

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»

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования - Московском авиационном институте (национальном исследовательском университете) (МАИ) Министерства образования и науки РФ.

**Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор,  
**Козлов Александр Александрович**

**Официальные оппоненты:** **Гусейнов Ширин Латифович,**  
доктор технических наук,  
Научно-исследовательский институт химии и  
технологии элементоорганических соединений  
(ГНЦ РФ «ГНИИХТЭОС»), начальник научно-  
производственного отдела.

**Реш Георгий Фридрихович,**  
кандидат технических наук, доцент,  
ОАО «ВПК «НПО машиностроения», первый  
заместитель начальника отделения  
энергосиловых установок.

**Ведущая организация:** Федеральное государственное унитарное  
предприятие «Научно-производственное  
объединение имени С. А. Лавочкина»  
(ФГУП «НПО им. С.А.Лавочкина»)

Защита состоится «25» декабря 2014 г. в 15<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д212.125.08, созданного на базе Московского авиационного института (национального исследовательского университета) (МАИ), по адресу: 125993, Россия, г.Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Московского авиационного института (национального исследовательского университета) (МАИ), <http://www.mai.ru/events/defence>.

Автореферат разослан: « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2014 г.

Ученый секретарь  
диссертационного  
совета Д212.125.08,  
д. т. н., профессор:



Зуев Юрий Владимирович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность исследования

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. Кроме высокой энергетики, КРТ должны отвечать множеству разнообразных, порой противоречивых, экономических, эксплуатационных, экологических и иных требований.

Основным углеводородным горючим для ракетных двигателей (РД) на сегодняшний день является керосин. Как ракетное горючее, в паре с жидким кислородом (ЖК) керосин широко используется для одной или нескольких ступеней многих РН.

На первый взгляд топливо «керосин – ЖК» достигло высокой степени проработки, и дальнейших перспектив повышения энергетических возможностей жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) на этих компонентах не просматривается.

Существует также множество синтетических углеводородов: синтин, боктан, омар, и др., которые разрабатывались и использовались в ряде двигателей, а некоторые не проходили дальше стендовых испытаний. Многие модификации по своим параметрам не отвечали требованиям экологичности, эксплуатационным показателям, а также отличались дороговизной производства.

Одним из способов модификации керосина является введение в горючее присадок различного рода. Полимерные добавки снижают гидравлические потери в трактах подачи ЖРД и позволяют получить более высокие энергетические показатели двигателя. Пирофорные добавки снижают температуру воспламенения керосина и обеспечивают самовоспламенение горючего с различными окислителями, что позволяет исключить при этом систему воспламенения и повысить надежность двигателя в целом.

В исследованиях, проводимых по изучению влияния полимерной добавки на свойства горючего не был изучен вопрос полноты сгорания топлива. Не было получено данных о качестве распыла форсунками керосина с добавкой полимера.

Использование новых самовоспламеняющихся экологически чистых 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 азотный тетроксид (АТ) и несимметричный диметилгидразин (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.

**Цель работы:** исследование возможности использования модифицированного углеводородного горючего на основе керосина с различными присадками для повышения энергетической эффективности ЖРД.

**Задачи:**

1. Аналитический обзор состояния проблемы по использованию полимерных и пиррофорных добавок к керосину для повышения энергоэффективности ракетных двигателей;
2. Исследование физико-химических свойств растворов полиизобутилена (ПИБ) в керосине и проверка их на соответствие нормам по ТУ 38.001244-81;
3. Оценка влияния добавки ПИБ различной концентрации к керосину на эффективность распыливания горючего центробежными форсунками;
4. Проведение огневых экспериментов для определения полноты сгорания кислородно-керосинового топлива с присадкой ПИБ на экспериментальном ракетном двигателе малых тяг (РД МТ);
5. Исследование нового самовоспламеняющегося экологически чистого горючего на основе керосина с энергетическими добавками. Проведение экспериментального исследования по самовоспламенению керосина с добавками в лабораторных условиях и на реальном РД МТ.

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

1. Проведено комплексное исследование свойств керосина с различной концентрацией добавки ПИБ;
2. Получены данные по влиянию полимера на распыл керосина центробежными форсунками с различной геометрической характеристикой;
3. Проведена оценка степени влияния присадки ПИБ на полноту сгорания топлива в ЖРД МТ, а также выявлена зависимость суммарных тепловых потоков в стенку КС при

использовании внутреннего (завесного) охлаждения стенки керосином с добавкой полимера;

4. 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 от концентрации добавки полимера, которые позволят скорректировать методику расчета центробежных форсунок и дать рекомендации по границам применимости керосина с полимерной добавкой в ЖРД МТ;

- полученные зависимости характера влияния полимерной добавки на полноту сгорания топлива, а также тепловое состояние двигателя открывают возможность использования керосина с добавкой ПИБ для завесного охлаждения в ракетных двигателях малых тяг;

- полученные данные по задержке и зависимости воспламенения от концентрации пирофорной добавки являются основой для будущих исследований в данном направлении. Использование новой самовоспламеняющейся топливной пары из экологически чистых компонентов позволяет отказаться от системы воспламенения и достичь более высоких эксплуатационных показателей.

**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 и объем работы.**

Диссертация состоит из введения, 4 глав с выводами, заключения и списка использованных источников из 72 наименований. Содержание работы изложено на 115 страницах и иллюстрировано 40 рисунками и 25 таблицами.

### **СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Во введении** дано обоснование актуальности исследований. Сформулированы цели и задачи, рассмотрена научная новизна и практическая значимость работы. Приводится структура и содержание диссертации.

**В первой главе** проведен обзор работ по практическому применению полимерных присадок к керосину. Приводятся результаты испытаний кислородно-керосиновых ЖРД и рассматривается возможность использования полезного эффекта от применения полимера к горючему для повышения энергоэффективности РН в целом.

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 новых компонентов топлива.

При форсировании ЖРД по тяге возрастают давления подачи компонентов топлива и окружные скорости ротора турбонасосного агрегата (ТНА). Из-за роста 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.

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

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.

Полимерные присадки применяют 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, в медицине при

внутривенном введении растворов синтетического полиэтиленоксида марки WSR-301 уменьшается артериальное давление и увеличивается минутный объем кровообращения без увеличения частоты сердцебиения. 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

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.

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).

Работоспособность ЖРД с полимерной присадкой ПИБ и эффективность её применения подтверждена работами в ОАО "НПО Энергомаш" и 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.

В главе также рассмотрены работы по исследованию и созданию самовоспламеняющихся топлив. Отмечены их достоинства и недостатки, а также возможность применения их в качестве топлив для ЖРД.

Существует множество систем воспламенения: электроискровое, пиротехнические устройства воспламенения, лазерные воспламенители и др. Одним из самых простых и надежных способов воспламенения в ЖРД является самовоспламенение топлива, которое осуществляется только лишь за счет химической реакции при контакте компонентов.

С момента обнаружения эффекта самовоспламенения в 30-40х годах прошлого века было испытано больше количество композиций. В большинстве случаев в качестве горючего выступали вещества из группы аминов, окислителем же чаще всего была азотная кислота. На сегодняшний день основным самовоспламеняющимся топливом, используемым на многих отечественных двигателях являются токсичные АТ и НДМГ.

Среди экологически чистых компонентов топлива нет самовоспламеняющихся, а исследовательские работы по изучению самовоспламенения таких компонентов практически отсутствуют.

**Во второй главе** приводятся методы и результаты исследований свойств нафтила с различной концентрацией добавки ПИБ.

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. Определение свойств керосина с добавкой и корректировка ТУ ускоряют внедрение нового горючего и использование его 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.

Лабораторные образцы для изучения:

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

**Таблица 1.** Основные отличия показателей качества для растворов ПИБ в нафтиле.

Показатель	Результаты испытаний				
	Образец №1	Образец №2	Образец №3	Образец №4	Норма по ТУ 38001244-81
Кинематическая вязкость, мм <sup>2</sup> /с: при 20°С	2,54	8,04	9,63	11,41	не менее 2,5
Кинематическая вязкость, мм <sup>2</sup> /с: при - 40°С	18,16	19,27	23,08	27,47	не более 25
Содержание фактических смол, мг/ 100 см <sup>3</sup> топлива	1,5	22	32,5	65,0	не более 2,0
Теплопроводность при 20°С, Вт/(м*К)	0,122	0,112	0,112	0,112	-

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. 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.

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.

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.

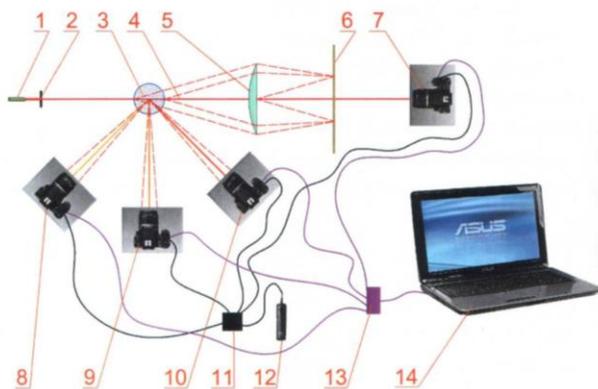
**В третьей главе** диссертации проводится экспериментальное исследование влияния полимерной добавки ПИБ к керосину на мелкость распыливания компонента центробежными форсунками. Приводится описание огневого испытательного стенда, и конструкции экспериментального РД МТ. Представлены результаты огневых экспериментов и измерений полноты сгорания топлива с использованием в качестве горючего чистого керосина и керосина с добавкой ПИБ.

#### *Влияние добавки на мелкость распыливания*

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

В работе для определения диаметра капель использовался оптический метод измерения, 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.

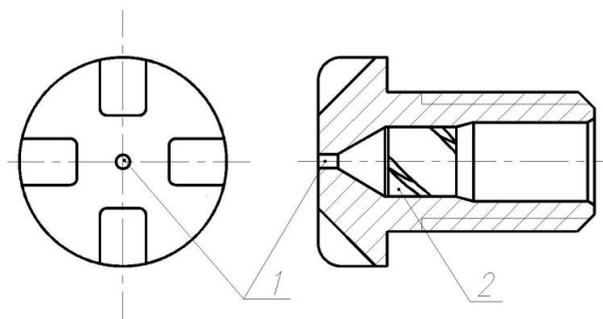
На *Рисунке 1* показана принципиальная схема измерения дисперсности распыла.



**Рисунок 1.** 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.

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.

Для исследования влияния полимерной добавки на тонкость распыла керосина было выбрано 3 центробежных форсунки с разной геометрической характеристикой. Общий вид форсунки показан на *Рисунке 2*, геометрические размеры приведены в *Таблице 2*.



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

**Таблица 2. Геометрические параметры форсунок.**

	Диаметр сопла d, мм	Диаметр камеры закручивания d <sub>кз</sub> , 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

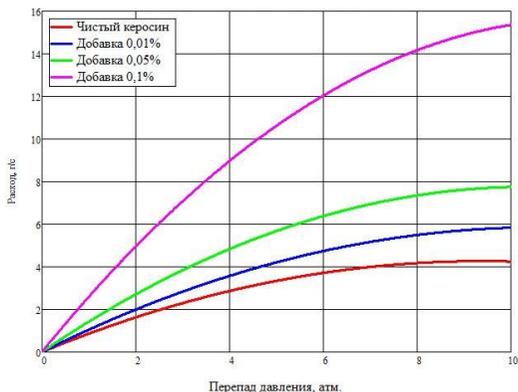
Мелкость распыла оценивалась по диаметру Заутера в зависимости от следующих факторов  $d_{32}=f(A, C\%, \Delta p)$ , где - A - геометрическая характеристика; C% - концентрация добавки ПИБ в керосине;  $\Delta p$  - перепад давления на форсунке.

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,  $\rho_r$  - плотность окружающего газа. Фотографированием определялся угол распыла. Результаты измерений сведены в *Таблицу 3*.

**Таблица 3. Результаты измерений распыла для перепада давления  $\Delta P_{ф} > 0,8 \text{ МПа}$ .**

форсунка керосин	Коэф. расхода, $\psi_{\text{эксп}}$			Угол распыла, $\alpha$ , град			d <sub>32</sub> , мкм		
	№1	№2	№3	№1	№2	№3	№1	№2	№3
Обр. №1	0,52	0,28	0,2	45	75	90	13	30	32
Обр. №2	0,2	0,3	0,18	струя	24	70	-	34	40
Обр. №3	0,12	0,38	0,2	струя	10	46	-	-	48
Обр. №4	-	0,9	0,23	струя	струя	20	-	-	-

Экспериментальные зависимости расхода керосина с различной концентрацией добавки полимера от перепада давления для форсунки №2, представленные на *Рисунке 3*, свидетельствуют о том, что с увеличением концентрации добавки происходит увеличение расхода при постоянном перепаде давления. Распыл с увеличением концентрации добавки заметно ухудшается. Угол факела убывает с увеличением концентрации полимера в керосине, а течение в форсунке переходит из центробежного в струйное.

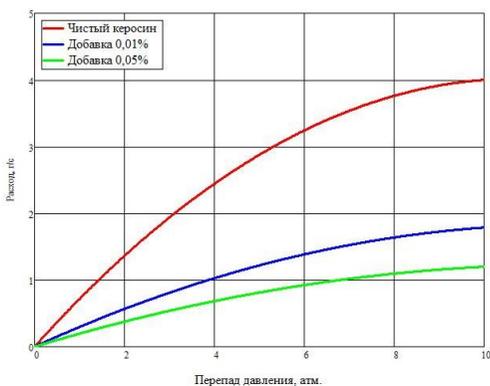


**Рисунок 3.** Расходная характеристика форсунки №2.

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.

Однако, для форсунки №1 с диаметром сопла 0,5 мм. наблюдается обратная картина.



**Рисунок 4.** Расходная характеристика форсунки №1.

Снижение коэффициента расхода в форсунке №1 при увеличении вязкости за счет полимера 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. Дальнейшее уменьшение диаметра сопла (или увеличение вязкости жидкости) снижает коэффициент расхода, как это происходило бы при струйном течении.

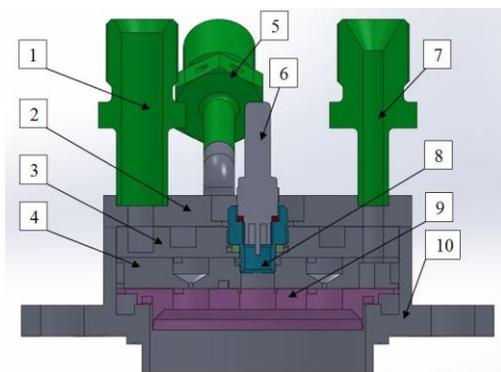
#### Влияние добавки на полноту сгорания топлива

Действующий огневой испытательный стенд на кафедре «Ракетные двигатели» факультета «Двигатели летательных аппаратов» МАИ предназначен для испытаний жидкостных ракетных двигателей малых тяг. На стенде организована вытеснительная система подачи компонентов. Используются только экологически чистые топливные пары, такие как:  $O_2$ (газ)+Керосин,  $O_2$ (газ)+Метан(газ), ВПВ(ж)+Керосин. В системе подачи как для горючего, так и для окислителя предусмотрены отдельные магистрали для организации завесного охлаждения камеры сгорания.

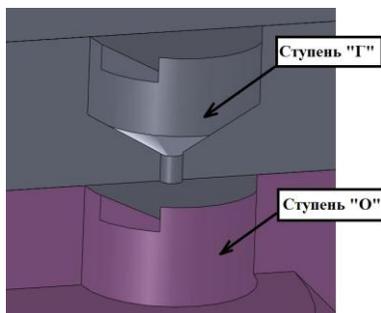
Для оценки степени влияния добавки полиизобутилена к керосину на полноту сгорания топлива был разработан двигатель ДМТ МАИ-200-70К на несамовоспламеняющихся компонентах газообразный кислород и керосин (*Рисунок 5*).

Двигатель собран по технологии пайки. Блок из четырех спаянных 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 6*). 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 втулкой с заданными диаметрами входных отверстий.



**Рисунок 5.** 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 6.** Конструкция двухкомпонентной форсунки.

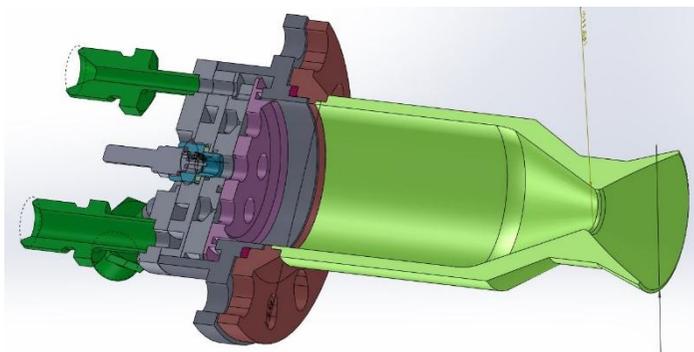
Особенностью конструкции данной смесительной головки является отдельный штуцер подачи компонента для завесного охлаждения камеры сгорания. Это дает возможность не только регулировать расход в завесу вне зависимости от расходов в центральную часть, но и использовать любой компонент в качестве охладителя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

Через коллектора в распределительной пластине горючее и окислитель поступают в подводящие полости соответствующих пластин (Рисунок 5). Так, с помощью шести отдельных отверстий в распределительной пластине осуществляется подвод компонентов

непосредственно к каждой форсунке, обеспечивая тем самым равномерное распределение компонентов.

Для равномерного распределения компонента, подаваемого в завесу, в пластине О также имеются пазы, выполненные таким образом, чтоб при выходе компонента из коллектора завесы он равномерно распределялся по всему диаметру смесительной головки

Сборка двигателя представлены на *Рисунке 7*.

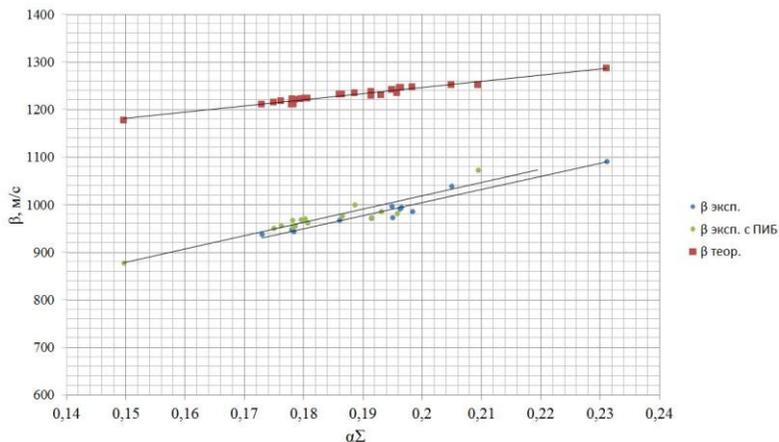


*Рисунок 7. Сборка двигателя.*

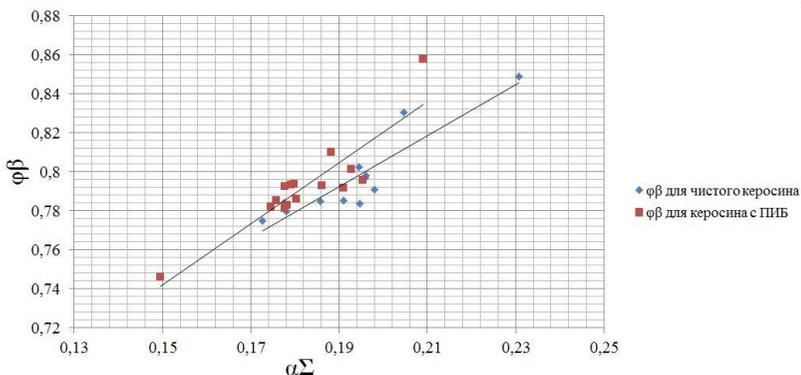
Огневые эксперименты проводились на камере сгорания с подрезанной сопловой частью. Такая методика проведения испытания позволяет проверить работоспособность самой камеры сгорания при длительных работах без использования дорогостоящего вакуумного оборудования.

В процессе экспериментов определялся расходный комплекс  $\beta_s = f(P_k, m_{\Sigma}, k_m)$  двигателя ДМТ МАИ-200-7ОК 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. Чтобы избежать прогара камеры и сохранить материальную часть, все огневые эксперименты проводились на восстановительном режиме, с использованием керосиновой завесы.

На *Рисунке 8* представлена зависимость расходного комплекса  $\beta$  от коэффициента избытка окислителя  $\alpha_{\Sigma}$ . Полнота  $\varphi_{\beta} = \frac{\beta^3}{\beta^T}$  сгорания керосина с ПИБ незначительно выше, чем на чистом керосине (*Рисунок 9*). 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. внутреннее охлаждение осуществлялось также керосином, где распыла, как такового, не было.



**Рисунок 8.** Зависимость расходного комплекса  $\beta$  от  $\alpha\Sigma$ .

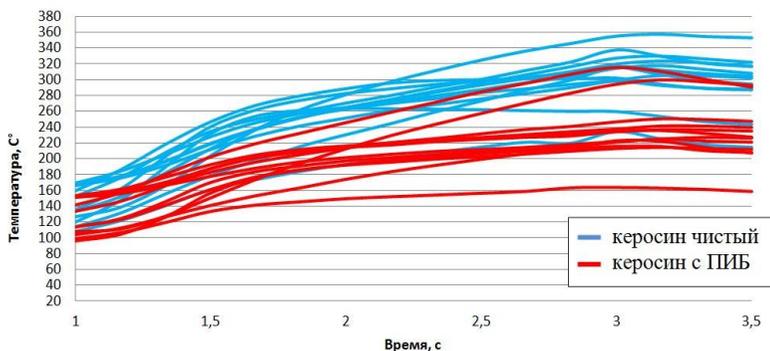


**Рисунок 9.** Зависимость  $\phi\beta$  от  $\alpha\Sigma$ .

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

При оценке теплового состояния двигателя было замечено следующее. Использование керосина с присадкой ПИБ снижает градиент температуры в случае использования керосиновой завесы. Стенка камеры прогревается дольше, чем при использовании чистого керосина. На *Рисунке 10* представлены показания термопар для двух запусков с разными горючими, на чистом керосине и керосине с ПИБ. 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 для

керосина с добавкой был меньше, чем при запуске на чистом керосине, но незначительно. Однако, градиенты температур оказались меньшими при использовании керосина с ПИБ.



**Рисунок 10.** Показания термомпар, установленных на внешней стенке КС для запусков на чистом керосине и керосине с ПИБ.

Проведенные ранее исследования показали, что повышение концентрации фактических смол свыше норм ТУ 38.001244-81 приводит к ухудшению конвективного теплообмена и снижению удельных тепловых потоков. 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. Для большинства жидкостей теория нашла хорошее подтверждение.

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

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

где  $c_p$  – теплоёмкость жидкости при постоянном давлении;

$\rho$  – плотность жидкости;

$\mu$  – 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. Вязкость вызывает затухание амплитуды колебаний по закону:

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

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 уменьшает скорость распространения упругих волн в жидкости, что, в свою очередь, приводит к снижению турбулентных пульсаций, тем самым уменьшается тепловой поток в стенку КС. По мере продвижения керосина по стенке, градиенты температур начинают выравниваться. Это происходит из-за деструкции полимера и приближении его свойств к обычному керосину.

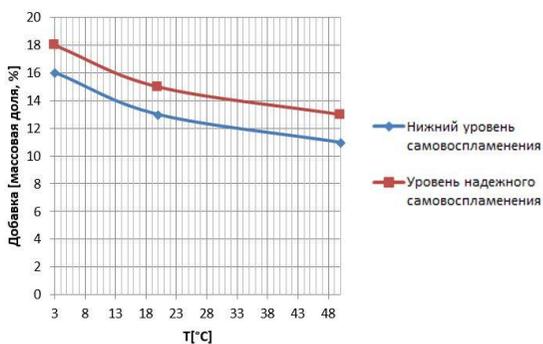
Уменьшение теплопроводности керосина с добавкой ПИБ также можно объяснить из анализа формулы (1). При добавлении высокомолекулярного полимера изменяется молекулярная масса всего горючего, что приводит к уменьшению коэффициента теплопроводности.

**В четвертой главе** приводятся результаты исследования нового самовоспламеняющегося топлива ВПВ и керосин с пирофорными добавками триэтилалюминия и триэтилбора. Представлены данные по задержке воспламенения, а также границе надежного воспламенения в зависимости от концентрации добавки в керосине и его температуры. Проведен ряд расчетов с использованием программного комплекса «АСТРА М» по определению изменения удельного импульса и состава продуктов сгорания.

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.

Пусковое горючее (ПГ), используемое в двигателях РД-170, РД-180, РД-191, РД58 и др. обеспечивает надежное воспламенение керосина при контакте с 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.

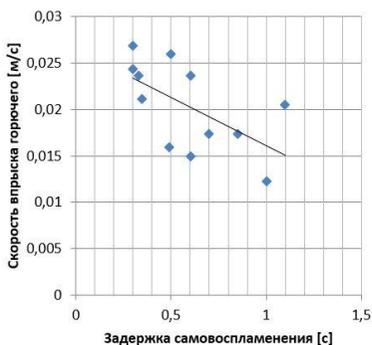
После систематических лабораторных экспериментов по самовоспламенению топливной пары ВПВ+керосин с добавками были получены следующие результаты [4].



**Рисунок 11.** 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 (420 кадров в секунду), что позволило определить время начала контакта компонентов и выявить задержку воспламенения (Рисунок 12).



**Рисунок 12.** Задержка самовоспламенения в зависимости от скорости впрыска горючего для 84,5%  $H_2O_2$

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.

Термодинамические расчеты показали рост удельного импульса с увеличением процентного содержания добавки в керосине. Температура продуктов сгорания в камере по мере увеличения процента добавки растёт быстрее, чем молекулярная масса газа, что приводит к росту скорости истечения ПС и к росту удельного импульса соответственно.

Таблица 4. Концентрации токсичных веществ на срезе сопла со степенью расширения  $\epsilon=62,76$ .

Вещество	Чистый керосин	Содержание добавки в основном горючем, %					ПДК в рабочей зоне, мг/м <sup>3</sup>	ПДК максимальная разовая, мг/м <sup>3</sup>
		10%	15%	20%	25%	100%		
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	4,486*10 <sup>-3</sup>	10*10 <sup>-3</sup>	19*10 <sup>-3</sup>	29*10 <sup>-3</sup>	0,618	5	5
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	-	<b>0,508</b>	<b>0,745</b>	<b>0,929</b>	<b>1,123</b>	<b>2,247</b>	10	0,02
CO	1,138	1,27	1,293	1,432	1,489	3,798	20	35
CO <sub>2</sub>	14 820	14 550	14 400	14 270	14 130	12 030	30 000	-
HBO <sub>2</sub>	-	105,861	158,86	212,06	265,35	<b>1076</b>	747,71	-

Полученные данные по определению состава продуктов сгорания указывают на то, что концентрация ортоборной кислоты превышает значение максимально разовой ПДК при добавлении смеси триэтилбора и триэтилалюминия к керосину, а концентрация метаборной кислоты превышает значение ПДК при процентном содержании добавки в керосине приближающемся к 100%. Остальные продукты сгорания находятся в рамках допустимых значений.

Хотя в составе продуктов сгорания 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, в состав которых входят токсичные компоненты. Кроме того, эксплуатационные показатели, что важно, делают пару керосин+ВПВ более привлекательной.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

1. Анализ выполненных к настоящему времени работ по введению полимерной добавки ПИБ к керосину убедительно показывает целесообразность ее использования в ЖРД разных схемных решений для форсирования тяги при постоянной температуре генераторного газа либо снижения температуры генераторного газа при постоянном значении тяги.

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, растворимых и нерастворимых в горючем несколько увеличивается за счет добавок, однако находятся в пределах, установленных ТУ 38.001244081.

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 горючего с ПИБ, распыл ухудшается, уменьшается угол факела распыливания. 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 ( $\alpha \approx 0,2$ ) добавка полимера ПИБ в количестве 0,05% по массе не влияет на полноту сгорания топлива. Применительно к завесному охлаждению введение ПИБ приводит к снижению суммарных тепловых потоков в стенку камеры сгорания.

5. 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 воспламенения в атмосферных условиях. По результатам термодинамических расчетов установлено, что влияние добавки-катализатора на удельный импульс незначительно, а в составе продуктов сгорания практически отсутствуют токсичные вещества.

### **Публикации по теме диссертации:**

1. Коломенцев, А.И. Определение перепада давления на форсунке керосина с различной концентрацией добавки полиизобутилена с использованием метода регрессионного анализа [Текст] / А.И.Коломенцев, А.Н.Хохлов, В.П.Ташев // Двигатель, выпуск № 6(84) 2012. - С. 28-29.

2. Ташев, В.П. Повышение энергетической эффективности ЖРД при использовании полимерной присадки к компонентам топлива [Текст] // 10-я Международная конференция «Авиация и космонавтика - 2011»: Сборник тезисов докладов. 8 - 10 ноября 2011. Москва. - СПб.: Мастерская печати, 2011. - С.182-183.

3. Заранкевич И.А. Экспериментальная отработка ЖРД МТ 500 Н на компонентах ВПВ и керосин [Текст] / И.А.Заранкевич, В.П.Ташев, А.Н.Хохлов // Всероссийская молодежная научно-техническая конференция «КОСМОС 2012»: Сборник трудов, том 3. 5 - 7 сентября 2012. Самара. - СГАУ, 2012. - С. 52-54.

4. Ташев, В.П. Исследование нового вида горючего для ЖРД на основе керосина с добавками пирофорных веществ [Текст] / В.П.Ташев, И.А.Заранкевич // Международная молодежная научная конференция «XII Королёвские чтения»: Сборник трудов, том 1. 1 - 3 октября 2013. Самара. - СГАУ, 2013. - С. 82.

5. Чудина, Ю.С. Экспериментальное исследование характеристик ЖРД тягой 500 Н на топливе ВПВ - керосин [Текст] / Ю.С.Чудина(Коватева), И.Н.Боровик, А.А.Козлов, Д.Ю.Богачёва, А.Г.Воробьев, И.А.Заранкевич, В.П.Ташев, И.С.Казеннов // Вестник МГТУ им.Н.Э.Баумана. Серия «Машиностроение» 2014. - С. 83-98.