 см. Как отмечалось ранее, из-за малых размеров частиц (2-10 мкм) и больших расстояний (до 2 м) диаметр наиболее информативной части пространственного спектра, в которой содержится около 90% энергии рассеянного излучения, получается более 20 см. Поэтому, чтобы зарегистрировать такой спектр

непосредственно на фотографическую матрицу, её надо изготавливать специально, а это приводит к большим затратам. Для того чтобы можно было регистрировать такой пространственный спектр серийным цифровым фотоаппаратом 8, в частотной плоскости блока приёмной оптики установлен светорассеивающий экран 5, визуализирующий пространственный спектр. Чтобы не вывести из строя матрицу фотоаппарата 8 прямым лазерным лучом, за рассеивающим экраном 5 в ряде случаев целесообразно установить маску 6, поглощающую прямое лазерное излучение. Иногда, чтобы уменьшить светорассеяние между элементами экрана 5, маску устанавливают до него. Для уменьшения влияния фоновой засветки перед объективом фотоаппарата 8 целесообразно (но необязательно) также установить интерференционный светофильтр 7. Отметим, что для двух длин волн излучения лазеров, светофильтр может быть сменным или специально изготовленным. Зарегистрированный цифровым фотоаппаратом 8 пространственный спектр поступает в компьютер 9, где с помощью специально разработанного программного обеспечения и вычисляются размеры и концентрации частиц аэрозольного облака. Управление лазерными излучателями также осуществляется через компьютер 9, в качестве которого для повышения мобильности системы используется ноутбук, или ручную.

На *Рисунке 9* показана принципиальная схема измерения дисперсности распыла. Передающий блок измерителя содержит полупроводниковый лазер 1 (красный, длина волны 650нм, тип лазера KLM-650/20) и полевую диафрагму диаметром 2мм, уменьшающую диаметр лазерного луча, зондирующего измерительный объем 3 с распыленными каплями керосина. Свет, рассеянный в прямом направлении 4 и под малыми углами, попадает на Фурье-линзу 5, в фокальной плоскости которой установлен экран 6. Фокусное расстояние Фурье-линзы 500 мм, световой диаметр 200 мм. Экран изготовлен из матированного с одной стороны стекла толщиной 3 мм размером 300х300мм.

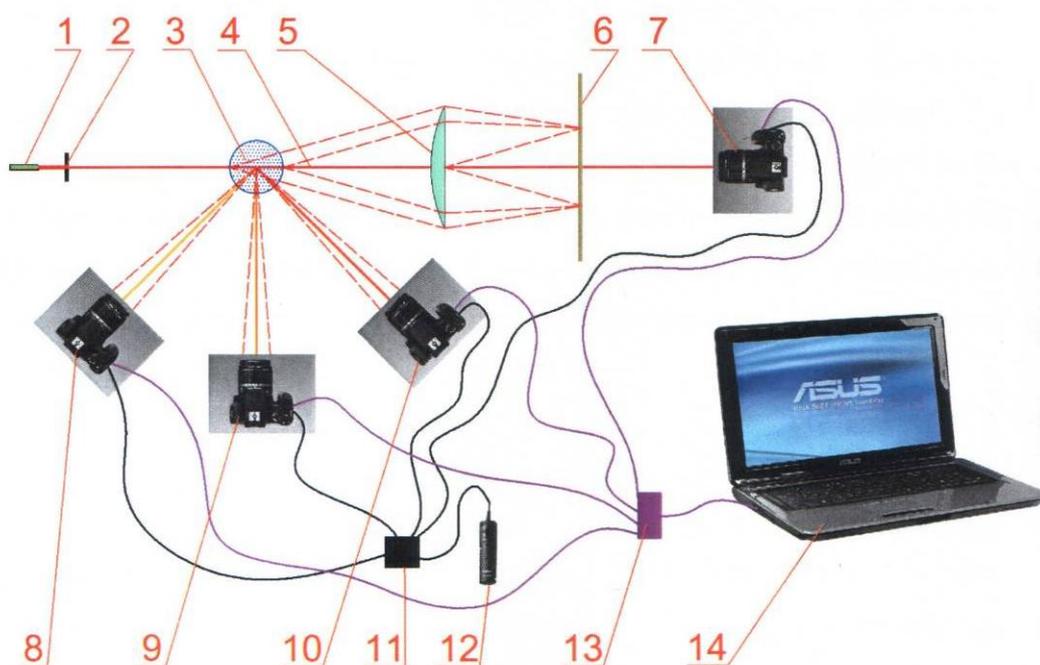


Рисунок 9. Принципиальная схема системы измерения распределения капель по размеру. 1- полупроводниковый лазер; 2 - диафрагма; 3 - измерительный объем; 4 - рассеянные лучи лазера; 5 - линза; 6 - экран; 7, 8, 9, 10 - цифровые фотоаппараты; 11 - коммутатор; 12 - пульт управления фотосъемкой; 13 - адаптер; 14 - компьютер.

Распределение интенсивности света в фокальной плоскости линзы (часть индикатрисы, соответствующая малому углу рассеяния) регистрируется цифровым фотоаппаратом 7 (CanonEOS1000P). Фурье-линза 5, экран 6 и цифровой фотоаппарат 7 входят в состав приемного оптоэлектронного блока, предназначенного для измерения характеристик дисперсности облака капель керосина в диапазоне измерений 1-10 мкм. Для диапазона измерений 0,2-2 мкм в приемный блок дополнительно вводятся: цифровой фотоаппарат 8, регистрирующий обратное рассеяние, фотоаппарат 9, регистрирующий рассеянный свет под прямым углом, и фотоаппарат 10, регистрирующий свет, рассеянный в прямом направлении, но при углах, превышающих 100° (т. е. при углах, выходящих за пределы малоуглового рассеяния). Отметим, что установка фотоаппаратов 8 и 10 под углами относительно главной оптической оси α и $180^\circ - \alpha$ позволяет использовать для измерения размеров аэрозоля метод асимметрии

индикатрисы рассеяния, что упрощает обработку результатов. Регистрация рассеянного света всеми фотоаппаратами производится одновременно. Это достигается благодаря применению коммутатора 11 и пульта управления фотосъемкой 12. Управление фотоаппаратами 7-10 осуществляется через USB разветвитель 13 компьютером 14. Возможен и ручной режим управления фотоаппаратами. Также через USB разветвитель 13 в компьютер 14 поступает информация, зарегистрированная этими фотоаппаратами, где по специальным программам она и обрабатывается.

Для обработки полученных изображений капель и расчета параметров дисперсности аэрозольного облака используется программа, разработанная в МАИ на кафедре 201 и реализованная на базе пакета MATLAB.

Лазерная установка монтируется на двух регулируемых по высоте столах, расположенных по разные стороны от каплеуловителя. Оси сканирующего луча попадают в отверстия каплеуловителя.

3.1.3 Методика проведения испытаний и результаты измерений

Для исследования влияния полимерной добавки на тонкость распыла керосина было выбрано 3 центробежных форсунки с разной геометрической характеристикой. Общий вид форсунки показан на *Рисунке 10*, геометрические размеры приведены в *Таблице 9*.

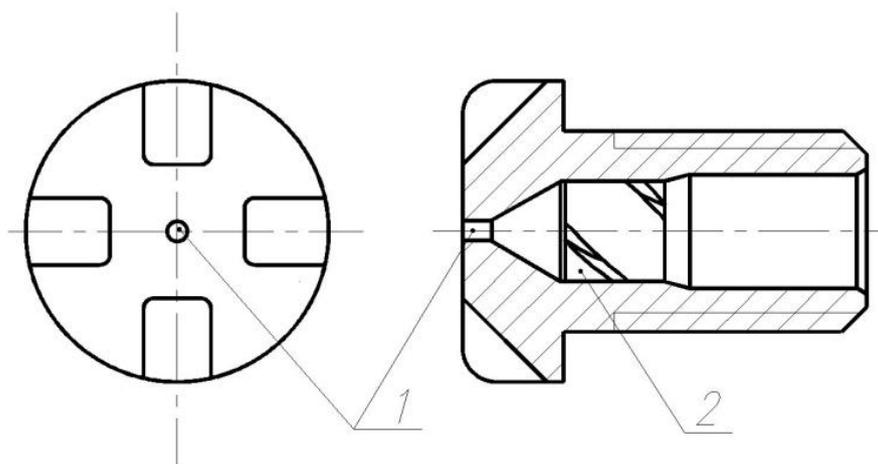


Рисунок 10. Общий вид форсунки. 1 - сопло; 2 - завихритель.

Таблица 9. Геометрические параметры форсунок.

	Диаметр сопла d , мм	Диаметр камеры закручивания $d_{кз}$, мм	Число каналов завихрителя, n	Геометрическая характеристика, A
№1	0,5	3	2	0,9
№2	0,7	3	2	1,27
№3	1,5	3	4	1,37

Мелкость распыла оценивалась в зависимости от следующих факторов $d_{32}=f(A, C\%, \Delta p)$, где - A - геометрическая характеристика; $C\%$ - концентрация добавки ПИБ в керосине; Δp - перепад давления на форсунке. Для оценки тонкости распыления используется диаметр Заутера d_{32} - диаметр такой теоретической капли, которая обладает таким же соотношением объем/поверхность, как общий объем всех капель к их суммарной поверхности.

Исследование проводилось с использованием двух критериев подобия:

$$\Pi_1 = \frac{u\varepsilon\rho_\Gamma}{\mu_\Gamma} \quad (9)$$

$$\Pi_2 = \frac{\sigma\varepsilon\rho_\Gamma}{\mu_\Gamma^2} \quad (10)$$

где $\varepsilon = \frac{r_c}{\cos \alpha} (1 - \sqrt{1 - \psi \cos \alpha})$ (11) - толщина жидкой пленки,

u - относительная осевая скорость истечения жидкости из форсунки;

ρ_Γ - плотность газа окружающей среды;

r_c - радиус сопла форсунки;

μ_Γ - коэффициент динамической вязкости газа;

α - угол распыла форсунки;

σ - коэффициент поверхностного натяжения;

$\psi = \frac{\dot{m}}{\pi r_c^2 \sqrt{2\rho\Delta p_j}}$ (12) - коэффициент расхода,

Δp_j - перепад давления на форсунке;

\dot{m} - массовый расход жидкости.

Эти критерии позволяют определить медианный и максимальный размеры капель и параметры функции распределения (по Розин-Рамлеру) [57]. Построенные на основе этого закона формулы являются довольно простыми и позволяют быстро вычислить средний размер капли в струе.

$$\frac{a_m}{\varepsilon} = (135 + 3,67 * 10^{-3} * P_2) * P_1^{-0,9} \quad (13)$$

где a_m - медианный диаметр капли.

Однако, формула (13) имеет границы применимости [57].

Эксперимент проводился для различных значений скорости жидкости. Регистрировались следующие газодинамические параметры: Q - расход $\Delta p_{ж}$ - перепад давления на форсунке, T_r - температура окружающего газа, ρ_r - плотность окружающего газа. Фотографированием определялся угол распыла. Лазерно-оптическим методом определялся средний размер капель d_{32} . Далее по формулам (8-11) определялись критерии подобия P_1 и P_2 .

Результаты измерений распыла образцов керосина и расчеты для каждой форсунки представлены в *Таблицах 10-Таблица 12*.

Таблица 10. Результаты распыла форсункой №1.

	Расход \dot{m} , г/с	Перепад давления $\Delta p_{ж}$, атм	Угол распыла, α	Диаметр Заутера, d_{32}	Коэф. расхода теор. $\Psi_{теор}$	Коэф. расхода эксп. $\Psi_{эксп}$	P_1	P_2 , $*10^3$
Обр. №1	1,9	2	30	-	0,35	0,529	89,5	7,72
	2,60	3,89	35	25	0,35	0,52	118	7,48
	3,15	5,71	45	15	0,35	0,52	140	7,32
	3,65	7,65	45	15	0,35	0,52	161	7,24
	4,11	9,7	45	13	0,35	0,52	181	7,24
Обр. №2	0,82	2,8	струя	-	0,35	0,193	-	-
	1,096	4,8	струя	-	0,35	0,197	-	-

	1,79	11,2	струя	-	0,35	0,2	-	-
Обр. №3	0,54	3,2	струя	-	0,35	0,12	-	-
	0,89	5,7	струя	-	0,35	0,14	-	-
	1,25	13,2	струя	-	0,35	0,136	-	-
Обр. №4	Нет расхода		-					

Таблица 11. Результаты распыла форсункой №2.

	Расход q , г/с	Перепад давления $\Delta p_{ж}$, атм	Угол распыла, α	Диаметр Заутера, d_{32}	Коэф. расхода теор. $\Psi_{теор}$	Коэф. расхода эксп. $\Psi_{эксп}$	Π_1	Π_2 , $*10^3$
Обр. №1	2,4	2,6	45	-	0,38	0,29	46	5,6
	2,86	3,85	50	40	0,38	0,29	54	5,4
	3,4	5,65	75	30	0,38	0,288	61	5,2
	3,82	7,2	75	30	0,38	0,286	68	5,16
	4,42	9,6	75	30	0,38	0,287	79	5,18
Обр. №2	2,87	2,96	струя	-	0,38	0,335	-	-
	3,57	5,6	струя	-	0,38	0,303	-	-
	5,2	11,8	25	34	0,38	0,304	105	5,8
Обр. №3	3,25	2,94	струя	-	0,38	0,381	-	-
	4,22	4,9	струя	-	0,38	0,383	-	-
	5,4	8,86	струя	-	0,38	0,365	-	-
	6,4	12,8	10	-	0,38	0,36	-	-
Обр. №4	7,84	3,45	струя	-	0,38	0,849	-	-
	11,17	5,3	струя	-	0,38	0,97	-	-
	14,92	9,1	струя	-	0,38	0,9	-	-

Таблица 12. Результаты распыла форсункой №3.

	Расход q , г/с	Перепад давления $\Delta p_{ж}$, атм	Угол распыла, α	Диаметр Заутера, d_{32}	Коэф. расхода теор. $\Psi_{теор}$	Коэф. расхода эксп. $\Psi_{эксп}$	Π_1	Π_2 , $\cdot 10^3$
Обр. №1	6,4	1,88	60	-	0,4	0,204	39	7,9
	8,7	3,42	75	38	0,4	0,206	53	7,9
	10,15	4,4	85	32	0,4	0,212	63	8
	14,1	7,65	85	32	0,4	0,22	93	8,5
Обр. №2	6,45	2,5	35,4	-	0,4	0,179	35	7,05
	8,73	4,56	65,7	-	0,4	0,179	46	6,9
	11,5	8,2	70,8	40	0,4	0,176	60	6,8
Обр. №3	7,84	3,45	22	-	0,4	0,185	-	-
	10,93	5,3	24	-	0,4	0,208	-	-
	14,94	9,1	46	48	0,4	0,217	99	8,5
Обр. №4	7,073	2,4	струя	-	0,4	0,2	-	-
	11,04	4,64	струя	-	0,4	0,224	-	-
	14,61	7,6	18	-	0,4	0,23	-	-
	16,36	10,3	23	-	0,4	0,223	-	-

В результате анализа полученных критериев подобия Π_1 и Π_2 и сравнения экспериментальных и расчетных значений среднего размера капель a_m можно сделать вывод, что формула (13) работает только для форсунки №1 и чистого керосина (образец №1). В остальных случаях для исследуемых форсунок полученные критерии не удовлетворяют границам применимости и не могут быть использованы для оценки мелкости распыла керосина с полимерной добавкой [57].

Высокомолекулярные добавки в жидкости замедляют ее разрушение. Подавление дробления и распыления жидкости наблюдается в разных типах течения, в том числе при течении низко- и высокоскоростных струй, свободных

пленок, при воздействии высокоскоростных аэродинамических потоков на объемы жидкости [56]. В этом же источнике сообщается о корреляции между эффектом снижения турбулентного трения при помощи полимерных добавок (эффект Томса) и повышением устойчивости к распаду высокоскоростной струи керосина при помощи тех же добавок.

Экспериментальные зависимости расхода керосина с различной концентрацией добавки полимера от перепада давления для форсунки №2, представленные на *Рисунке 11*, свидетельствуют о том, что с увеличением концентрации добавки расход увеличивается при постоянном перепаде давления. Распыл с увеличением концентрации добавки заметно ухудшается. Ранее, в [61] сообщалось об улучшении качества распыливания центробежной форсункой. Однако, использование форсунки одной геометрии, а также небольшое количество экспериментов не позволяют сделать однозначное и верное заключение о влиянии полимера на мелкость распыливания.

Опытные данные, полученные для различных форсунок, перепадов давлений и концентраций полимера в керосине дают более полное представление о характере течения жидкости с присадкой.

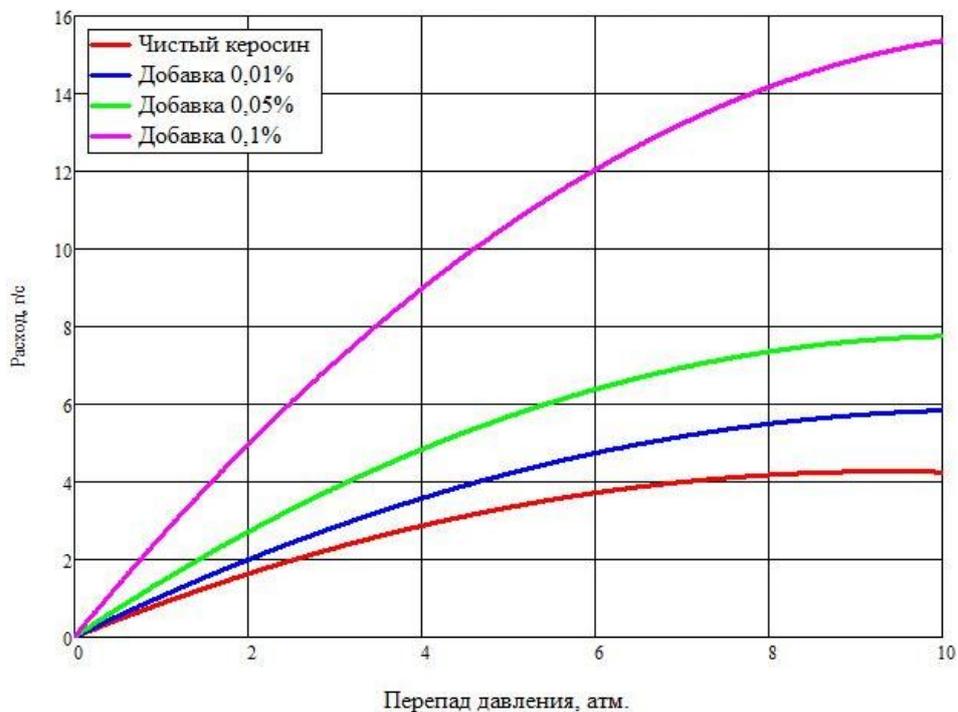


Рисунок 11. Расходная характеристика форсунки №2.

Основным фактором, оказывающим наибольшее влияние на распыл является вязкость. Несмотря на микроскопическое содержание полимера в растворе, вязкость керосина существенно возрастает, и она тем больше, чем выше молекулярная масса добавляемого полимера.

Из-за вязкости жидкости на стенке камеры закручивания возникают силы трения, направленные в сторону, противоположную скорости течения. Момент сил трения вызывает уменьшение момента количества движения, который на входе в сопло становится меньше, чем на входе в камеру закручивания. При этом уменьшается радиус воздушного вихря, возрастает коэффициент расхода и убывает угол факела распыла. Таким образом, в центробежной форсунке в результате трения о стенки камеры закручивания расход реальной вязкой жидкости больше, чем идеальной. При переходе от идеальной жидкости к вязкой коэффициент расхода центробежной форсунки возрастает, а угол факела распыла уменьшается, причем тем сильнее, чем больше комплекс θ , характеризующий влияние трения жидкости о стенки камеры закручивания на момент количества движения [49]:

$$\theta = \frac{\lambda_k}{2} A_d \left(\frac{R_k}{r_c} - 1 \right) \quad (14)$$

где A_d - действующая характеристика форсунки;

λ_k - коэффициент трения;

R_k - радиус камеры закручивания;

r_c - радиус сопла форсунки.

Коэффициент трения в центробежных форсунках больше, чем в гладких трубах. Это объясняется тем, что в центробежной форсунке пограничный слой образуется в условиях значительного поперечного градиента давления, вызывающего в пограничном слое появление радиальных токов, направленных из области с малыми (на периферии камеры закручивания) в область с большими значениями окружной скорости (вблизи сопла).

По мере увеличения камеры закручивания возрастает поверхность трения и, как следствие, уменьшается момент количества движения потока жидкости,

поступающего в сопло форсунки. При этом увеличивается коэффициент расхода и снижается угол факела распыливания. Кроме того, с увеличением диаметра соплового отверстия возрастают и размеры капель. Что и наблюдалось во время экспериментов.

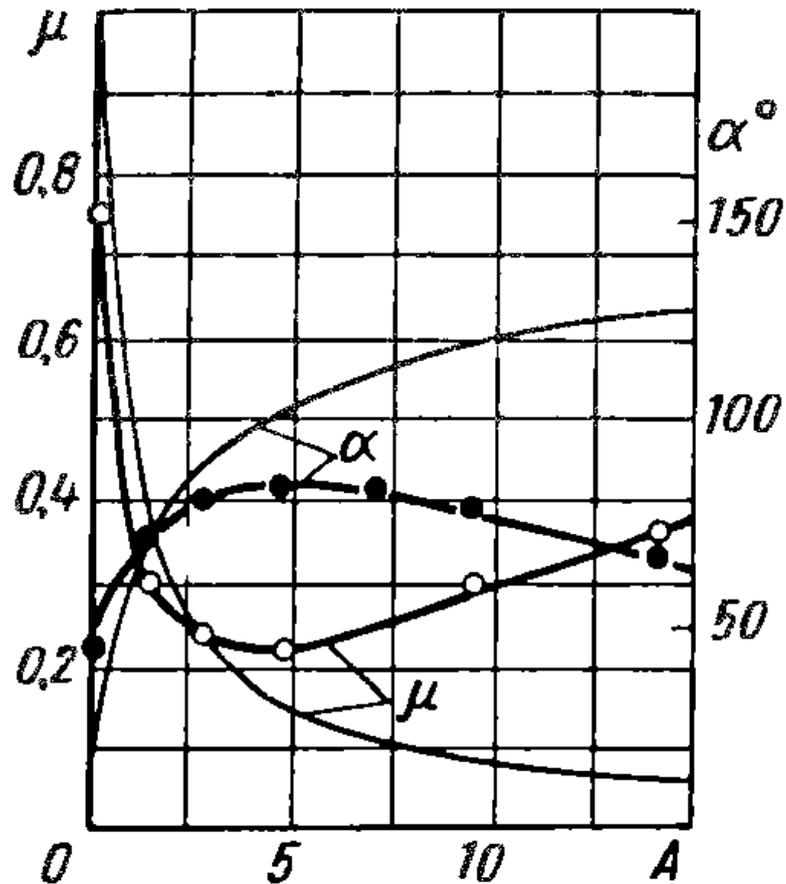


Рисунок 12. Зависимость коэффициента расхода и угла распыливания для идеальной и вязкой жидкости [49].

Аналогичные выводы были сделаны и в [58] для одной геометрической характеристики форсунки. Однако, для случая с форсункой № 1 наблюдается обратная картина. С увеличением концентрации добавки ПИБ происходит уменьшение расхода через форсунку и увеличивается перепад давления (Рисунок 13).

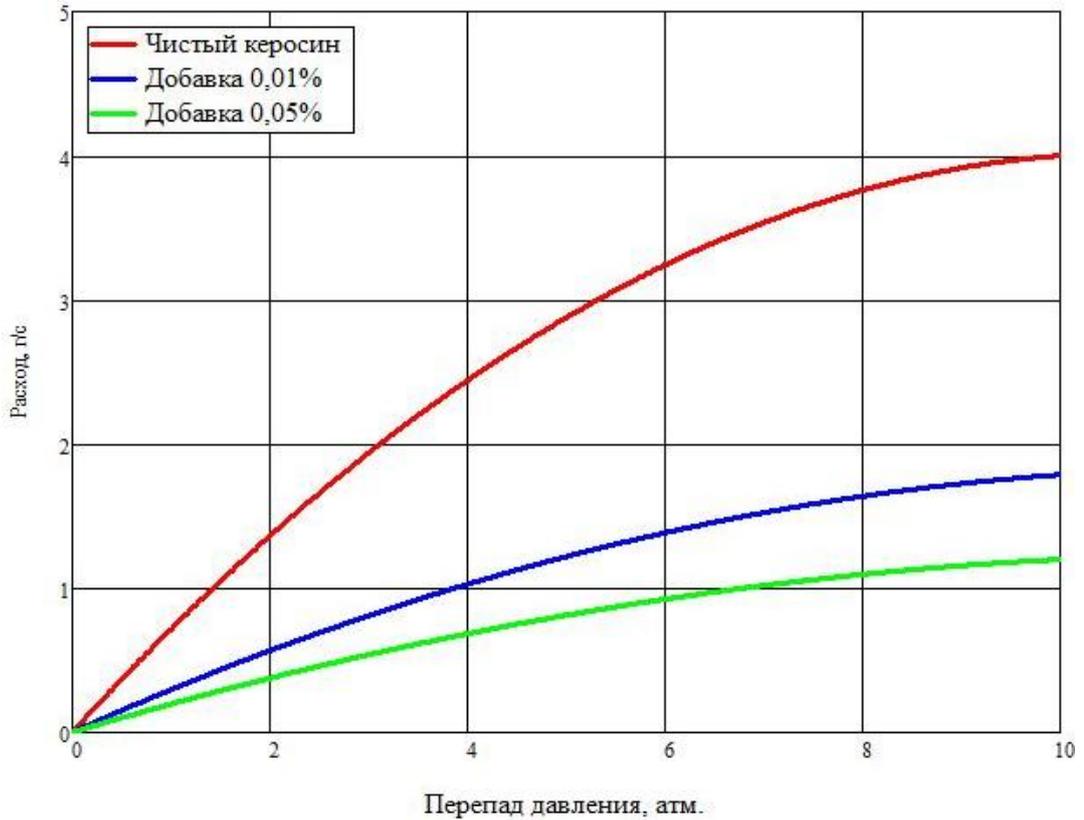


Рисунок 13. Расходная характеристика форсунки №1.

Снижение коэффициента расхода в форсунке №1 при увеличении вязкости можно объяснить большой степенью закрытия форсунки. Суммарная площадь проходных каналов навивки завихрителя более чем в 3 раза превышает площадь сопла форсунки. Таким образом, при увеличении вязкости раствора, перепад давления срабатывается не на тангенциальных каналах завихрителя, а в сопле. Отсюда следует, что вся камера закручивания была заполнена жидкостью, газовый вихрь и закрутка отсутствовали. С увеличением вязкости (концентрации полимера) и уменьшением диаметра сопла форсунки вязкостное трение возрастает настолько, что начинают смыкаться пограничные слои. Течение особо вязкой жидкости в центробежной форсунке с большой степенью закрытия уже не подчиняется законам циркуляции, принятым для расчета центробежных форсунок [49]. Дальнейшее уменьшение диаметра сопла (или увеличение вязкости жидкости) снижает коэффициент расхода, как это происходило бы при струйном течении [59]:

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{K + \lambda \frac{l_c}{d_c}}} \quad (15)$$

где, K - потери, связанные с перестроением профиля скорости, сжатием и расширением потока;

λ - коэффициент линейного гидравлического сопротивления форсунки;

d_c - диаметр сопла форсунки;

l_c - длина сопла.

Похожая ситуация наблюдается и на мелкоячеистых фильтрах [61]. Проведенные гидравлические испытания влияния присадки ПИБ на сопротивление магистрали диаметром 4 мм с использованием 7 мкм фильтра показали следующий результат (*Рисунок 14*).

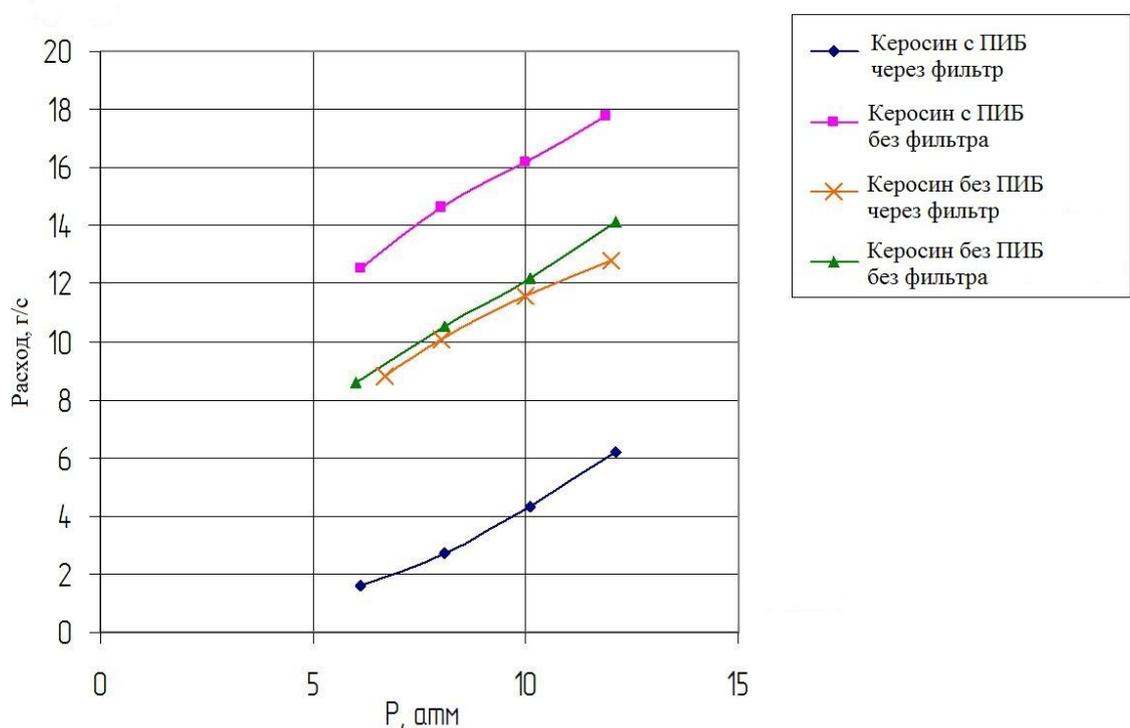


Рисунок 14. Зависимость расхода компонента от давления наддува в баке.

Из результатов видно, что мелкоячеистый фильтр (размер ячейки 7 мкм) дает значительное увеличение гидравлических потерь даже на небольшой длине магистрали огневого стенда. При использовании подобных фильтров в больших ЖРД гидравлическое сопротивление будет существенным.

3.2 Исследование влияния добавки полиизобутилена к керосину на полноту сгорания топлива

3.2.1 Описание огневого стенда для испытаний ЖРДМТ

Действующий огневой испытательный стенд на кафедре «Ракетные двигатели» факультета «Двигатели летательных аппаратов» МАИ предназначен для испытаний жидкостных ракетных двигателей малых тяг [62]. На стенде используются такие топливные пары как:

- газообразный кислород (расход до 75 г/с) + керосин (расход до 140 г/с);
- перекись водорода (ВПВ, 96%), (расход до 170 г/с) + керосин, (расход до 140 г/с);
- газообразный кислород (расход до 75 г/с) + газообразный метан, (расход до 15 г/с).

Указанные выше компоненты являются экологически чистыми, стабильны и не требуют особых условий хранения, не разлагаются (кроме ВПВ – продукты разложения кислород и вода).

На стенде организована вытеснительная система подачи компонентов. В огневом боксе предусмотрены системы аварийного пожаротушения и принудительной приточно-вытяжной вентиляции с возможностью ежеминутной замены объема газа в огневом боксе после запуска двигателя.

В системе подачи как для горючего, так и для окислителя предусмотрены отдельные магистрали для организации завесного охлаждения камеры сгорания. Современные регуляторы расхода кориолисовые Bronkhorst High-Tech CORIFLOW; и термомассовые Bronkhorst High-Tech IN-FLOW позволяют выдерживать заданный расход, несмотря на падение давления в полостях системы наддува, а также регулировать расход компонентов в темпе эксперимента.



Рисунок 15. Пульт управления огневым испытательным стендом.

Основными особенностями стенда являются:

1) Работа на импульсных режимах с фиксированием значения тяги с применением силоизмерительного устройства (СИУ).

СИУ (Рисунок 16) предназначено для преобразования импульсных циклических сил сжатия в пропорциональный электрический сигнал в измерительных преобразователях импульсных сил тяги, возникающих в силоизмерительном устройстве при испытаниях ЖРД МТ. Диапазон преобразуемых амплитуд импульсных сил 0...1800Н. Питание датчика осуществляется напряжением постоянного тока от 5 до 10В.

Силоизмерительное устройство в совокупности с программно-вычислительным комплексом обеспечивает прямое определение измеряемой силы тяги КС в ходе огневых испытаний.

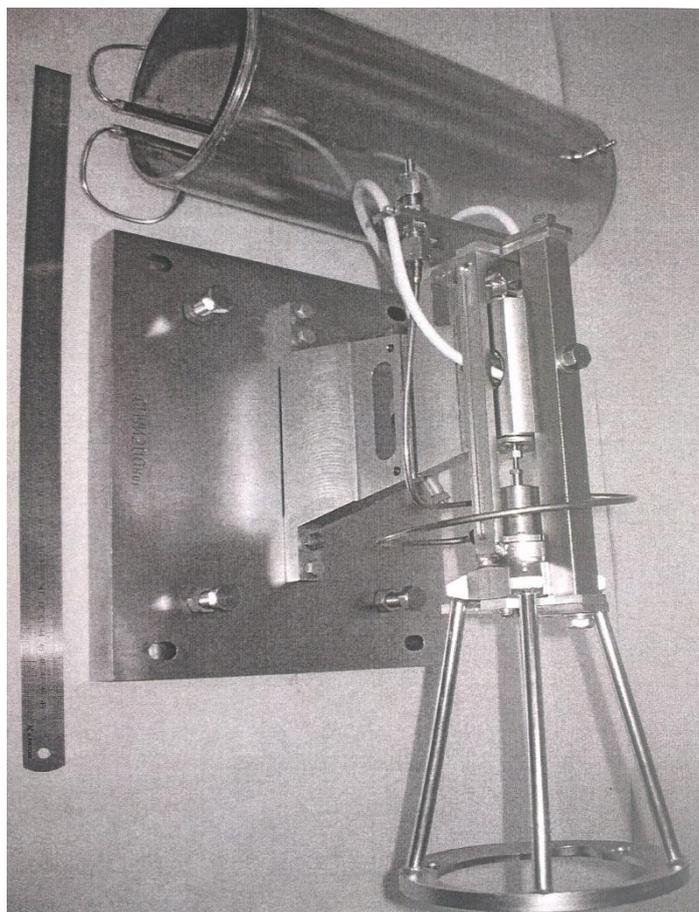


Рисунок 16. Внешний вид тягоизмерительного устройства.

2) Автоматизированная измерительно-информационная система управления стендом, сбора и обработки данных.

Стендовая измерительно-информационная система (ИИС) представляет собой совокупность средств измерений, объединенных общим алгоритмом функционирования и предназначенных для автоматического получения информации от двигателя и стендовых систем, ее преобразования для непосредственного восприятия человеком, использования для управления режимами работы двигателя, а также для передачи, обработки и представления измерительной информации в той или иной форме.

ИИС стенда разрабатывалась и внедрялась совместно с отделом автоматизации экспериментов МАИ. Структурная схема ИИС представлена на *Рисунке 17.*

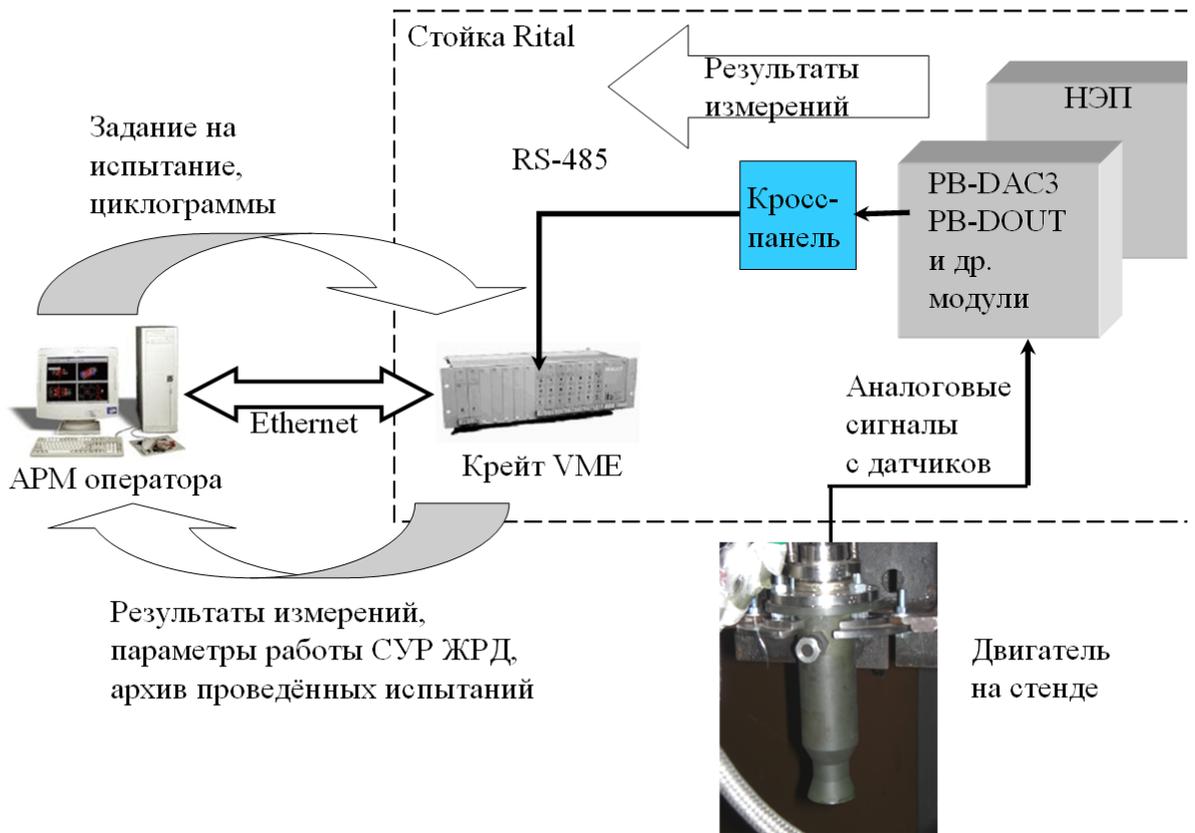


Рисунок 17. Структурная схема ИИС.

Условно реализованный комплекс можно разделить на следующие подсистемы:

1. Измерительная подсистема, получающая значения температур поверхности стенки ЖРДМТ, давлений в трубопроводах и КС двигателя, токов и напряжений клапанов, тяги ЖРД, расходов компонентов;
2. Подсистема сбора данных, позволяющая собирать результаты измерений как аналоговых, так и дискретных величин, поступающих с датчиков;
3. Подсистема управления, осуществляющая испытания в ручном и автоматическом режимах по заданной циклограмме;
4. Подсистема контроля испытаний в реальном времени, отслеживающая все измеряемые параметры, отображающая их в удобном для экспериментатора виде (таблицы, графики);
5. Подсистема формирования отчетов о проведенных испытаниях, печати и архивирования протоколов экспериментов.
6. Подсистема трансляции испытаний в режиме реального времени.

В аппаратно-программном комплексе применяется следующее программное обеспечение (Рисунок 18):

1. ПО ExperimentAllyser отвечает за связь с контроллером ИИС, является общим сервером данных и осуществляет передачу управляющих сигналов с ПО в контроллер;
2. ПО OscilAllyser используется для проверки преобразованных аналоговых сигналов и настройки датчиков;
3. ПО Wonderware SCADA-Intouch осуществляет контроль и частичное управление испытаниями в удобном графическом интерфейсе;

ПО Experiment Manager служит для задания программы испытаний и циклограмм, и отвечает за общее проведение испытаний.

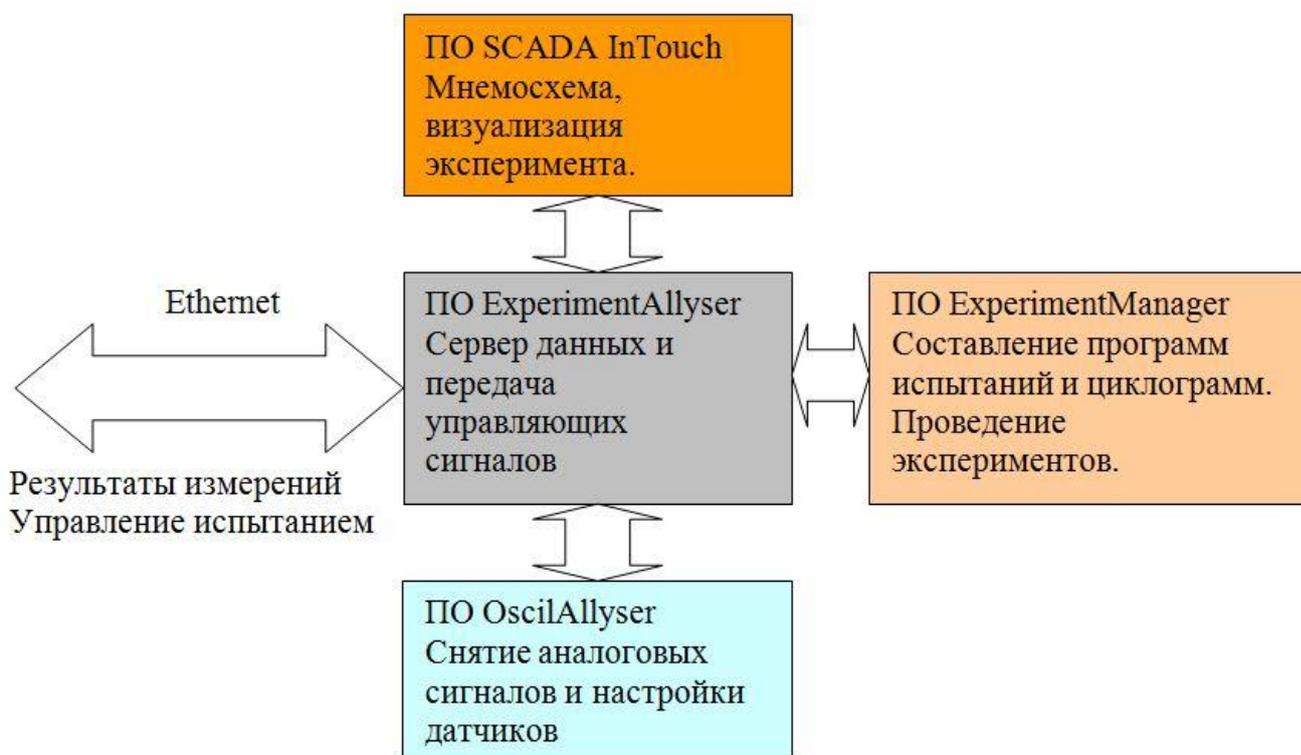


Рисунок 18. Структурная схема программного комплекса.

Управление стендом осуществляется в автоматическом режиме через систему фирмы Wonderware SCADA InTouch. SCADA (аббр. от англ. Supervisory Control And Data Acquisition, диспетчерское управление и сбор данных) – система контроля и управления процессом с применением ЭВМ. SCADA InTouch - программное обеспечение для разработки интерфейса человек-машина (HMI).

НМІ позволяет контролировать и управлять всеми объектами и системами, используя графические объекты, и включает:

- отображение параметров для управления сигналами;
- отображение текущих и исторических трендов;
- отображение и регистрацию аварийных сигналов.

Исполнительная система InTouch поддерживает базу данных текущих значений процесса. Эти значения могут отражать заданные точки контроля устройств, представляющие параметры физического объекта, или точки, представляющие расчетные значения. Значения параметров собираются и обрабатываются на одном или нескольких компьютерах, использующих распределенную структуру программного обеспечения. Автоматически выполняются преобразования инженерных единиц собранных данных и обратные преобразования инженерных единиц для задания управляющих установок. InTouch предоставляет набор инструментов для графического отображения состояния процесса. Графические объекты могут быть анимированы с использованием таких динамических атрибутов, как цвет, положение, движение, мигание, вращение, заполнение, указатели или процедуры для активации программ пользователя. SCADA-система InTouch позволяет организовать взаимодействие с другими приложениями.

Разработанный НМІ-интерфейс для огневого стенда ЖРДМТ представлен на *Рисунке 19*. В интерфейсе представлена схема пневмогидравлической системы с основными измерительными параметрами:

- давление в баках компонентов;
- статическое и динамическое давление в магистрали;
- массовые расходы компонентов;
- температуры компонентов в магистрали;
- токи клапанов двигателя;
- тяга двигателя;
- температуры конструкции двигателя.

Программное обеспечение обеспечивает мониторинг основных измеряемых величин по времени во время и после проведения эксперимента с заданным интервалом опроса. Интерфейс позволяет запускать нужные циклограммы в ходе одного эксперимента. По окончании испытания формируется отчет в сжатой и в полной формах с задаваемым шагом по времени.

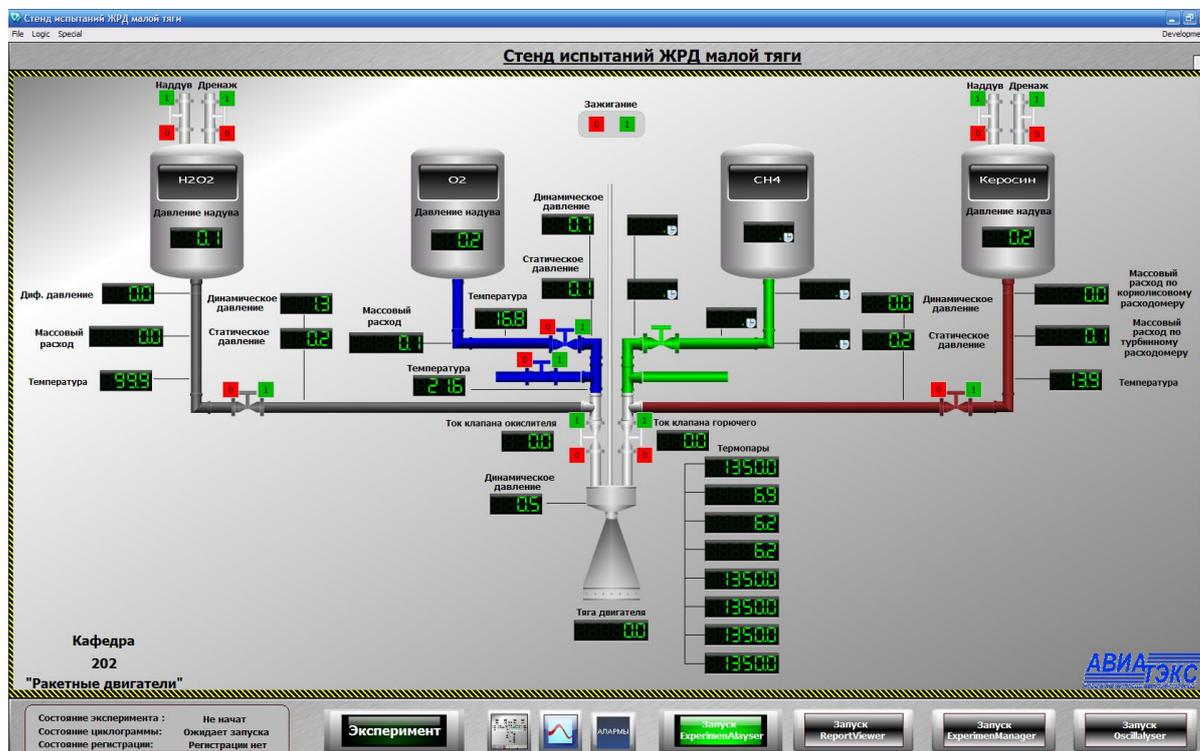


Рисунок 19. Интерфейс программы SCADA-Intouch.

3) Система измерения на современных датчиках.

В систему измерения входят следующие датчики:

1. Расходомеры;

- кориолисовые массовые расходомеры (Bronkhorst High-Tech CORIFLOW);
- турбинные расходомеры (Hoffer Flow Controls);
- термомассовые расходомеры (Bronkhorst High-Tech IN-FLOW);
- дифференциальные расходомеры;

2. Датчики давления:

- тензометрические (ЗАО «ОРЛЭКС», SensysCorp);
- пьезоэлектрические (НИИ ФИИ г. Пенза);

3. Термометры сопротивления для определения температуры компонентов и конструкции;

4. Датчики тока и напряжения клапанов.

Для измерения давления используются два типа датчиков:

- высокочастотные (1000 Гц), с ошибкой (0,5%);
- низкочастотные (1-10 Гц), с высокой точностью (0,03%).

Стенд огневых испытаний ЖРДМТ, работающий с экологически чистыми компонентами топлива (газообразный кислород, высококонцентрированная перекись водорода, керосин, газообразный метан), и оснащенный современной измерительно-информационной системой, позволяет на современном уровне провести научные работы по исследованию влияния полимерных добавок к керосину на полноту сгорания топлива.

3.2.2 Описание конструкции смесительной головки

Для оценки степени влияния добавки полиизобутилена к керосину на полноту сгорания топлива был разработан двигатель ДМТ МАИ-200-7ОК на несамовоспламеняющихся компонентах газообразный кислород и керосин (*Рисунок 20*).

Двигатель собран по технологии пайки. Блок из четырех пластин – горючего, окислителя, верхней распределительной пластины и крышки помещается в корпус-фланец, где места соединения свариваются аргонодуговой сваркой. В головке имеется шесть двухкомпонентных центробежных форсунок с внутренней ступенью горючего и внешней открытой ступенью окислителя (*Рисунок 21*). Компоненты поступают в форсунки по фрезерованным тангенциальным каналам в пластинах О и Г. Для воспламенения смеси предусмотрена форкамера (8) в центральной части смесительной головки, куда, аналогично форсункам, тангенциально подаются окислитель и горючее. Зажигание происходит за счет электрического разряда в свече, расположенной в открытой части форкамеры. Расход горючего в центральную часть для воспламенения регулируется съемной

штулкой с заданными диаметрами входных отверстий. Свеча работает от электрического высоковольтного разрядника с частотой 200 Гц и напряжением 100 кВ.

Особенностью конструкции данной смесительной головки является отдельный штуцер подачи компонента для завесного охлаждения камеры сгорания. Это дает возможность не только регулировать расход в завесу вне зависимости от расходов в центральную часть, но и использовать любой компонент в качестве охладителя внутренней стенки КС.

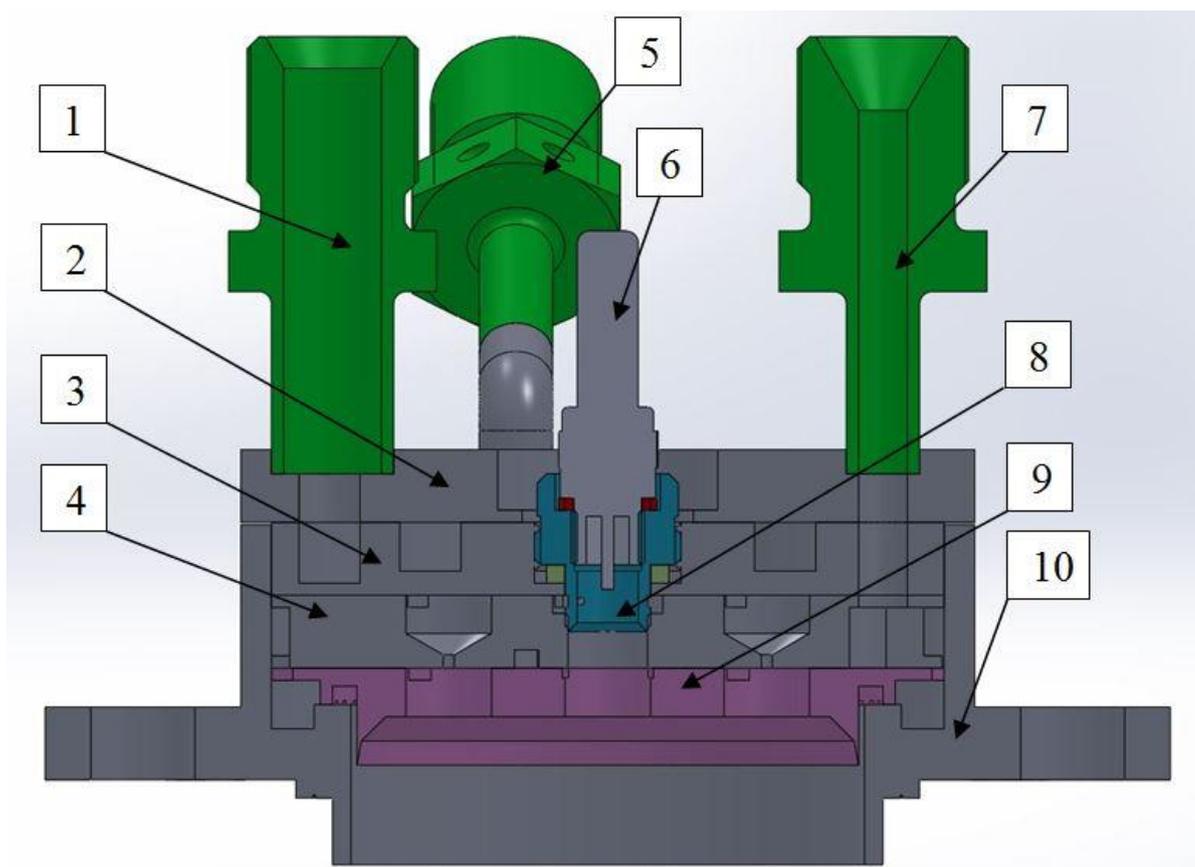


Рисунок 20. Вид модели смесительной головки. 1 – штуцер подвода окислителя; 2 – крышка головки; 3 – распределительная пластина; 4 – пластина горючего; 5 – штуцер подвода горючего; 6 – свеча зажигания; 7 – штуцер подвода компонента в завесу; 8 – форкамера; 9 – пластина окислителя; 10 – корпус-фланец.

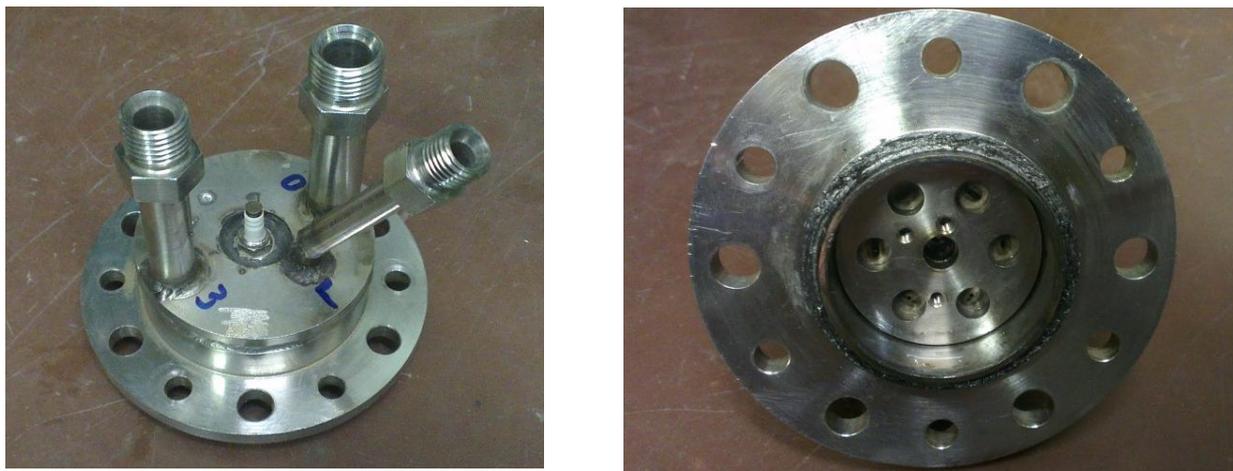


Рисунок 21. Внешний вид смесительной головки.

Через коллектора в распределительной пластине горючее и окислитель поступают в подводящие полости соответствующих пластин (*Рисунок 22*). Таким образом с помощью шести отдельных отверстий в распределительной пластине осуществляется подвод компонентов непосредственно к каждой форсунке, обеспечивая тем самым равномерное распределение компонентов.

Также для равномерного распределения компонента, подаваемого в завесу, в пластине О имеются пазы, выполненные таким образом, чтоб при выходе компонента из коллектора завесы он равномерно распределялся по всему диаметру смесительной головки (*Рисунок 23*).

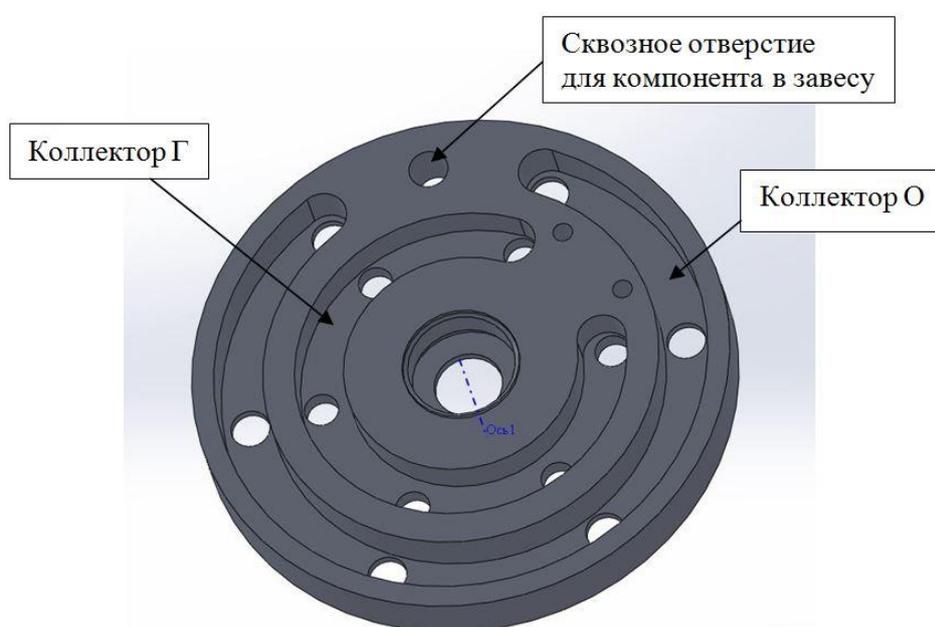


Рисунок 22. Пластина распределительная.

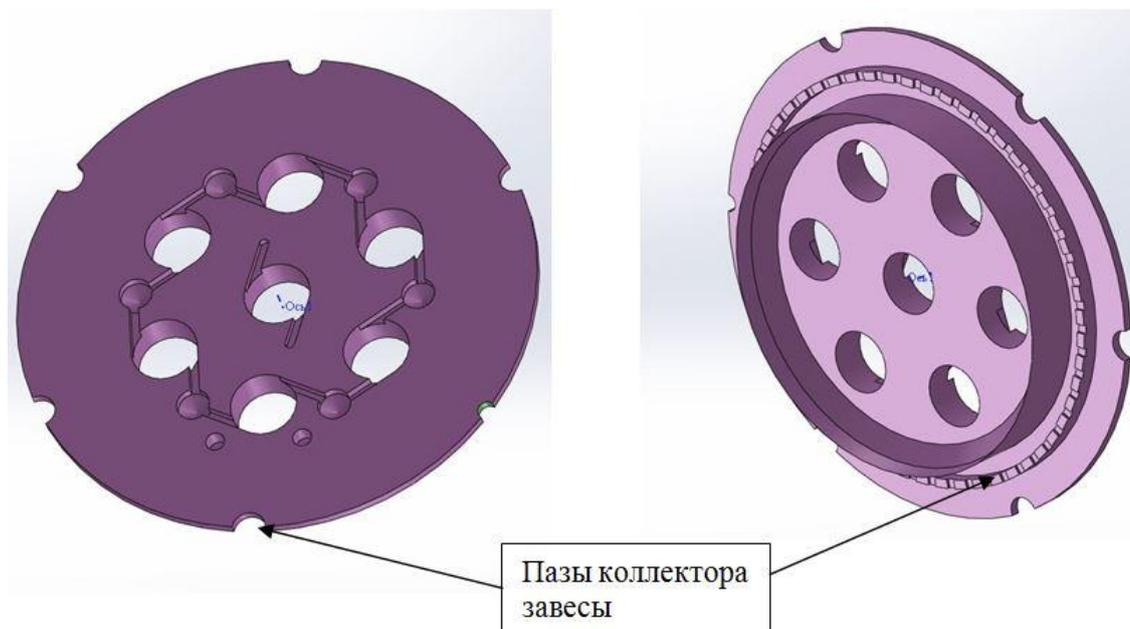


Рисунок 23. Пластина окислителя.

Смесительная головка соединяется с камерой сгорания через уплотнительное кольцо. Для равномерной затяжки болтов по фланцу и обеспечения герметичности стыка камеры сгорания и смесительной головки используется динамометрический ключ. Во время опрессовки двигателя штуцера подвода компонентов заглушаются, также перекрывается камера сгорания со стороны среза сопла с помощью глухого резинового уплотнения, притягиваемого шпильками к фланцу. Наддув производится через штуцер для замера давления в КС. При опрессовке проверяется уплотнение в месте соединения камеры со смесительной головкой и в месте установки свечи зажигания. Внешний вид камеры сгорания и сборка двигателя представлены на *Рисунках 24* и *25* соответственно.



Рисунок 24. Внешний вид камеры сгорания.

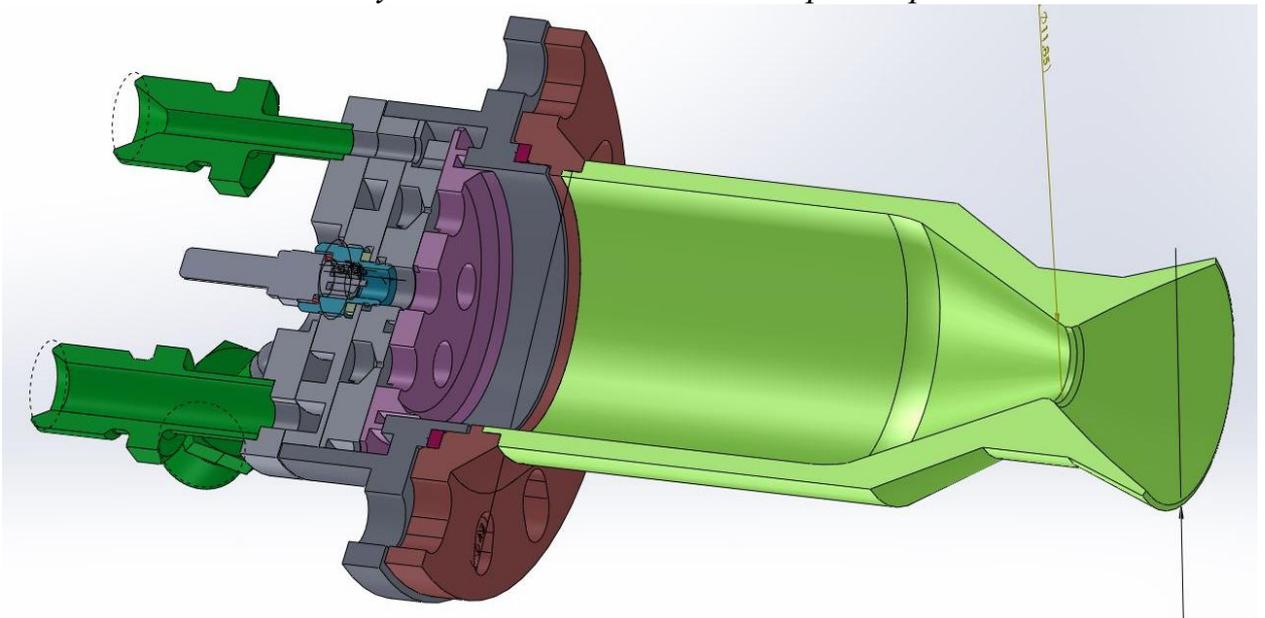


Рисунок 25. Сборка двигателя.

3.2.3 Результаты огневых экспериментов и теоретических расчетов

Огневые эксперименты проводились на камере сгорания с подрезанной сопловой частью. Такая методика проведения испытания позволяет проверить работоспособность самой камеры сгорания при длительных работах без использования дорогостоящего вакуумного оборудования.

В процессе экспериментов определялся расходный комплекс $\beta_s = f(P_k, m_{\Sigma}, k_m)$ двигателя ДМТ МАИ-200-70К с использованием в качестве горючего стандартного керосина - обр. №1; и керосина с присадкой полиизобутилена, -

обр.№3 (концентрация полимера 0,05%). Основными измеряемыми величинами являлись: установившееся давление в камере сгорания и расходы окислителя и горючего.

После гидравлических проливов на чистом керосине и керосине с полимерной присадкой было выявлено, что скорости при расходах керосина с добавкой ПИБ, характерных для исследуемого ЖРД МТ, лежат в зоне чисел Рейнольдса, не превышающих критического значения для наступления эффекта снижения гидросопротивления.

Для исследуемого двигателя номинальными расходами керосина являются ~20 и ~10 г/с для завесы и форсунок соответственно, при условии 30% керосина на завесу и суммарной альфа $\alpha\Sigma \approx 0,7$.

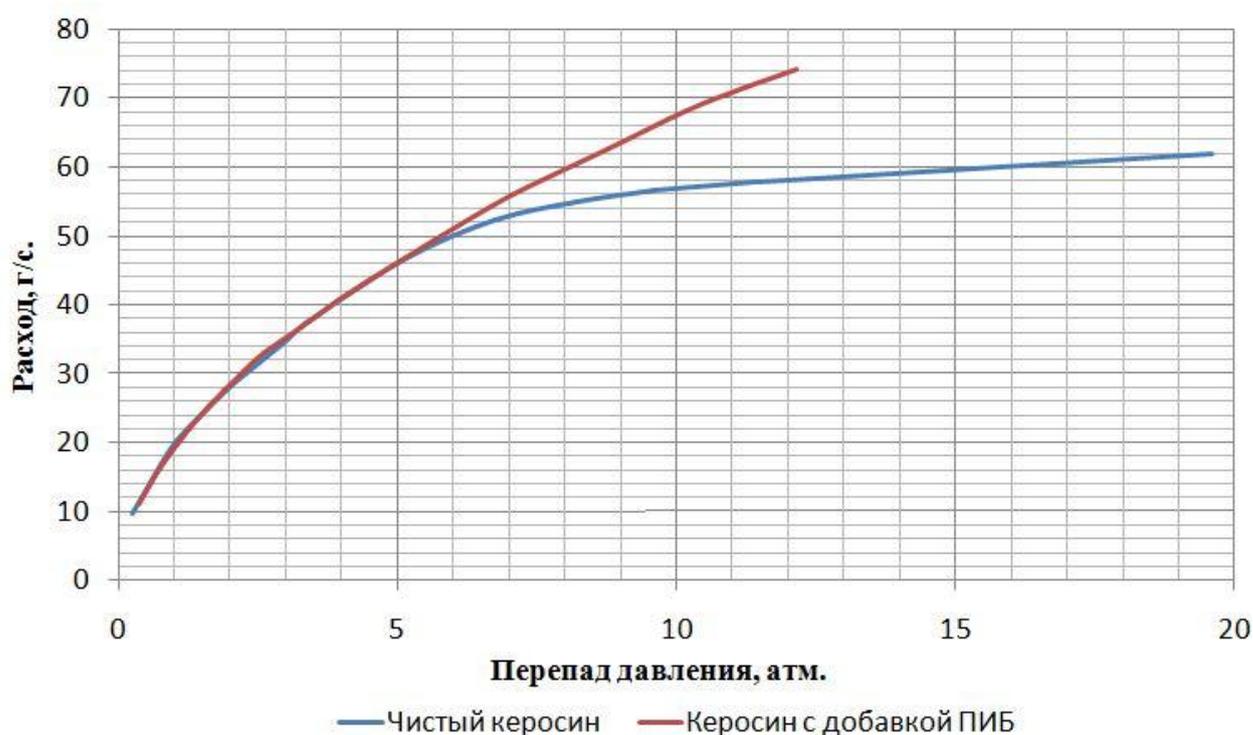


Рисунок 26. Расходная характеристика магистрали керосина.

Как видно из расходных характеристик (Рисунок 26), эффект Томса наступает при расходах, намного больших 30 г/с, что подтверждается и расчетом чисел Re для используемой магистрали горючего:

$$Re = \frac{W\rho d_r}{\nu} \quad (16)$$

где, $W = \frac{\dot{m}}{\rho F}$ - скорость керосина в трубе, м/с;

\dot{m} - расход керосина, г/с;

ρ - плотность керосина, кг/м³;

d_g - диаметр трубопровода, м;

F - площадь поперечного сечения трубопровода.

ν - кинематическая вязкость, м²/с.

Гидравлический диаметр трубопровода керосиновой магистрали постоянный и составляет 4 мм. Плотности чистого керосина и керосина с ПИБ равны 835 кг/м³. Единственным параметром, влияющим на скорость течения керосина является кинематическая вязкость, которая для керосина с присадкой полимера составляет $9,63 \cdot 10^{-6}$ м²/с, что в 3 раза превышает вязкость чистого керосина. Результат расчета чисел Рейнольдса для чистого керосина и керосина с ПИБ представлен на *Рисунке 27*.

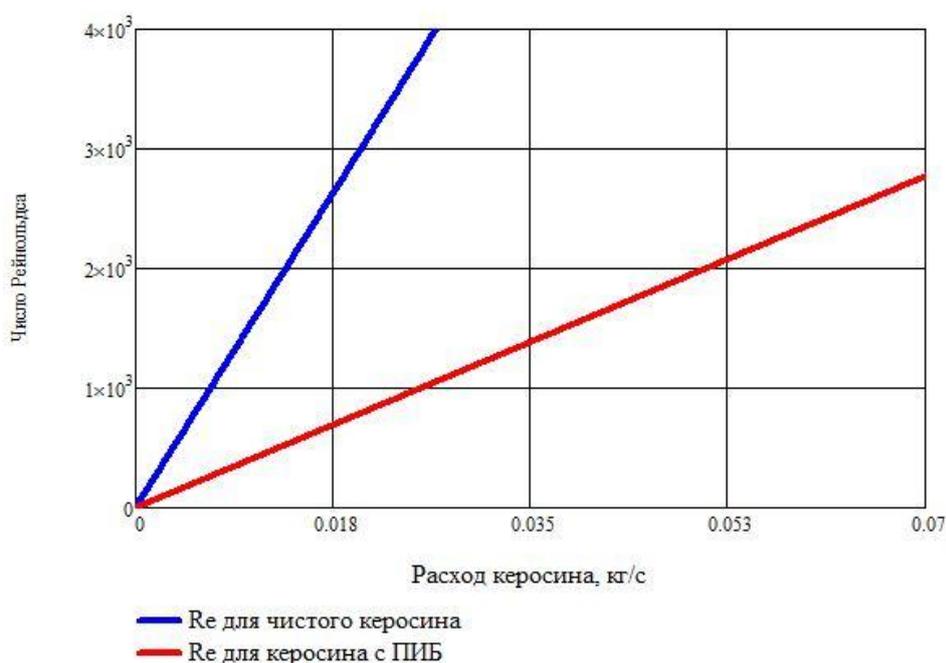


Рисунок 27. Зависимость числа Рейнольдса от расхода керосина.

Таким образом, снижения гидравлического сопротивления в магистралях во время огневых экспериментов не наблюдалось. Тем не менее, отсутствие эффекта Томса не повлияло на настройку двигателя и его работу, а наоборот было проще выдержать одинаковые режимы по расходам керосина для исследования влияния добавки на полноту сгорания.

Чтобы избежать прогара камеры и сохранить материальную часть, все огневые эксперименты проводились на восстановительном режиме, с использованием керосиновой завесы.

Таблица 13. Результаты экспериментов на чистом керосине.

	расход O ₂ , г/с	Кер.фор с., г/с	Кер.заве са, г/с	РасходΣ , г/с	% на завесу	αΣ	P _к , атм	Тяга, Н	β _{эсп.}	β _{теор}	φβ
1	27,71	15,89	29,80	73,42	40,59	0,17	6,12	76,2	944,1	1211	0,775
2	27,73	16,95	22,84	67,53	33,82	0,20	6,20	73,38	1039,0	1251	0,830
3	29,80	13,55	24,37	67,73	35,98	0,23	6,53	79,04	1091,3	1286	0,848
4	26,52	15,34	29,75	71,62	41,55	0,17	5,93	69,86	937,5	1210	0,774
5	26,69	15,37	28,74	70,80	40,59	0,17	5,93	69,90	948,5	1210	0,783
6	26,62	15,72	26,36	68,71	38,36	0,18	5,87	69,57	967,1	1232	0,785
7	26,74	16,10	23,99	66,84	35,90	0,195	5,86	70,82	991,9	1245	0,796
8	26,84	16,54	23,97	67,36	35,58	0,194	5,93	70,20	996,6	1242	0,802
9	26,86	17,27	24,00	68,14	35,22	0,191	5,85	69,92	971,4	1237	0,785
10	26,80	16,34	23,77	66,92	35,52	0,196	5,87	70,24	993,6	1245	0,798
11	26,77	16,46	23,24	66,48	34,95	0,197	5,79	69,93	986,3	1247	0,790
12	26,86	16,54	23,97	67,38	35,57	0,194	5,79	70,20	973,4	1242	0,783

Таблица 14. Результаты экспериментов на керосине с ПИБ.

	расход O ₂ , г/с	Кер.фор с., г/с	Кер.заве са, г/с	РасходΣ , г/с	% на завесу	αΣ	P _к , атм	Тяга, Н	β _{эсп.}	β _{теор}	φβ
1	22,62	17,50	26,95	67,07	40,17	0,150	5,21	61,5	878,22	1177	0,746
2	26,23	16,58	23,36	66,17	35,31	0,193	5,77	68,2	985,66	1230	0,801
3	26,37	17,05	23,48	66,90	35,10	0,191	5,75	68,6	972,85	1229	0,792
4	26,74	16,96	23,20	66,90	34,68	0,196	5,81	69,7	981,91	1234	0,796
5	27,10	17,26	20,80	65,16	31,92	0,209	6,18	73,9	1072,7	1251	0,858
6	25,06	16,60	24,31	65,97	36,84	0,180	5,66	67,8	970,75	1223	0,794
7	25,04	16,99	24,05	66,08	36,39	0,179	5,66	67,9	969,20	1222	0,793
8	24,91	17,28	23,88	66,07	36,14	0,178	5,65	67,0	967,61	1221	0,792
9	24,79	16,60	23,78	65,17	36,49	0,181	5,54	65,9	961,40	1223	0,786
10	24,83	16,96	21,77	63,56	34,25	0,189	5,62	66,0	999,64	1234	0,810
11	24,85	17,19	21,99	64,03	34,35	0,187	5,52	66,3	975,83	1231	0,793
12	24,90	16,84	24,19	65,93	36,68	0,178	5,57	66,5	955,29	1220	0,783
13	24,81	17,04	23,93	65,77	36,38	0,178	5,54	66,4	952,93	1220	0,781
14	24,99	17,35	24,37	66,71	36,53	0,176	5,64	67,2	956,57	1218	0,785
15	25,01	17,78	24,28	67,07	36,20	0,175	5,63	67,3	950,08	1215	0,782

На Рисунке 28 представлена зависимость расходного комплекса β от коэффициента избытка окислителя αΣ. Полнота сгорания керосина с ПИБ незначительно выше, чем на чистом керосине (Рисунок 29). Это несмотря на то, что двигатель работал в газогенераторном режиме, с заведомо очень низкими

альфа ($\alpha \approx 0,2$). Кроме того, завеса была восстановительная, т.е. внутренне охлаждение осуществлялось также керосином, где распыла, как такового не было.

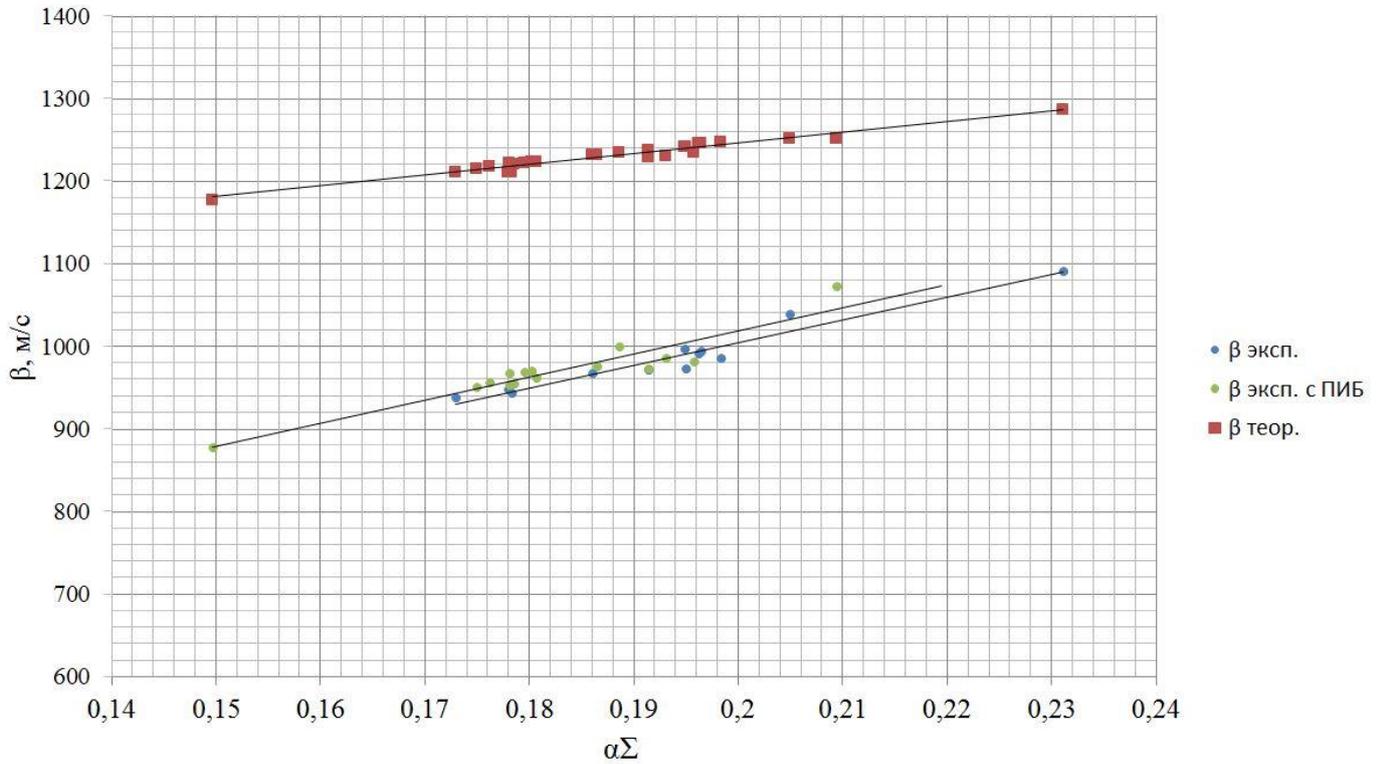


Рисунок 28. Зависимость расходного комплекса β от $\alpha\Sigma$.

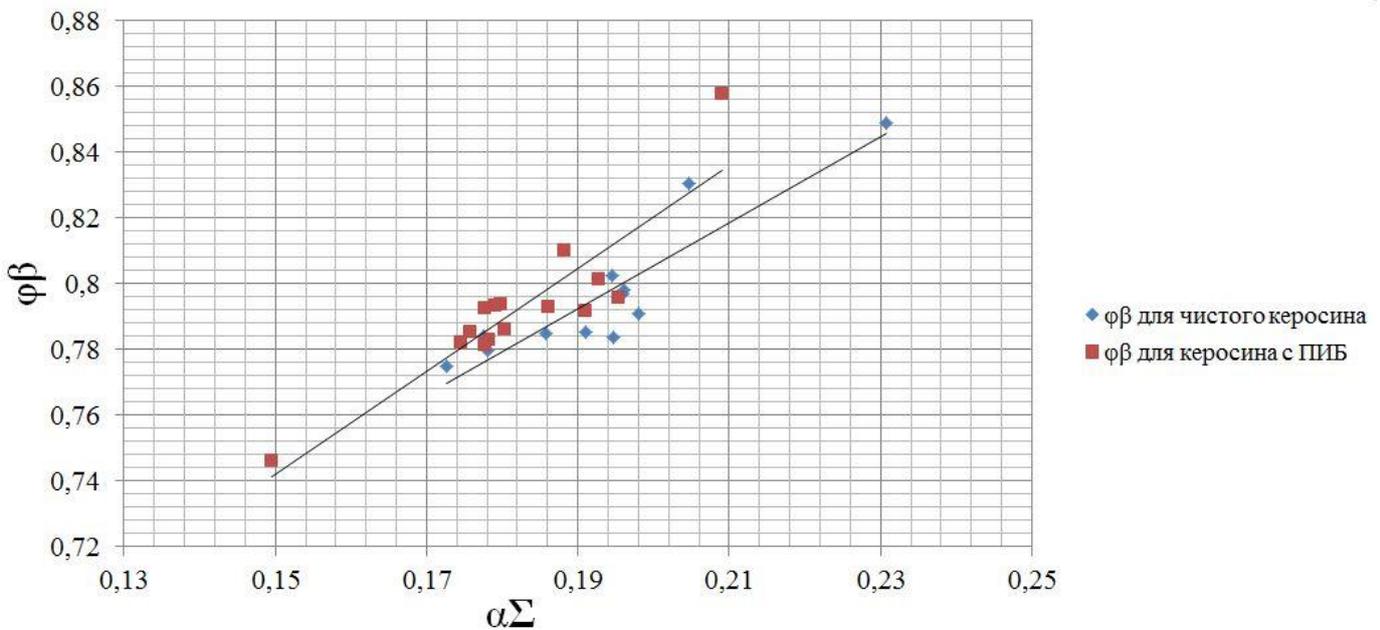


Рисунок 29. Зависимость $\phi\beta$ от $\alpha\Sigma$.

При сравнении $\phi\beta$ в первом приближении можно сказать, что полнота сгорания отличается менее чем на 0,5 %, что соответствует погрешности измерений приборов.

Как отмечалось ранее, основным механизмом влияния на полноту сгорания топлива является смесеобразование. Эффективность работы двигателя напрямую зависит от распыливания компонента (керосина). Проведенные исследования в настоящей работе свидетельствуют об ухудшении распыла при использовании керосина с присадкой ПИБ. Однако ухудшения работы двигателя замечено не было. Это можно объяснить организацией смесеобразования в исследуемой смесительной головке (Рисунок 20). Двухкомпонентная форсунка с внутренней ступенью горючего и внешней ступенью окислителя (газообразного кислорода) (Рисунок 30) работает в условиях большой относительной скорости потока.

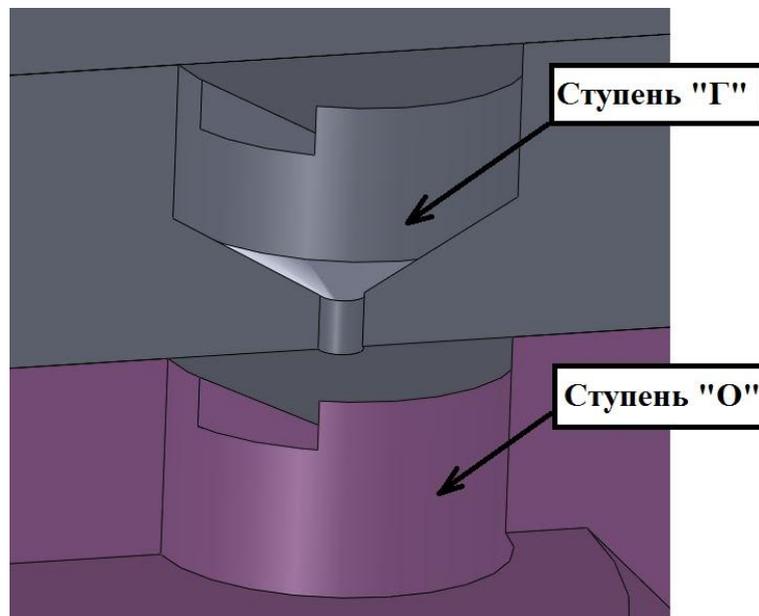


Рисунок 30. Конструкция двухкомпонентной форсунки.

$$W_{\text{отн}} = \frac{W_0}{W_\Gamma} = \frac{\dot{m}_0 F_\Gamma \rho_{\text{вхГ}}}{\dot{m}_\Gamma F_0 \rho_{\text{вхО}}} \quad (17)$$

где, W_0 - скорость газообразного кислорода в форсунке;

W_Γ - скорость керосина на выходе из ступени "Г" форсунки;

$\dot{m}_0, \dot{m}_\Gamma$ - расходы окислителя и горючего для одной форсунки;

F_Γ, F_0 - площади проходных каналов ступеней "Г" и "О" соответственно;

$\rho_{\text{вхО}}, \rho_{\text{вхГ}}$ - плотности компонентов топлива на входе в форсунку.

Несложными вычислениями получим, что относительная скорость в форсунке превышает 120 м/с. Мелкость распыливания, оцениваемая по критерию Вебера We , при впрыскивании жидкости в поперечный газовый поток рассматривалась во многих работах. Значения критерия для разрушения капли варьируется от 2,8 до 14 [49-53,56]. Однако во всех источниках отмечено, что с увеличением относительной скорости потока размеры капель уменьшаются. А так как газообразный кислород подавался поперек потока жидкости, истекающей из ступени горючего и был закручен, то можно сказать, что внешние аэродинамические силы, действующие на капли керосина, намного превышали силы поверхностного натяжения и мгновенно разрушали капли до мельчайшего состояния. Вязкость жидкости не оказывает существенного влияния на размеры капель когда длины волн возмущений велики или сравнимы с радиусом струи [50]. Распыл во время огневого эксперимента производился в более плотную среду, и экспериментальные данные, относящиеся главным образом к форсункам двигателей внутреннего сгорания, показывают, что если плотность среды в 6-20 раз превышает атмосферную, то размеры капель не зависят от колебаний плотности. А влияние вязкости является несущественным.

Для оценки теплового состояния двигателя на КС РД МТ было установлено 12 термопар, по 4 термопары в 3х сечениях камеры сгорания (*Рисунок 31*).

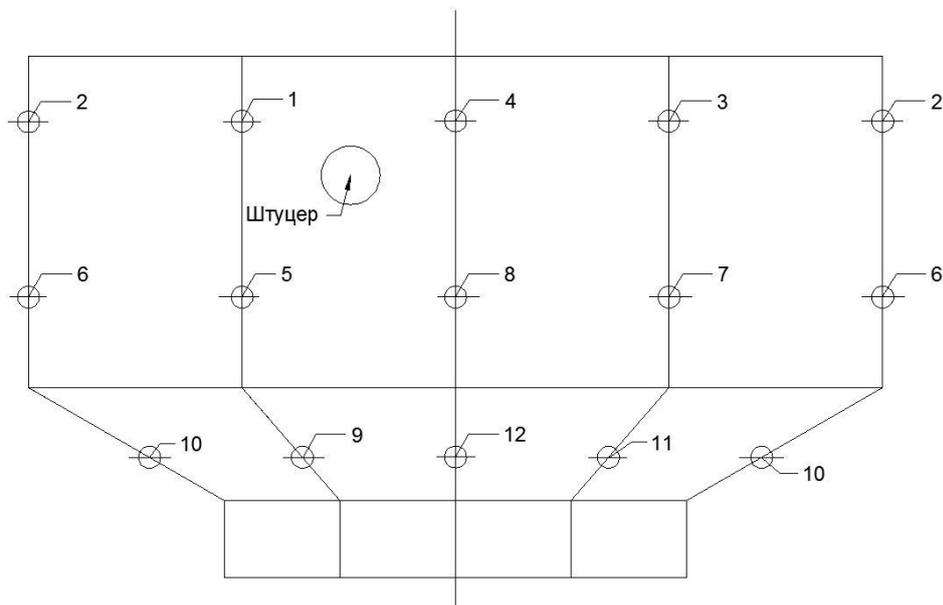


Рисунок 31. Развертка КС с расположением термопар на внешней стенке.

В результате многочисленных экспериментов с керосиновой завесой после статистической обработки показаний термопар были получены следующие результаты.

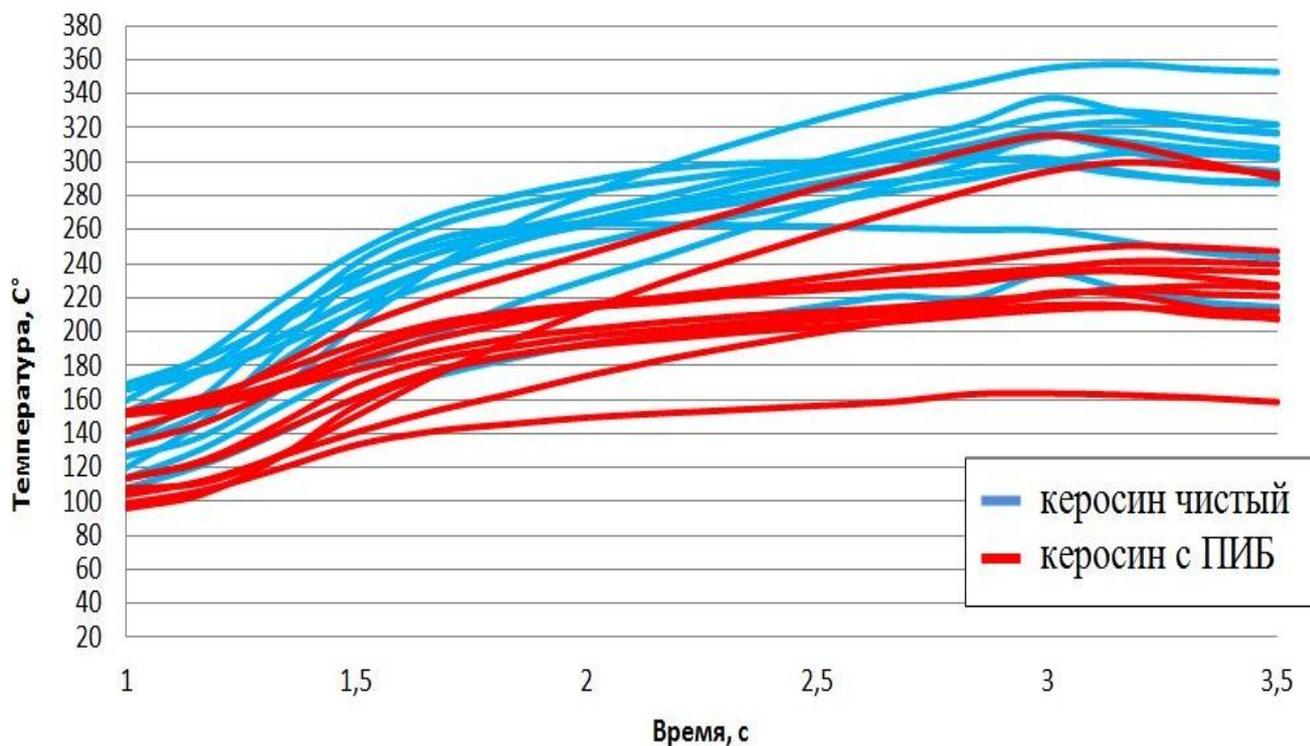


Рисунок 32. Показания термопар для запусков на чистом керосине и керосине с ПИБ.

Для сравнения взяты два запуска с разными керосинами (Таблица 13, 14), запуск 10 на чистом керосине и запуск 4 на керосине с ПИБ. На Рисушке 33 представлены показания расходов и давлений в камере сгорания для двухсекундных запусков.

Режимы полностью идентичны, расходы керосина в форсунки и в завесу различаются менее чем на 1 г/с. Давления в камере сгорания практически одинаковы. Относительный расход в завесу в случае с керосином с добавкой был меньше, чем при запуске на чистом керосине, но не значительно. Однако, градиенты температур оказались меньшими при использовании керосина с ПИБ. Максимальная температура стенки КС во время 2х секундного запуска с использованием чистого керосина составила 360 С°, при эксперименте на том же режиме с керосином с ПИБ максимальной была температура 320 С°.

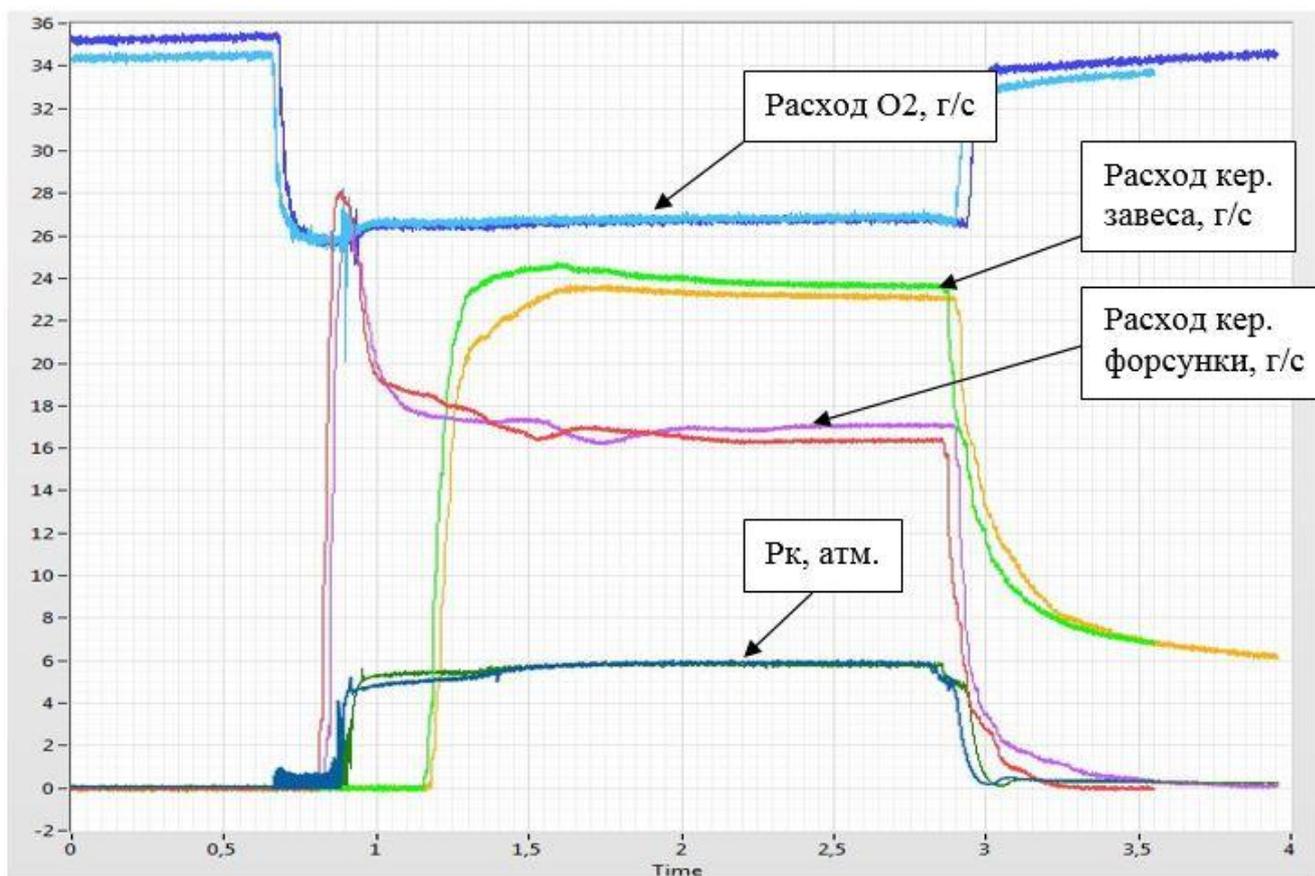


Рисунок 33. Показания датчиков для запуска 10 (чистый керосин) и запуска 4 (керосин с ПИБ).

Исходя из полученных результатов можно сделать вывод, что использование керосина с присадкой ПИБ снижает градиент температуры в случае использования керосиновой завесы. Стенка камеры прогревается дольше, чем при использовании чистого керосина. Ранее проведенные исследования показали, что повышение концентрации фактических смол свыше норм ТУ 38.001244-81 приводит к ухудшению конвективного теплообмена и снижению удельных тепловых потоков [39]. Это объясняется тем, что модифицированное горючее обладает более низким коэффициентом теплопроводности по сравнению с чистым керосином.

Механизм распространения тепла в жидкостях можно представить как перенос энергии путем нестройных упругих колебаний. Такое теоретическое представление о механизме передачи тепла в жидкостях, выдвинутое А.С. Предводителевым, было использовано Н.Б. Варгафтиком для описания опытных

данных по теплопроводности различных жидкостей [47]. Для большинства жидкостей теория нашла хорошее подтверждение.

На основании этой теории была получена формула для коэффициента теплопроводности, имеющая следующий вид [48]:

$$\lambda = A \frac{c_p \rho^{4/3}}{\mu^{1/3}} \quad (18)$$

где c_p – теплоёмкость жидкости при постоянном давлении;

ρ – плотность жидкости;

μ – молекулярная масса.

Коэффициент A , пропорциональный скорости распространения упругих волн в жидкости, не зависит от природы жидкости, но зависит от температуры; при этом произведение $A * c_p \approx \text{const}$.

Также известно, что повышение вязкости раствора жидкости влияет на волнообразование [49]. Вязкость вызывает затухание амплитуды колебаний по закону:

$$A_k = A_0 e^{-2va^2t} \quad (19)$$

где A_k - амплитуда колебаний;

A_0 - начальная амплитуда;

v - кинематическая вязкость;

a - волновое число;

t - время затухания.

Таким образом, можно предположить, что содержание полимера в керосине приводит к снижению турбулентных пульсаций в жидкости, тем самым уменьшается тепловой поток в стенку КС. По мере продвижения керосина по стенке, градиенты температур начинают выравниваться. Это происходит, как отмечалось в источнике [39], из-за деструкции полимера и приближении его свойств к обычному керосину.

Уменьшение теплопроводности керосина с добавкой ПИБ можно объяснить из анализа формулы (18). При добавлении высокомолекулярного полимера

изменяется молекулярная масса всего раствора, что приводит к уменьшению коэффициента теплопроводности.

Ракетный керосин состоит из множества индивидуальных веществ, по многим из которых нет данных в литературе [54]. Поэтому для определения молекулярной массы горючего использовалась условная формула керосина RP-1 - $C_{11,7}H_{22,8}$, что дает молекулярную массу 163,2 кг/моль [55]. Несложными вычислениями по формуле (18) с использованием данных теплопроводностей, полученных во второй главе, можно определить, что молекулярная масса керосина с добавкой ПИБ увеличилась на ~22%.

3.3 Выводы по главе

1. Полимерные присадки ухудшают распыл. Угол факела уменьшаются, капли заметно укрупняются. В случае использования жидкости с большой вязкостью и небольшой площадью сопла течение в центробежной форсунке переходит в струйное, с незначительной тангенциальной скоростью.

2. Коэффициент расхода центробежной форсунки с увеличением вязкости увеличивается для небольших степеней закрытия форсунки.

3. Для мелких каналов увеличение вязкости отрицательно сказывается на пропускной способности форсунки. Перепад давления на форсунке с добавлением полимера увеличивается для форсунок с диаметром сопла $d_c < 0,7$ мм.

4. В газогенераторном режиме с использованием керосиновой завесы добавка полимера ПИБ не оказывает влияния на полноту сгорания топлива. Различия в полученных показаниях $\phi\beta$ не превышают 0,5%, что лежит в пределах погрешности измерений. Плохое качество распыла компенсируется организацией смешения в перекрестном газовом потоке.

5. При введение в керосин полимерной присадки (увеличении молекулярной массы горючего) уменьшается коэффициент теплопроводности жидкости. Для случая использования керосиновой завесы происходит снижение тепловых потоков в стенку КС.

ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ САМОВОСПЛАМЕНЕНИЯ КЕРОСИНА С ПИРОФОРНЫМИ ДОБАВКАМИ

Негативное воздействие ракетно-космической техники на окружающую природную среду проявляется через следующие этапы её эксплуатации:

- проливы жидких компонентов топлива при их транспортировке, заправке ракет и падении отделяемых ступеней;
- тепловое и газовое загрязнение стартовых площадок;
- разрушение озонового слоя Земли от выбрасываемых продуктов сгорания ДУ 1 и 2 ступеней;
- засорение околоземного пространства отработанными аппаратами и их фрагментами.

Очевидно, что это негативное воздействие зависит в первую очередь от свойств используемых топлив и суммарного грузопотока в космос. Поэтому основными направлениями по снижению этого воздействия являются:

- переход на экологически чистые компоненты топлива;
- многократное использование транспортных космических систем.

В *Таблице 15* приведены свойства известных экологически чистых топлив применительно к жидкостным ракетным двигателям малой тяги (ЖРД МТ), спецификой которых является работа в импульсном режиме. Параметры традиционного самовоспламеняющегося топлива (АТ+НДМГ) приведены для сравнения.

Таблица 15. Сравнительная характеристика экологически чистых топлив для ЖРД МТ. $P_k=1\text{МПа}$, $\varepsilon=1000$, $\alpha=0.9$.

Топливо	K_{m0}	K_m	Q_T кг/м ³	$I_{уд.,c}$	$Q_o, \text{кг/м}^3$	$Q_T, \text{кг/м}^3$	$\Delta V_{\text{м/с}}$
$O_{2r}+CH_{4r}$	4	3,6	834,7	401,6	1140	425	6620
$O_{2r}+C_{10}H_{20}$	3,4	3,06	1040	372,1	1140	820	6134
$O_{2r}+C_2H_6O$	2,087	1,873	987,6	315,96	1140	790	5009
$H_2O_2+C_{10}H_{20}$	7,285	6,5	1294	336,88	1420	820	5553
$H_2O_2+CH_4$	8,5	7,65	1024	344,5	1420	425	5678
$H_2O_2+ C_2H_6O$	4,434	4	1225	327,8	1420	790	5009
$N_2O_4+(CH_3)_2N_2H_2$	3,06	2,754	1187	346,72	1442	790	5636

где ΔV - приращение скорости ЛА:

$$\Delta V = I_{уд} l g \left(\frac{1}{1 + \frac{G_T}{G_0}} \right) - g \sin \theta \left(\frac{G_T}{G_0} \right) I_{уд} / n_0 \quad (20)$$

где, $I_{уд}$ - удельный импульс м/с,

$n_0 = P/G_0$ -

ρ_T – плотность топлива,

ρ_0 – плотность окислителя,

ρ_r – плотность горючего,

P – тяга ДУ,

G_0 – стартовый вес ЛА,

θ – угол местного тангажа,

$G_T/G_0=0,845$ (усреднено по трем разгонным блокам: «Бриз» М, «Фрегат», КВРБ).

Таблица 16. Критические параметры некоторых компонентов топлива.

Компонент топлива	Критическая температура, °С	Температура кипения, °К	Критическое давление, атм
O ₂	-218,8	90 (-183 С)	50,14
H ₂ O ₂	457	423,3(150,2 С)	214
CH ₄	-82,1	112 (-161,5С)	45,8
N ₂ O ₄	158,2	294,3(21,15С)	99,96

Анализ результатов расчетов позволяет выбрать наиболее перспективное топливо для ЖРД МТ исходя из комплекса требований – экологичности, эффективности ($\Delta V, \rho_T$), эксплуатационных свойств ($T_{кип}$).

Криогенные компоненты (O_{2ж}, CH_{4ж}) требуют газификации для использования в качестве исполнительных органов РСУ, что усложняет и утяжеляет ДУ. Наиболее перспективным - высококипящим долгохранимым и экологически чистым топливом - остается топливо ВПВ-керосин, незначительно уступающее по эффективности токсичному топливу НДМГ + N₂O₄.

Одним из важных свойств ракетного топлива является воспламеняемость при контакте окислителя и горючего, что особенно важно при импульсном

режиме работы ЖРД МТ. Однако все экологически чистые топлива не являются самовоспламеняющимися.

Применительно к топливу ВПВ + керосин известны два способа воспламенения: электроискровой и предварительное разложение ВПВ на катализаторе с последующим впрыском керосина в горячие продукты разложения [63,63,64]. Для воспламенения жидких керосина и кислорода в маршевых двигателях (РД-170, РД-180, РД-191и др.) используется пусковое горючее – смесь $(C_2H_5)_3Al+(C_2H_5)_3B$. Одноразовый запуск предусматривает размещение ампулы пускового горючего на одноименной магистрали перед камерой сгорания и газогенератором. Для двигателей многократного запуска требуется вытеснительная система подачи пускового горючего. Использование пускового горючего для воспламенения основных компонентов топлива усложняет систему питания ДУ и совсем не годится для импульсного режима работы ЖРД МТ.

Пусковое горючее (ПГ) двигателей РД-170, РД-180 и РД-191 обеспечивает надежное воспламенение при контакте с газообразным кислородом. Естественно предположить, что добавки ПГ к керосину могут организовать его воспламенение при контакте с ВПВ даже при её частичном разложении и выделении реакционно - активного кислорода.

Пусковое горючее - жидкое ракетное горючее, служащее для инициирования горения в камере сгорания ракетного двигателя, работающего на основном несамовоспламеняющемся топливе, при обычной (в условиях эксплуатации) температуре. Для инициирования горения в участок трубопровода (по которому подаётся горючее в камеру сгорания), примыкающий непосредственно к ракетному двигателю, монтируется ампула, заполненная пусковым горючим. При запуске пусковое горючее вытесняется основным горючим и первым подаётся в двигатель. При контакте пускового горючего с окислителем ракетного топлива происходит его самовоспламенение и затем загорание основного топлива. К пусковому горючему предъявляются требования: способность активно воспламеняться, безопасность, стабильность, совместимость

с конструктивными материалами и др. Впервые пусковое горючее было применено в газодинамической лаборатории в 1933 году [65].

В работе [66] в качестве пускового горючего рассматривалась небольшая добавка (3%) к керосину ацетилацетоната марганца ($\text{Mn}(\text{C}_5\text{H}_7\text{O}_2)_3$). Для растворения порошкообразного ацетилацетоната в керосине потребовалось растворить его предварительно в ксилидине, поскольку непосредственно в керосине он не растворяется. Однако при хранении на свету ацетилацетонат марганца выделяется из раствора (керосин+ксилидин с ацетилацетанатом марганца) в виде мелких кристаллов и под действием гравитации оседает на дно емкости, что усложняет использование данной добавки для организации самовоспламенения топлива. Кроме того результаты проведенных термодинамические расчёты показывают невыгодность использования данной добавки.

Таблица 17. Результаты термодинамического расчёта сопла со степенью расширения $\varepsilon = 62,76$.

Состав топлива	$\text{C}_{10}\text{H}_{20} + 90\% \text{H}_2\text{O}_2$	$[91\% \text{C}_{10}\text{H}_{20} + 3\%[\text{Mn}(\text{C}_5\text{H}_7\text{O}_2)_3] + 6\% (\text{CH}_3)_2\text{C}_6\text{H}_3\text{NH}_2] + 90\% \text{H}_2\text{O}_2$
K_{m0}	8,086	7,92
k	1,1999	1,205
R	359	358,182
M	43,177	43,05
$T_{\text{в камере}}, \text{K}$	2741,33	2641,96
$T_{\text{на срезе}}, \text{K}$	1625,36	1505,06
$I_{\text{уд}}, \text{с}$	284,648	275,58
$H, \text{кДж/кг}$	-8858,07	-9079,2
ε	62,76	62,76

Импульс довольно заметно падает при добавлении ацетилацетоната марганца к керосину.

Расчет концентраций токсичных веществ на выходе из двигателя при использовании добавки ацетилацетоната марганца к керосину представлен в *Таблице 18*.

Таблица 18. Концентрации токсичных веществ на срезе сопла со степенью расширения $\varepsilon = 62,76$.

Вещество	Чистый керосин	Добавка 3%	ПДК в рабочей зоне, мг/м ³	ПДК максимальная разовая, мг/м ³
NO	-	0,797	30	0,4
k*Mn ₃ O ₄	-	-	-	-
CO	-	0,59	20	35
CO ₂	14 440	9 761	30 000	-

В работе [67,68] в качестве пускового горючего используется ПГ-2 (смесь триэтилбора и триэтилалюминия) добавляемая к керосину.

Триэтилборан – элементоорганическое вещество, алкилпроизводное бора с формулой B(C₂H₅)₃, бесцветная жидкость, самовоспламеняется на воздухе [70]. T_{плавл} = - 92,9°C; T_{кип}=95 °C; плотность - 0,6961 г/см³ (при 23°C). Нерастворим в холодной воде, но разлагается горячей. Хорошо растворим этанолом и диэтиловым спиртом. Температура самовоспламенения: 20°C; с кислородом образует взрывчатые смеси.

Триэтилалюминий – элементоорганическое вещество, алкилпроизводное алюминия с формулой Al(C₂H₅)₃. Бесцветная жидкость, самовоспламеняется на воздухе [70]. Поэтому работать с ним можно только в инертной атмосфере (азот или аргон). T_{плавл}. = -52,5°C, T_{кип}= 128-130°C; плотность 0,8324 г/см³ (при 25°C).

Для выяснения влияния присадки ПГ-2 к керосину на удельный импульс, а также для оценки изменения показателя экологичности горючего проведен ряд

Таблица 20. Результаты термодинамического расчёта сопла со степенью расширения $\varepsilon = 62,76$.

Состав топлива	$C_{10}H_{20}$ + 90% H_2O_2	90% $C_{10}H_{20}$ + 10%ПГ + 90% H_2O_2	85% $C_{10}H_{20}$ + 15% ПГ +90% H_2O_2	80% $C_{10}H_{20}$ + 20% ПГ 90% H_2O_2	75% $C_{10}H_{20}$ + 25% ПГ +90% H_2O_2	100%ПГ +90% H_2O_2
Km_0	8,086	8,03	8,016	7,97	7,948	7,48
k	1,2027	1,2023	1,2022	1,2018	1,20165	1,19727
R	358,97	359,38	359,6	359,8	360,02	363,48
M	43,173	43,14	43,125	43,107	43,09	42,83
$T_{кс}, K$	2682,15	2688,24	2690,19	2694,74	2697,36	2749,76
$T_{ср}, K$	1551,25	1560,52	1563,18	1570,5	1574,36	1657,16
Иуд, с	279,397	279,824	279,91	280,29	280,45	284,17
$H, кДж/кг$	-9019,7	-9027,34	-9029,23	-9035,56	-9038,56	-9103
ε	62,76	62,76	62,76	62,76	62,76	62,76

По результатам расчётов построены зависимости удельного импульса от процентного содержания добавки смеси триэтилбора и триэтилалюминия в керосине.

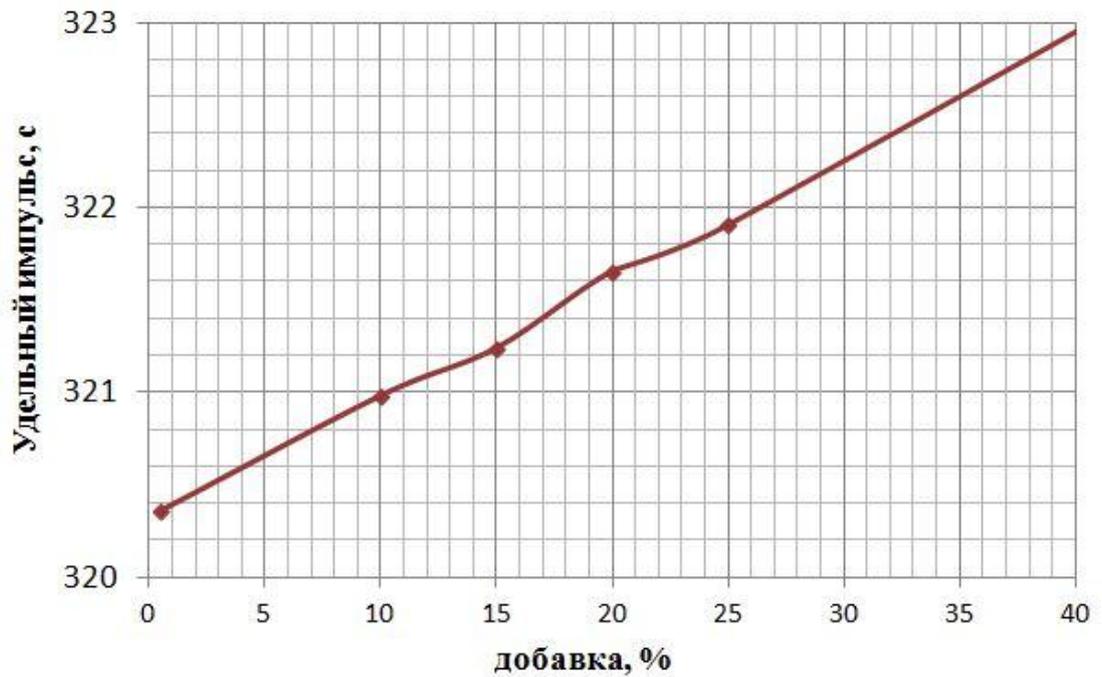


Рисунок 34. Зависимость удельного импульса от процентного содержания добавки смеси ГА и ТБ в керосине для двигателя с соплом со степенью расширения $\varepsilon = 1000$.

На *Рисунке 34* видно, что удельный импульс растёт с увеличением процентного содержания добавки в керосине. Рост удельного импульса объясняется увеличением скорости истечения продуктов сгорания, которая вычисляется по формуле [64]:

$$W_a = \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{R_0 T_k}{M} \left[1 - \left(\frac{p_a}{p_k} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} \quad (21)$$

где, k - показатель изоинтропы,

R_0 - газовая постоянная,

T_k - температура в КС,

p_k, p_a - давления в КС и на срезе сопла соответственно.

Температура в камере по мере увеличения процента добавки растёт, а молекулярный вес газа в камере сгорания падает, что приводит к медленному росту скорости истечения и к росту удельного импульса соответственно.

Ниже представлен результаты расчета состава продуктов сгорания и их концентраций.

Таблица 21. Концентрации токсичных веществ на срезе сопла со степенью расширения $\varepsilon = 1000$.

Вещество	Чистый керосин	10	15	20	25	100% добавки	ПДК в рабочей зоне, мг/м ³	ПДК максимальная разовая мг/м ³ [72]
B ₂ O ₃	-	-	-	-	-	-	5	5
H ₃ BO ₃	-	1,743	2,028	2,234	2,408	2,101	10	0,02
CO	-	-	-	-	-	-	20	35
CO ₂	14 440	14 170	13 990	13 820	13 650	11 123	30 000	-
HBO ₂	-	1,591	2,063	2,735	3,339	20,53	747,71	-

По данным проведённого расчёта видно, что только ортоборная кислота превышает максимальное разовое значение ПДК. Остальные продукты сгорания не выходят за рамки допустимых концентраций.

Таблица 22. Концентрации токсичных веществ на срезе сопла со степенью расширения $\varepsilon = 62,76$.

Вещество	Чистый керосин	10	15	20	25	100% добавк и	ПДК в рабочей зоне, мг/м ³ [72]	ПДК максимальная разовая, мг/м ³ [72]
B ₂ O ₃	-	4,48*10 ⁻³	10*10 ⁻³	19*10 ⁻³	29*10 ⁻³	0,618	5	5

H ₃ BO ₃	-	0,508	0,745	0,929	1,123	2,247	10	0,02
CO	1,138	1,27	1,293	1,432	1,489	3,798	20	35
CO ₂	14 820	14 550	14 400	14 270	14 130	12 030	30 000	-
HBO ₂	-	105,86	158,86	212,06	265,3	1076	747,71	-

Анализируя полученные данные видно, что ортоборная кислота превышает значение максимально разовой ПДК при добавлении смеси триэтилбора и триэтилалюминия к керосину, а метаборная кислота превышает значение ПДК при процентном содержании добавки в керосине приближающемся к 100%. Остальные продукты сгорания находятся в рамках допустимых значений.

Также, как и в сопле со степенью расширения $\varepsilon = 62,76$, на выходе была получена конденсированная фаза оксида алюминия Al₂O₃. Массовая доля оксида алюминия ($\frac{m_{Al_2O_3}}{m_{топлива}}$) в зависимости от концентрации добавки, а также ПДК вещества представлены в *Таблице 23*.

Таблица 23. Конденсированная фаза оксида алюминия.

Вещество	Керосин чистый	10	15	20	25	100% добавки	ПДК, мг/л ^[72]
k*Al ₂ O ₃	-	0,00247	0,00371	0,00497	0,00623	0,02632	2

4.2 Лабораторные исследования по самовоспламенению топливной пары керосин-ВПВ

Для выяснения механизма самовоспламенения керосина с добавками с ВПВ в Лаборатории ЖРД МТ каф.202 МАИ были проведены систематические лабораторные эксперименты по смешению. Смешение организовывалось впрыском керосина (1см³) с помощью медицинского шприца в керамическую кювету с 84,5% ВПВ (2см³). Схема лабораторной установки и результаты

воспламенения в зависимости от концентрации добавки приведены на *Рисунках 35 и 36*.

После ряда экспериментов по определению оптимального угла впрыска было решено зафиксировать угол 45° исходя из особенностей лабораторного оборудования и удовлетворительной площади контакта компонентов. Опытным путем также было установлено, что лучше производить впрыск горючего в окислитель, т.к. керосин с добавкой на открытом воздухе склонен к самонагреванию. Инжектируемый компонент, угол впрыска горючего, температура и давление в помещении были постоянными для всех проводимых экспериментов. Изменяемыми параметрами являлись концентрация добавки к керосину, скорость впрыска горючего, а также температура вводимого компонента.

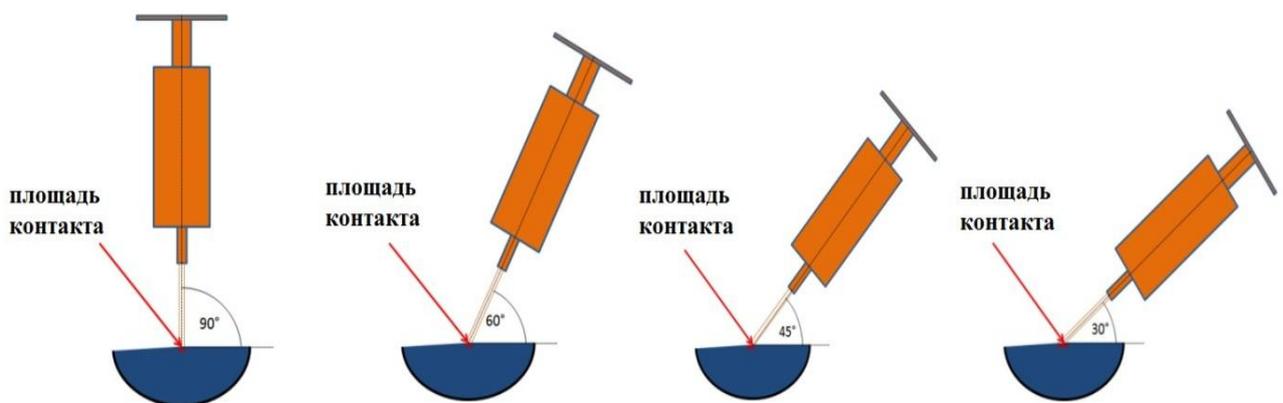


Рисунок 35. Схема проведения лабораторных экспериментов.

Суммарная концентрация добавки уменьшалась с 20% с шагом в 2% при постоянной температуре до момента исчезновения самовоспламенения. Далее керосин с концентрацией добавки, не дающей воспламенения, подогревался с шагом в 10°C до возникновения самовоспламенения при впрыске в перекись.

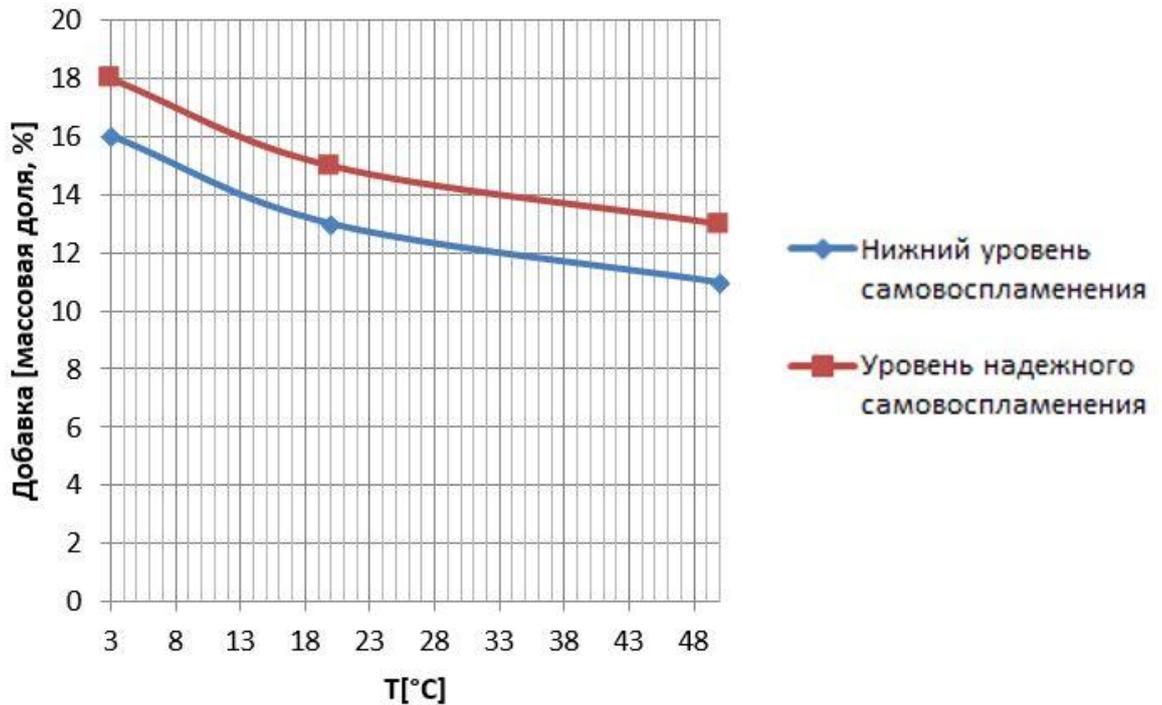


Рисунок 36. Зависимость содержания ПГ для самовоспламенения топлива от температуры (84,5% H_2O_2).

Надежное воспламенение при струйном смешении достигалось при концентрации ПГ в керосине $>13\%$ ($\approx 15\%$) в атмосфере воздуха. С ростом температуры компонентов минимальная концентрация воспламенения ПГ снижалась.

Во время экспериментов проводилась высокоскоростная съемка со скоростью 420 кадров в секунду, что позволило определить время начала контакта компонентов и выявить задержку воспламенения.

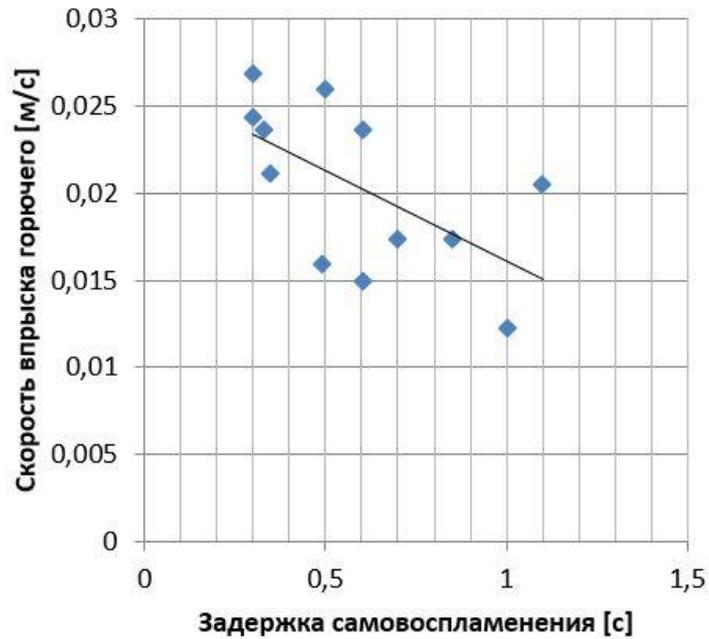


Рисунок 37. Задержка самовоспламенения в зависимости от скорости впрыска горючего для 84,5% H_2O_2

При использовании 93% ВПВ в ряде экспериментов реализовывалось детонационное горение, сопровождавшееся сильной ударной волной, приводящей к разрушению лабораторной установки и опасным воздействием на персонал. В связи с этим продолжение экспериментов было перенесено на огневой испытательный стенд с автоматизированной вытеснительной подачей компонентов. Принципиальная схема испытательной установки представлена на *Рисунке 38*.

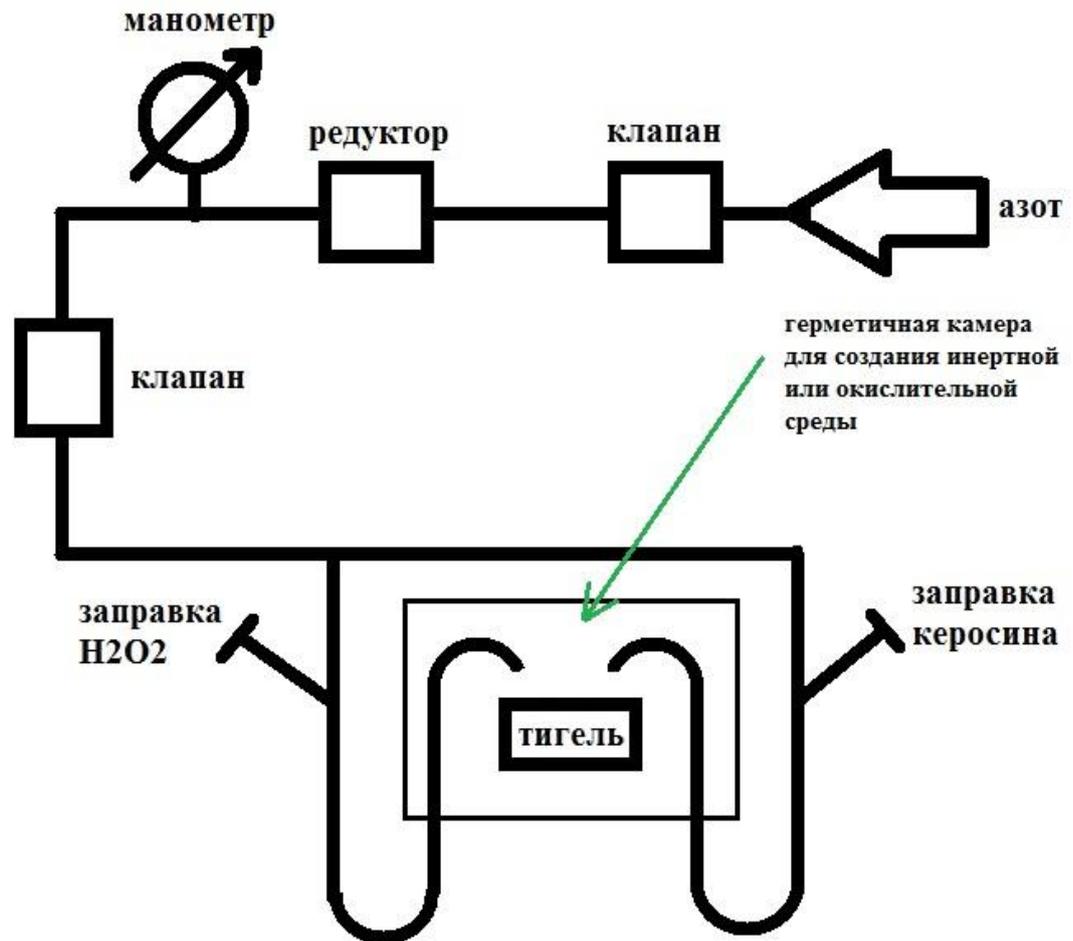


Рисунок 38. ПГС рабочего участка стенда для исследования самовоспламенения

Рабочий участок стенда позволял организовывать как внедрение керосиновой струи в жидкую ВПВ, так и встречу распыленных в центробежных форсунках компонентов. Кроме того, для выяснения физической картины воспламенение распыленных компонентов организовывалось в инертной газовой среде, в среде газообразного кислорода и вакууме. Процесс смешения и воспламенения фиксировался на кинокамере.

Как показали эксперименты, при одной о той же концентрации ПГ в керосине (15%) в инертной среде азота воспламенение не происходит, в кислородной среде реализуется надежное воспламенение. При распыливании компонентов центробежными форсунками удалось получить надежное воспламенение на воздухе с 12% добавки ПГ, а в кислородной среде - при 9% добавки ПГ в керосине.

4.3 Результаты огневых испытаний РД МТ на самовоспламеняющихся экологически чистых компонентах

Одним из преимуществ исследуемой топливной пары керосин-ВПВ, как отмечалось выше, является то, что для воспламенения топлива не требуется дополнительных систем электроискрового, каталитического или другого вида зажигания. Воспламенение произойдет при контакте, только лишь за счет химического взаимодействия компонентов.

Используя сходство композиции керосин-ВПВ с АТ-НДМГ как самовоспламеняющихся для исследовательских целей не изготавливалось отдельного двигателя, а был взят готовый образец действующего ЖРД МТ на токсичных компонентах. Двигатель разработки ТМКБ "Союз" МДТО-123 тягой 50Н и суммарным расходом 18г/с предназначен для ориентации, стабилизации и создания осевой перегрузки космических аппаратов. Чертеж двигателя и внешний вид представлены на *Рисунках 39, 40*.

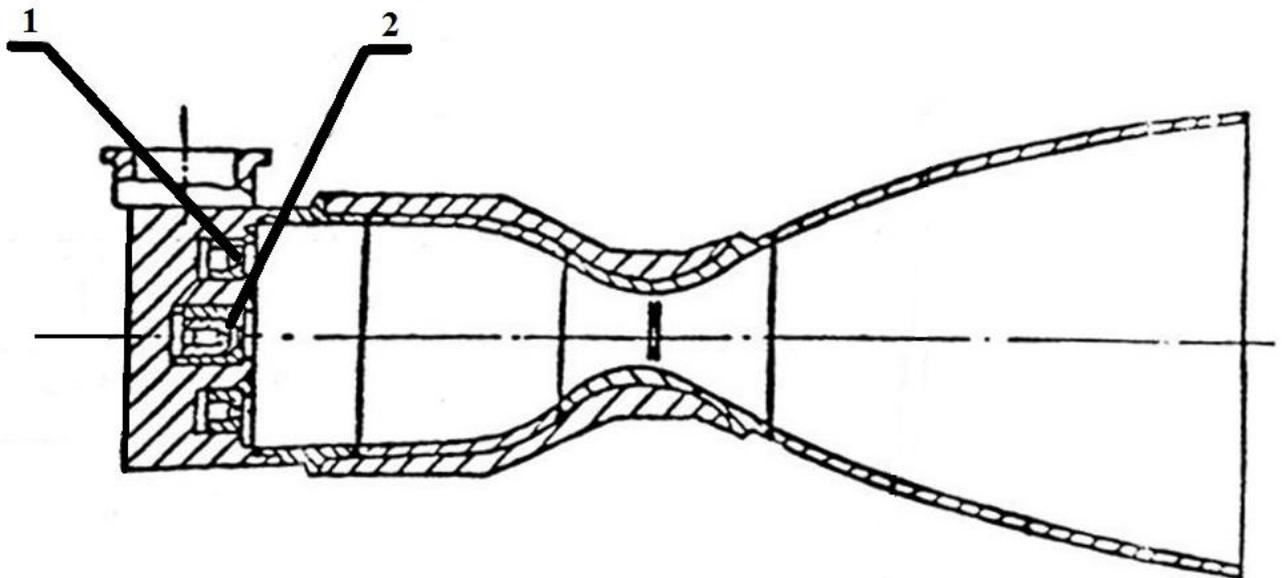


Рисунок 39. РД МТ 123; 1 – периферийные форсунки горючего; 2 – центральная форсунка окислителя.

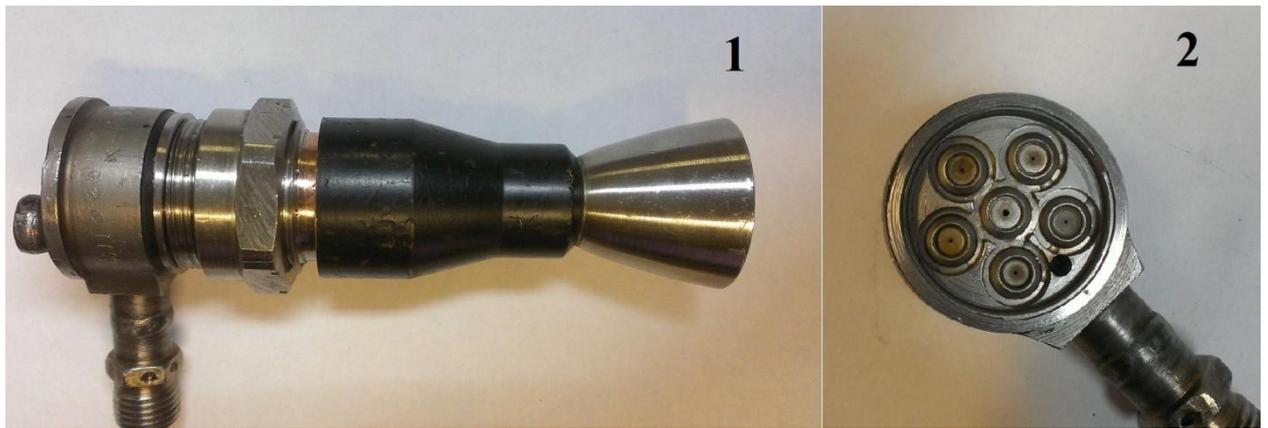


Рисунок 40. Внешний вид двигателя в сборе - 1; смесительной головки - 2.

Первым этапом исследования воспламенения на смесительной головке было проведение огневого эксперимента на цилиндрической камере сгорания без критического сечения. Эксперимент проводился только в атмосфере воздуха, без создания дополнительной инертной или окислительной среды. Результаты воспламенения сведены в *Таблицу 24*.

Таблица 24. Результаты воспламенения на цилиндрической КС без критического сечения.

№ запуска	Концентрация ПГ в керосине, %	Давление наддува, атм.	Расход О, г/с	Расход Г, г/с	k_m	воспламенение
1	15	2	3,69	2,7	1,366	-
2	15	3	4,5	3,15	1,43	+
3	15	3	4,5	3,15	1,43	+
4	15	5	5,67	4,16	1,362	-

Отсутствие надежного воспламенения объясняется тем, что не было выдержано стехиометрическое соотношение компонентов, которое оказывает существенное влияние на воспламенение. Сделать этого не удалось по техническим причинам из-за ПГС стенда, которая впоследствии была изменена. В схеме вытеснительной подачи стенда отсутствовала возможность отдельного регулирования наддува окислителя и горючего, а также заправки большего количества компонентов (заправочные емкости составляли по 10 мл).

Второй этап заключался в проведении экспериментов на камере сгорания с критическим сечением. Аналогично лабораторным экспериментам, запуски на двигателе осуществлялись в различных средах: инертной (азотной), атмосфере воздуха, окислительной среде. Необходимая среда создавалась непосредственно в КС подводом через штуцер азота или кислорода. Фиксируемыми параметрами во время запусков являлись давления наддува компонентов и наличие воспламенения.

Таблица 25. Результаты воспламенения Керосин+H₂O₂ на двигателе с критическим сечением.

№ запуска	Концентрация ПГ в керосине, %	Давление наддува О, атм.	Давление наддува Г, атм.	Среда	воспламенение
1	15	2	3	азот	-
2	15	3	3	воздух	-
3	15	3	3	кислород	+

По результатам опытов воспламенение керосина с добавкой ПГ было получено только в окислительной среде. Возможными причинами отсутствия воспламенения является:

1. Инертная среда. При смешении компонентов выделяется недостаточное количество энергии для воспламенения из-за недостатка окислителя. Выходом является создание дополнительной окислительной среды либо увеличение содержания добавки ПГ в горючем;

2. Смесительные элементы двигателя. Для используемой материальной части отсутствие воспламенения можно объяснить неподходящей геометрией смесительной головки двигателя. Для исследуемых компонентов топлива целесообразно спроектировать индивидуальный смесительный элемент. Учитывая особенности компонентов, а именно перекиси водорода, как окислителя, таким элементом может быть форсунка внутреннего смешения для

увеличения времени контакта компонентов и более полного разложения перекиси для выделения большего количества активного кислорода, участвующего в реакции.

3. Соотношение компонентов. Для проводимых опытов соотношение k_m было сильно заниженным (~ 2 против 7 - стехиометрического соотношения для пары ВПВ+керосин). Однако, это является отрицательным показателем для данного топлива с концентрацией ПГ 15%, так как для работы двигателя на разных режимах воспламенение должно происходить в широких диапазонах соотношения компонентов. Решением может быть незначительное увеличение концентрации добавки и расширение границ воспламеняемости.

4.4 Выводы по главе

В ходе исследований нового углеводородного горючего удалось достичь следующих результатов:

1. Проведено большое количество лабораторных экспериментов по самовоспламенению, а также создана установка для проведения огневых испытаний в условиях, приближенных к реальным двигателям. Получено надежное самовоспламенение исследуемых образцов топлива.

2. По результатам проведенных экспериментов выявлен нижний предел концентрации добавки, при которой происходит надежное самовоспламенение ($\approx 15\%$) и время задержки воспламенения в зависимости от скорости впрыска в атмосферных условиях, а также в инертной и окислительной средах.

3. Произведенный термодинамический расчет показывает, что в составе продуктов сгорания хоть и есть токсичные вещества, но их количество мало и они не будут оказывать столь сильного влияния на окружающую среду и организм человека, как продукты сгорания топлив, содержащих токсичные компоненты. Кроме того, эксплуатационные показатели, что важно, делают пару керосин+ВПВ более привлекательной.

4. По результатам расчетов в виду незначительного содержания добавки-катализатора в горючем изменениями удельного импульса можно пренебречь и сказать, что его уровень сопоставим с удельным импульсом двигателей, работающих на экологически чистых компонентах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Анализ выполненных к настоящему времени работ по введению добавок ПИБ к керосину убедительно показывает целесообразность их использования в ЖРД различных схемных решений для форсирования двигателя по тяге постоянной температуре генераторного газа либо снижения температуры генераторного газа при постоянном значении тяги.

Для более сложных течений керосина с добавками ПИБ в элементах ПГС двигателей (фильтрах, центробежных форсунках и др.) целесообразно проведение дополнительных экспериментов для качественного и количественного объяснения механизмов гидравлических потерь.

2. Выполнено исследование физико-химических свойств нафтила с добавками ПИБ различной концентрации (0,01 - 0,1% масс.): вязкости, теплопроводности, теплоемкости, поверхностного натяжения и др. Показано, что основные свойства и эксплуатационные показатели нафтила с ПИБ идентичны свойствам чистого нафтила. Количество фактических смол, нерастворимых и растворимых в горючем несколько увеличивается за счет добавок, однако находятся в пределах, установленных ТУ 38.001244-81. Целесообразно рассмотреть вопрос корректировки норм для топлива с ПИБ.

3. Выполнено исследование влияния добавки ПИБ на распыливание керосина центробежными форсунками с геометрическими характеристиками $A=0,9; 1,27; 1,37$ и диаметрами выходных сопел 0,5; 0,7; 1,5 мм. соответственно. Установлено, что коэффициент расхода центробежной форсунки увеличивается для небольших степеней закрытия форсунки для горючего с ПИБ, распыл ухудшается, уменьшается угол факела распыливания, увеличиваются осевые скорости. Для форсунки с диаметром сопла 0,5 мм. повышение концентрации полимера в керосине приводит к возрастанию перепада давления на форсунке.

4. Установлено, что для газогенераторного режима работы ЖРД МТ 200Н ($\alpha \approx 0,2$) добавка полимера ПИБ не оказывает влияния на полноту сгорания топлива. Различия в полученных показаниях $\varphi\beta$ не превышают 0,5%, что лежит в

пределах погрешности измерений. Применительно к завесному охлаждению введение ПИБ приводит к снижению суммарных тепловых потоков в стенку камеры сгорания.

5. В результате большого количества лабораторных экспериментов получено самовоспламенение топливной пары ВПВ+керосин с пирофорными добавками триэтилалюминия и триэтилбора. Выявлен нижний предел концентрации энергетической добавки к керосину ($\approx 15\%$), при котором происходит надежное воспламенение в атмосферных условиях. Также исследовано влияние инертной и окислительной сред на воспламенение и его задержку. По результатам термодинамических расчетов установлено, что влияние добавки-катализатора на удельный импульс незначительно, а в составе продуктов сгорания практически отсутствуют токсичные вещества.

Список сокращений

АТ - азотный тетроксид

ГСО - геостационарная орбита

ЖВ - жидкий водород

ЖК - жидкий кислород

ЖРД - жидкостной ракетный двигатель

КРТ - компонент ракетного топлива

КС - камера сгорания

КТ - компонент топлива

НДМГ - несимметричный диметилгидразин

НОО - низкая околоземная орбита

ПГ - полезный груз

ПИБ - полиизобутилен

РН - ракета-носитель

СПГ - сжиженный природный газ

ТНА - турбонасосный агрегат

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Сарнер С., Химия ракетных топлив, М.: Мир, 1969. - 488 с.
2. Синярев Г.Б., Добровольский М.В., Жидкостные ракетные двигатели, Москва - 1955г.
3. Азов В., Воронцов Д., Последний бой углеводородов? Новости Космонавтики, 2008, том 18, №2(301), стр. 44-46.
4. Семенов Ю.П., Лопота В.А., Ракетно-космическая корпорация "Энергия" имени С.П.Королева. На рубеже двух веков 1996-2001. стр.693-694.
5. Яновский Л.С., Энергоёмкие горючие для авиационных и ракетных двигателей, Москва, - 2008г.
6. Завьялов В.С., О работе в КБХМ им. А.М.Исаева и не только об этом, глава 11, тема 9 "мир "Омар", - 2012.
7. Научно-производственный журнал «Нанотехнологии Экология Производство», №5(12), сентябрь 2011.
8. Чванов В.К., Фатуев И.Ю., Гапонов В.Д. Доклад о перспективных разработках и направлениях ОАО «НПО Энергомаш», II международный авиационно-космический форум, Самаре, 28-30.06.2011г.
9. Томс Б.А, Некоторые наблюдения потока растворов линейных полимеров в прямых трубах при больших числах Рейнольдса, Труды 1-го Международного конгресса по реологии, Амстердам, 11, 135-141, 1948.
10. Чичерин И.А., Разработка метода расчета характеристик вязкого турбулентного течения жидкости около корпуса судна при наличии отрывных явлений, диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, Санкт-Петербург, 1999.
11. Фэбула А.Г. Использование снижения сопротивления при течении растворов полимеров в противопожарной технике // Теоретические основы инж. расчетов.-1971. - №3. - С.109.
12. Несын Г.В., Манжай В.Н., Полякова Н.М. и др. О новой технологии очистки резервуаров от донных отложений // Трубопроводный транспорт нефти.- 1997.- №1.-С.16-17.

13. Грязнов И.М., Кудин А.М. Исследование износа стали струей разбавленных водных растворов высокополимеров // Инж.-физ. журн.-1973.- Т.25, №6.- С.1059 -1063.
14. Кудин А.М., Баренблатт Г.И., Калашников В.И. и др. О разрушении металлического препятствия струей разбавленного полимерного раствора// Инж.-физ. журн.-1973.- Т.25, №6.-С.1090-1094.
15. Хойт Д.У. Влияние добавок на сопротивление трения в жидкости.// Теорет. основы инженерных расчетов. -1972. - №2.- С.1 - 31.
16. Ганнушкина И.В. О "выгодных" гемодинамических реакциях в соответствии с эффектом Томса // Материалы 22-го Симпозиума по реологии. ИНХС РАН, г. Валдай.- 2004.- С.31
17. Конорова И.Л., Ганнушкина И.В. Взаимодействие клеток крови в потоке в условиях эффекта Томса // Материалы 22-го Симпозиума по реологии. ИНХС РАН. г.Валдай. 2004.- С.70.
18. Силаш А.П. Добыча и транспорт нефти.-М.: Недра.-1980.
19. Белоусов Ю.П., Противотурбулентные присадки для углеводородных жидкостей.- Наука, 1986.-144с.
20. Мастобаев Б.Н., Дмитриева Т.В., Мовсумзаде Э.М. История создания и производства химических реагентов для транспорта нефти и нефтепродуктов. // Нефтяное хозяйство. -2000.-№11.-С.107-108.
21. Смолл СР. Добавки, снижающие сопротивление течения в трубопроводах // Нефть, газ и нефтехимия за рубежом. - 1983.- №6.- С.58-60.
22. Мут Ч., Монахен М., Песето Л. Применение специальных присадок с целью снижения затрат по эксплуатации трубопроводов// Нефть, газ и нефтехимия за рубежом. — 1986.- Ж7.-С.60-62.
23. Мастобаев Б.Н., Шаммазов А.М., Мовсумзаде Э.М. Химические средства и технологии в трубопроводном транспорте нефти. - М.: Химия.-2002.-295с.
24. Гареев М.М., Несын Г.В., Манжай В.Н. Результаты ввода в поток нефти присадки для снижения гидравлического сопротивления // Нефтяное хозяйство.- 1992.-№10.-С30 -31

25. Манжай В.Н., Илюшников А.В., Гареев М.М., Несын Г.В. Лабораторные исследования и промышленные испытания полимерной добавки для снижения энергетических затрат на магистральном нефтепроводе // Инж.-физ. журнал.- 1993.-Т.65, №5.-С.515-517.

26. Несын Г.В., Манжай В.Н., Попов Е.А. и др. Эксперимент по снижению гидродинамического сопротивления нефти на магистральном трубопроводе Тихорецк-Новороссийск // Трубопроводный транспорт. 1993.-№4.-С.28-30.

27. Несын Г.В., Полякова Н.М., Манжай В.Н. и др. Промышленные испытания полимерной добавки "Виол"// Нефтяное хозяйство. 1995.- № 5/6.- С.81 - 82.

28. Несын Г.В., Сулейманова Ю.В., Полубоярцев Д.С. Антитурбулентные присадки для увеличения пропускной способности нефтепроводов// 2-я Всероссийская науч.-практ. конференция. Разработка, производство и применение химических реагентов в нефтяной и газовой промышленности. РГУ нефти и газа им И.М.Губкина. Москва. 25-26 октября 2004.

29. Несын Г.В., Сулейманова Ю.В., Полякова Н.М. Полимеры высших α-олефинов как добавки, увеличивающие пропускную способность трубопроводов// Материалы 23-го Симпозиума по реологии. ИНХС РАН. г.Валдай. 21-26 июня 2006.-С.89.

30. Чванов В.К., Фатуев И.Ю., Гапонов В.Д., Стернин Л.Е. Улучшение характеристик ракет-носителей при добавлении к топливу высокомолекулярных присадок // Двигатель. Научно-технический журнал. Изд.-во ЦИАМ. М., 2005. №6. С. 44-46.

31. Решетов А.Н., Макарова А.И., Полиизобутилены и применение их в промышленности, ГХИ, -1952.

32. В.Д. Гапонов, В.К. Старков, Б.А. Сурков, Пути повышения энергетической эффективности маршевых двигателей РН семейства «СОЮЗ» с полимерной присадкой ПИБ в горючем, Труды НПО Энергомаш им. академика В.П. Глушко, том XXIX, номер 1, год 2012.

33. Технический отчет № РЭО 2009 – 1884. Проверка при СПИ двигателя 14Д22 влияния на энергомассовые характеристики двигателей модифицированного горючего Т-1 с присадкой полиизобутилена. ПФ НПО Энергомаш, 2009. 77 с.

34. Гапонов В.Д., Оценка улучшения технических и энергомассовых характеристик маршевых двигателей РН «Союз» при введении в горючее присадки высокомолекулярного полиизобутилена // Труды НПО Энергомаш. М., 2006. № 24. С. 69-81.

35. Гапонов В.Д. Улучшение энергомассовых характеристик ЖРД с помощью присадки высокомолекулярных полимеров в компоненты ракетного топлива. Кандидатская диссертация, ОАО «НПО Энергомаш», г. Химки, 2004.

36. В.Д. Гапонов, К.Б. Коновалов, Сравнение эффективности снижения гидравлического трения жидких углеводородов добавками полиизобутилена и сополимера высших альфа-олефинов, Труды НПО «Энергомаш» №30, 2013.

37. НПО «Энергомаш» имени академика В.П.Глушко. Путь в ракетной технике. Под ред. Б.И.Каторгина. - М., Машиностроение-Полет, 2004.

38. Технический отчет № 769-08-2011. Результаты экспериментального исследования закономерностей течения керосина с полимерной присадкой полиизобутилена в модельных трактах регенеративного охлаждения камер ЖРД., на 110 листах.

39. Гапонов В.Д. О возможной деструкции полимерной присадки к горючему в кислородно-керосиновых ЖРД // Труды НПО Энергомаш. М., 2010. № 27. С. 95-114.

40. Ситков Р.А., Потехин Л.О., Гапонов В.Д. Исследование возможности увеличения массы полезного груза РН серии «Союз» при использовании высокомолекулярных присадок к горючему // Труды XXXI академических чтений по космонавтике. М., 2007. С 48.

41. Семенов Н. Н., Цепные реакции, [Л.], 1934;

42. Семенов Н. Н., Тепловая теория горения и взрывов, "Успехи физических наук", 1940, т. 23, в. 3.

43. John D. Clark, Ignition! An informal history of liquid rocket propellants, Rutgers University, the State University of New Jersey, 1972.
44. Информ. агенство «АвиаПорт», «РТ-Химкомпозит» разработал орбитальное пусковое горючее ПГ-2, 2013.
45. Научно-технический отчет по НИР «Исследование и моделирование рабочих процессов в основных агрегатах кислородно-углеводородным ЖРД», № гос. регистрации У88378, ПФ НПО Энергомаш, 2013. 19 с.
46. Бурдаков В.П. Хромченко П.А., Унитарное пульпообразное топливо для космонавтики, Научный журнал "Авиакосмическое приборостроение", Стр. 33-43.
47. Предводителей А. С., «О связи между теплопроводностью, теплоемкостью и вязкостью для жидких тел», Журнал экспериментальной и теоретической физики, 1934, т. 4, вып. 1.
48. А.Г. Коротких, Теплопроводность материалов, Издательство ТПУ, 2011.
49. Дитякин Ю.Ф., Клячко Л.А. и др., Распыливание жидкостей, 1977.
50. Dombrowski N., Hooper P. The effect of ambient density on drop formation in sprays. - «Chemical Engineering Science», 1962, vol. 17, p. 291-305.
51. Волынский М.С. О дроблении капель жидкостей в воздушном потоке. «ДАН АН СССР», 1948, т.62 №3, с.301-304.
52. Magarvey R.H., Taylor B.W. Free fall breakup of large drops. - «Journal of Applied Physics», 1956, vol. 27 №10, p.1129-1135.
53. Корсунов Ю.А., Тишин А.В., Экспериментальное исследование дробления капель жидкости при низких значениях чисел Рейнольдса, «Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа», 1971, №2, с.128-138.
54. Кобызев С. В., Методика расчета коэффициентов массоотдачи при осушке углеводородного ракетного топлива, Наука и Образование, №11, 2011.
55. Liquid Fuels and Propellants for Aerospace Propulsion:1903–2003, Tim Edwards, Journal Of Propulsion And Power, Vol. 19, No. 6, November–December 2003, pp. 1089-1107.
56. Рожков А.Н. Динамика и разрушение упруговязких жидкостей (обзор). Известия РАН. МЖГ. 2005. № 6. С. 3-24.

57. Б.В. Раушенбах, С.А. Белый и др., Физические основы рабочего процесса в камерах сгорания ВРД, Машиностроение, 1964.

58. А.И. Коломенцев, А.Н. Хохлов, В.П. Ташев, Определение перепада давления на форсунке керосина с различной концентрацией добавки полиизобутилена с использованием метода регрессионного анализа, Двигатель, №6(84), 2012.

59. В.С. Егорычев, Расчет и проектирование смесеобразования в камере ЖРД, СГАУ, Самара, 2011.

60. Козлов А.А., Боровик И.Н., Воробьев А.Г. «Разработка программы экспериментальных исследований рабочего процесса в камере сгорания ЖРД при работе на керосине с полимерными присадками полиизобутилена и проведение первого этапа экспериментальных исследований». Технический отчет по Контракту № 30610 – 02020/ 980 – 09 – 187 между МАИ и ОАО НПО «Энергомаш» им. Академика В.П. Глушко (3 этап).

61. Фатуев И.Ю., Гапонов В.Д., Чванов В.К. – ОАО «НПО Энергомаш» Боровик И.Н., Воробьев А.Г., Истомин Е.А., Козлов А.А., Лепешинский И.А., Лизуневич М.М., Прохоров А.В., Решетников В.А., Хохлов А.Н. - Московский авиационный институт (Государственный технический университет). Исследование влияния полимерных добавок к керосину на полноту сгорания топлива.

62. Воробьев А.Г., Боровик И.Н., Хохлов А.Н., Лизуневич М.М., Сокол С.А., Гуркин Н. К., Казеннов И.С., Модернизация испытательного огневого стенда для исследования рабочих процессов в жидкостных ракетных двигателях малых тяг на экологически чистых компонентах топлива, Вестник МАИ, 2010.

63. Козлов А.А., Абашев В.М. Расчёт и проектирование жидкостного ракетного двигателя малой тяги. – М.: Издательство МАИ, 2003.

64. Васильев А.П., Кудрявцев В.М., Кузнецов В.А. и др. Основы теории и расчёта жидкостных ракетных двигателей. – М.: Высшая школа, 1975.

65. Sutton G.P. History of Liquid Propellant Rocket engines – AIAA, 2006.

66. Kozlov A.A., Abashev V.M., Mordovin V.Z., Basanova I.A. Investigation of the working process in liquid rocket engine of small thrust at high concentration hydrogen peroxide with kerosene or alcohol with catalyst. - Chinese-Russian-Ukrainian workshop on space propulsion. Xian.- China. September 17 - 19.2002.

67. Ulmann E. Development of a new hypergolic fuel based on kerosene with auto-igniting additives. - Munchen, 2013.

68. A study on design and combustion characteristics of a H₂O₂/Kerosene uni-injector rocket engine / Kim B, Lee Y, Kim G., Go Y., Kim Y., Kim S./ - 34th Spring conference of the Korean society of propulsion engineers, 2010.

69. Экология, окружающая среда и человек /под ред. Ю.В.Новикова. – М.: Издательско-торговый дом «Гранд», 1998.

70. Вредные вещества в промышленности. Справочник для химиков, инженеров и врачей. Изд., 7-е, пер. и доп. в трех томах /под ред. Лазарева Н.В. и Левиной Э.Н. - Л.: Химия 1976.

71. Инструкция по технике безопасности при работе с токсичными компонентами пускового горючего (ПГ-2) в лаборатории – ГНИИХТЭОС, 2013.

72. ГОСТ 12.1.005-88 Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.