

ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ЖРДМТ НА САМОВОСПЛАМЕНЯЮЩИХСЯ КОМПОНЕНТАХ ТОПЛИВА

© 2012 В. Е. Нигодюк, А. В. Сулинов

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет)

Предложены пути совершенствования рабочего процесса ЖРДМТ на самовоспламеняющихся компонентах топлива за счёт интенсификации жидкофазного взаимодействия компонентов, применения предкамерных устройств и учёта особенностей рабочего процесса ЖРДМТ тягой менее 1,0 Н. На основании полученных результатов даны рекомендации по организации рабочего процесса двигателей нового поколения, разработаны экспериментальные образцы ЖРДМТ и проведена их апробация.

Жидкостные ракетные двигатели малой тяги, самовоспламеняющиеся компоненты топлива, рабочий процесс, эффективность, жидкофазное смешение, предкамерное устройство.

Жидкостные ракетные двигатели малой тяги (ЖРДМТ) на самовоспламеняющихся компонентах топлива: горючее из гидразинового ряда и окислитель из азотнокислотного ряда, - широко используются в настоящее время в качестве исполнительных органов систем управления космическими аппаратами (КА) для стабилизации, ориентации и коррекции орбиты КА и имеют долгосрочные перспективы применения в будущем. Анализ показывает, что современным перспективным направлением по созданию ЖРДМТ на самовоспламеняющихся компонентах топлива нового поколения является разработка двигателей малой тяги с минимальными значениями приведённой длины камеры сгорания при обеспечении предельных значений энергетических параметров на непрерывном режиме. Это должно привести к существенному повышению удельного импульса тяги в импульсном режиме, снижению температуры камеры двигателя, улучшению динамических и экологических характеристик двигателей и повышению их надёжности. Реализация данного направления возможна за счёт повышения эффективности организации внутрикамерного рабочего процесса ЖРДМТ.

Ведущую роль в повышении эффективности внутрикамерного рабочего процесса ЖРДМТ на самовоспламеняющемся топливе играет организация эффективного экзотермического жидкофазного взаимодействия компонентов топлива [1], которая будет решающим образом обеспечивать интен-

сификацию протекания последующих процессов преобразования топлива в высокотемпературные продукты сгорания и, как следствие, будет определять высокий уровень энергетических и динамических характеристик двигателя. Повышение надёжности двигателя связано со снижением тепловых нагрузок на элементы конструкции ЖРДМТ за счёт уменьшения длины камеры сгорания двигателя и использования жидкофазных промежуточных продуктов взаимодействия компонентов в качестве внутреннего пристеночного охладителя.

Для обеспечения эффективного экзотермического жидкофазного взаимодействия компонентов топлива необходима реализация эффективного жидкофазного смешения компонентов до начала возникновения реакций в жидкой фазе. На рис. 1 показана физическая картина жидкофазного смешения компонентов топлива на примере взаимодействия плёнок компонентов под углом друг к другу при двух основных вариантах её реализации: при полном и неполном смешении компонентов. При полном смешении компонентов в жидкой фазе (рис. 1, а) время, затрачиваемое на смешение компонентов $\tau_{см}$, не превышает времени (периода) индукции жидкофазных реакций самовоспламеняющихся компонентов топлива $\tau_{жф}$ ($\tau_i^{жф}$): $\tau_{см} \leq \tau_{жф}$. При этом толщина слоя смешения равна сумме толщин взаимодействующих плёнок компонентов: $\delta_{см} = \delta_e + \delta_{ок}$. При не-

полном смешении (рис. 1, б): $\tau_{см} > \tau_{жф}$, $\delta_{см} > \delta_z + \delta_{ок}$. Часть компонентов не участвует в жидкофазных реакциях, в результате чего энергетический эффект от реализации жидкофазного смешения не будет использоваться в процессе последующего преобразования топлива в полном объёме. На рис. 1, кроме упомянутых выше параметров, показаны скорости компонентов W_1 , W_2 , угол взаимодействия плёнок α , эпюры распределения массового соотношения компонентов топлива на входе в зону смешения k_{m0} (пунктирная линия), по истечении времени смешения $\tau_{см}$ (сплошная линия) и его среднее значение по сечению $k_{мср}$ (штрихпунктирная линия).

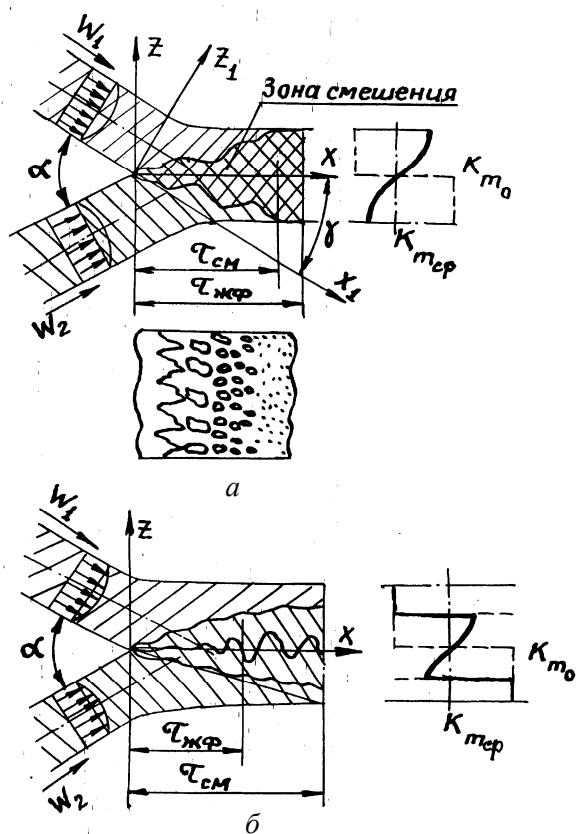


Рис. 1. Схема жидкофазного смешения при взаимодействии плёнок компонентов: а – полное смешение; б – неполное смешение

С целью организации эффективного экзотермического жидкофазного взаимодействия компонентов путём уточнения его физической модели и определения основных кинетических характеристик был проведён комплекс экспериментальных исследований основных стадий процесса жидкофазного взаимодействия компонентов и последующего преобразования топлива в продукты сго-

рания на высотных огневых стендах с использованием специальных модельных установок [2] и испытаний разработанных экспериментальных образцов ЖРДМТ различных схем смесеобразования и размерности.

В результате проведённых экспериментальных исследований на модельных установках [3] были определены верхняя граница периода индукции жидкофазной реакции компонентов топлива $\tau_i^{жф}$, период индукции газофазных реакций промежуточных продуктов $\tau_i^{зф}$, температуры промежуточных продуктов, коэффициент полноты сгорания и степень газификации топлива и их зависимости от полноты жидкофазного смешения компонентов топлива и времени пребывания жидкофазных и газофазных промежуточных продуктов (ЖФПП и ГФПП) на начальных стадиях преобразования топлива, когда комплекс $p_k^* \tau_{пр}^{зф}$ (где p_k^* и $\tau_{пр}^{зф}$ – соответственно давление и время пребывания ГФПП в канале реактора модельной установки) был не более 50 Нс/м². Полученные результаты позволили внести коррективы в существующую физическую модель жидкофазного взаимодействия самовоспламеняющихся компонентов топлива и провести моделирование и более точный расчёт процесса при организации эффективного внутрикамерного рабочего процесса ЖРДМТ.

Верхняя граница периода индукции жидкофазных реакций для рассматриваемых компонентов топлива составила 0,05 мс (50 мкс). На основании обобщения экспериментальных данных было получено соотношение для определения периода индукции газофазных реакций промежуточных продуктов:

$$\tau_i^{зф} = 8 / p_k^*,$$

где $\tau_i^{зф}$ выражается в с; p_k^* – в Па.

Температуры ГФПП и ЖФПП на режиме до воспламенения изменялись в диапазоне от 340 до 370 К. При этом значения температур ГФПП и ЖФПП при одних и тех же граничных условиях практически не отличались друг от друга.

Результаты исследования преобразования ЖФПП подтверждают предположение о перспективности использования жидкофазных промежуточных продуктов для внут-

ренного охлаждения стенок ЖРДМТ [1] при эффективной организации их внутрикамерного рабочего процесса. На модельных установках получено, что для преобразования ЖФПП, проходящего после завершения жидкофазного взаимодействия самовоспламеняющихся компонентов, характерно постоянство или незначительное увеличение их температуры по длине канала. Причём на предпламенной стадии (до воспламенения ГФПП) процесс газификации ЖФПП практически прекращается, а на начальной стадии горения процесс газификации ЖФПП происходит за счёт теплоподвода от высокотемпературных газофазных промежуточных продуктов.

На основании полученных количественных характеристик жидкофазного взаимодействия самовоспламеняющихся компонентов топлива был предложен ряд перспективных схем смесеобразования ЖРДМТ различных уровней тяг, выполненных на базе клиновых, струйных, центробежных и комбинированных смесительных элементов. В частности, разработанные и испытанные экспериментальные образцы ЖРДМТ с клиновыми смесительными элементами (рис. 2, 3) показали высокую полноту сгорания топлива: коэффициент полноты расходного комплекса для данных двигателей составил (0,94 – 0,96), - при максимальной температуре стенок камеры сгорания на непрерывном режиме работы не более 1000 °С и приведённой длине камеры сгорания менее 0,25 м.

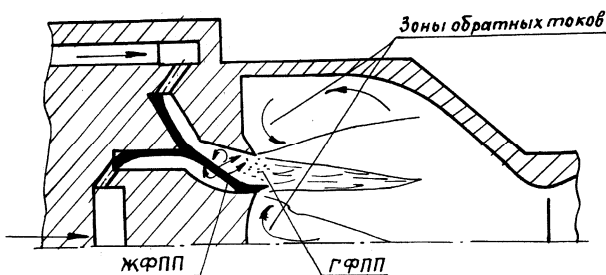


Рис. 2. Схема организации рабочего процесса на базе клинового смесительного элемента с жидкофазным взаимодействием компонентов в ядре потока камеры сгорания

В качестве примера на рис. 4, 5 представлены результаты испытаний экспериментального образца двигателя с клиновым смесительным элементом номинальной тягой 25 Н в виде зависимостей расходного

комплекса камеры сгорания от суммарного расхода топлива и массового соотношения компонентов.

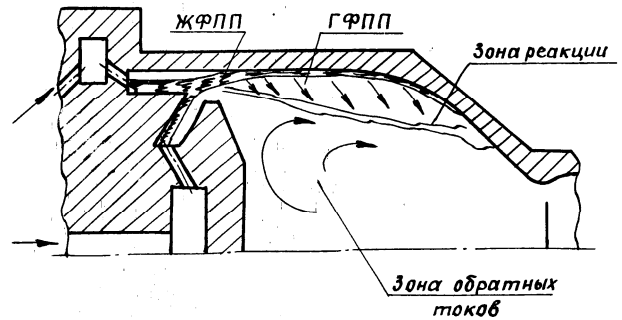


Рис. 3. Схема организации рабочего процесса на базе клинового смесительного элемента с жидкофазным взаимодействием компонентов на стенке камеры сгорания

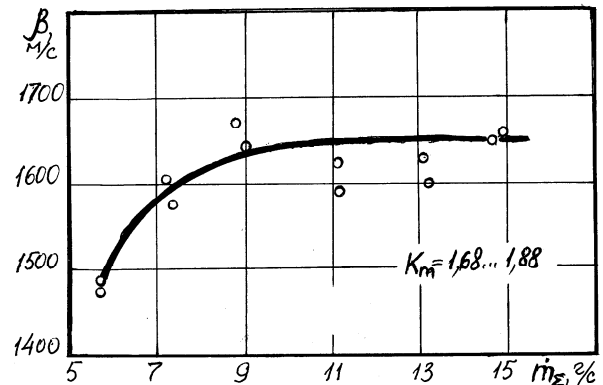


Рис. 4. Влияние суммарного расхода топлива на расходный комплекс двигателя номинальной тягой 25 Н

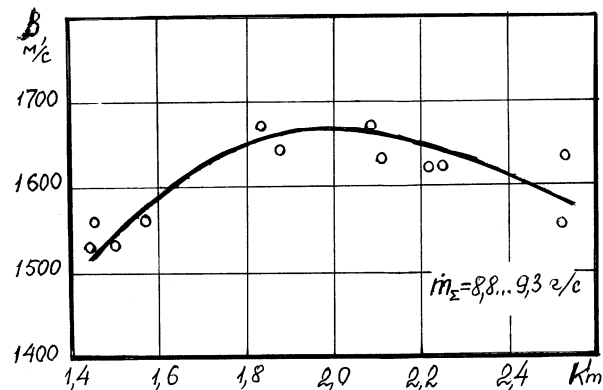


Рис. 5. Влияние массового соотношения компонентов топлива на расходный комплекс двигателя номинальной тягой 25 Н

В процессе теоретических и экспериментальных исследований рабочего процесса ЖРДМТ [4] была показана перспективность направления повышения эффективности внутрикамерного рабочего процесса двигателей с помощью предкамерных устройств и изучены основные стадии их рабочего процесса. Достоинства предкамер с точки зре-

ния интенсификации внутрикамерного рабочего процесса ЖРДМТ состоят в том, что они позволяют управлять рабочим процессом при ограниченном количестве смесительных элементов и влиять на эффективность протекания различных его стадий. Предкамера может интенсифицировать внутрикамерный рабочий процесс за счёт:

- организации эффективного жидкофазного смешения компонентов топлива, в том числе на стенке предкамеры;
- создания благоприятных условий для жидкофазных экзотермических реакций с образованием высокоактивных жидкофазных и газофазных промежуточных продуктов;
- обеспечения заданного распределения ЖФПП и ГФПП по поперечному сечению камеры сгорания;
- организации эффективного дробления жидкофазных продуктов на выходе из предкамеры;
- интенсификации газофазного перемешивания ГФПП в камере сгорания.

Кроме того, предкамера может выполнять функции теплового моста между камерой сгорания и смесительной головкой двигателя, особенно это актуально для двигателей тягой менее 1,0 Н.

Полученные результаты исследований влияния конструктивных и режимных параметров предкамеры [4] позволили выявить определяющие факторы влияния на внутрикамерный рабочий процесс ЖРДМТ на самовоспламеняющихся компонентах топлива и определить рациональные области значений основных конструктивных и режимных параметров предкамеры, позволяющих достичь максимального эффекта в приросте удельных параметров двигателей.

Из полученных экспериментальных данных исследований рабочего процесса ЖРДМТ с предкамерами следует отметить роль газодинамических факторов в рабочем процессе камеры сгорания: скорости газового потока и условий взаимодействия газофазных и жидкофазных продуктов на выходе из предкамеры.

Экспериментально было получено, что для ЖРДМТ с осевой предкамерой существует оптимальное значение отношения площадей выходного сечения предкамеры и минимального сечения сопла. Для ЖРДМТ с

кольцевой предкамерой с ростом скорости газового потока энергетическая эффективность двигателя росла и ограничения по величине отношения этих площадей в рассмотренном диапазоне изменения этих параметров не было зафиксировано.

Для ЖРДМТ тягой менее 1,0 Н, являющимися перспективным классом двигателей для систем управления малых КА, по сравнению с ЖРДМТ тягой от 10 до 400 Н выявлены ряд особенностей по организации внутрикамерного рабочего процесса [5, 6], которые необходимо учитывать при их проектировании:

- наличие одного смесительного элемента;
- использование в качестве форсунок, прежде всего, струйных форсунок - капилляров с внутренним диаметром (0,15-0,3) мм и с большими относительными длинами - более 20;
- проблемы с обеспечением стабильности гидравлических характеристик капиллярных смесительных элементов из-за значительных тепловых потоков в смесительную головку и возможной облитерации капиллярных каналов;
- сложности в эффективной организации жидкофазного смешения компонентов топлива;
- значительные потери удельного импульса тяги из-за неадиабатности процессов в камере;
- особые условия организации тепловой защиты смесительной головки и стенок камеры сгорания.

Результаты расчётно-теоретического исследования эффективности организации жидкофазного смешения компонентов в ЖРДМТ тягой менее 1,0 Н при струйной схеме смесеобразования [6] показывают, что лишь капилляры внутренним диаметром менее 0,1 мм позволяют обеспечить полное жидкофазное смешение компонентов. При тяге двигателя менее 0,15 Н полное жидкофазное смешение компонентов обеспечить не удаётся даже при сколь угодно малом диаметре капилляров, что требует поиска других путей интенсификации смешения компонентов в жидкой фазе. В качестве одного из возможных путей повышения энергетической эффективности двухкомпонент-

ных ЖРДМТ тягой (0,1...1,0) Н на СЖРТ со струйной схемой смесеобразования за счёт интенсификации жидкофазного смешения компонентов предложено использование предкамерного устройства. Результаты экспериментального исследования двигателя с предкамерой [6] подтверждают возможность интенсификации жидкофазного смешения компонентов с помощью предкамеры. В частности, при тяге двигателя 0,2 Н прирост значения коэффициента камеры сгорания ЖРДМТ с предкамерой по сравнению с исходным вариантом двигателя без предкамеры превысил 50%.

Как отмечалось выше, предкамера и в ЖРДМТ тягой менее 1,0 Н за счёт газодинамических факторов позволяет повысить экономичность двигателя. Данный факт подчёркивают экспериментальные данные (рис. 6), полученные для ЖРДМТ номинальной тягой 1,0 Н с осевой предкамерой с развитым выходным цилиндрическим участком $l_{пк}^{вых}$. С помощью увеличения длины выходного участка предкамеры $l_{пк}^{вых}$ удаётся интенсифицировать процесс взаимодействия капель ЖФПП с газовым потоком, прежде всего процесс вторичного дробления капель, и увеличить удельные параметры двигателя существенно больше, чем за счёт увеличения длины предкамеры $l_{пк}$ - времени пребывания и преобразования промежуточных продуктов в предкамере.

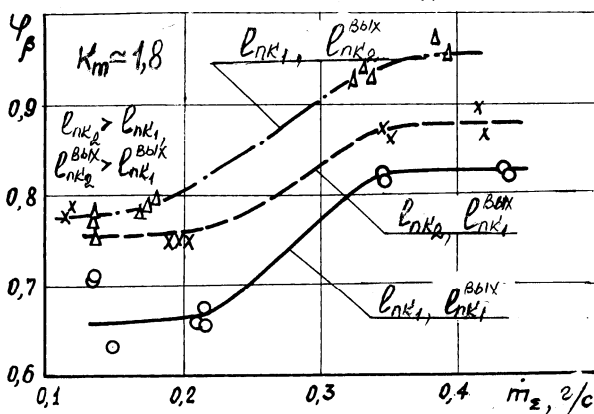


Рис. 6. Влияние выходного цилиндрического участка предкамеры на коэффициент полноты расходного комплекса

Кроме того, в качестве перспективного пути интенсификации жидкофазного взаимодействия компонентов проведена апроба-

ция на экспериментальном образце двигателя со схемой смесеобразования на базе клинового смесительного элемента.

В процессе исследований двигателей тягой менее 1,0 Н было выявлено, что тепловые факторы - тепловые потоки в смесительную головку, - могут быть причиной неустойчивости гидравлических характеристик капиллярных форсуночных элементов ЖРДМТ и, как следствие этого могут привести к неустойчивости параметров двигателя. Определены допустимые величины тепловых потоков в смесительную головку и рекомендовано для снижения тепловых потоков в головку использовать предкамерное устройство в качестве теплового моста.

На основании проведённых исследований были предложены пути совершенствования внутрикамерного рабочего процесса ЖРДМТ на самовоспламеняющихся компонентах топлива за счёт интенсификации жидкофазного взаимодействия компонентов, применения предкамерных устройств и учёта особенностей рабочего процесса ЖРДМТ тягой менее 1,0 Н. Даны рекомендации по проектированию двигателей нового поколения, разработаны экспериментальные образцы ЖРДМТ на базе перспективных схем смесеобразования и проведена их апробация.

Библиографический список

1. Дубинкин, Ю.М. Проблемы организации рабочего процесса жидкостных ракетных двигателей малой тяги [Текст] / Ю.М. Дубинкин, В.Е. Нигодюк // Известия ВУЗов. Авиационная техника. - 1993. - № 2. - С. 71...74.
2. Нигодюк, В.Е. Проточный реактор как инструмент экспериментального исследования процессов преобразования СЖРТ [Текст] / В.Е. Нигодюк, А.В. Сулинов // Вестник СГАУ. - 2009. - № 3 (19). - С. 311-315.
3. Нигодюк, В.Е. Исследование закономерностей жидкофазного взаимодействия компонентов СЖРТ [Текст] / В.Е. Нигодюк, А.В. Сулинов // Вестник СГАУ. - 2009. - № 3 (19). - С. 316-321.
4. Нигодюк, В.Е. Влияние конструктивных и режимных параметров предкамеры на рабочий процесс в камере сгорания ЖРДМТ на СЖРТ [Текст] / В.Е. Нигодюк, А.В. Сули-

нов // Вестник СГАУ. -2011. -№ 3 (27). -С. 269-276.

5. Годлевский, В.Е. К вопросу о потерях в камере сгорания двигателей малой тяги [Текст] / В.Е. Годлевский, В.Е. Нигодюк, А.В. Сулинов // Известия ВУЗов. Авиационная техника - 1983. -№ 1. - С. 77...79.

6. Нигодюк, В.Е. Повышение энергетической эффективности ЖРДМТ тягой (0,1-1,0) Н со струйной схемой смесеобразования [Текст] / В.Е. Нигодюк, А.В. Сулинов// Вестник СГАУ. -2011. -№ 3 (27). -С. 265-268.

WAYS TO IMPROVE THE WORKFLOW OF LIQUID ROCKET THRUSTERS ON HYPERGOLIC PROPELLANTS

© 2012 V. E. Nigodjuk, A. V. Sulinov

Samara State Aerospace University named of Academician S.P. Korolyov
(National Research University)

The ways to improve workflow liquid rocket thrusters on hypergolic propellants through the intensification of interaction of components in the liquid phase of Indirect devices and coping with the working process of liquid rocket engine thrust of 1.0 N. The results obtained are given advice on the organization of working process of new generation engines, developed experimental models of liquid-propellant thrusters and held their approbation.

Liquid rocket thrusters, hypergolic propellants, workflow, efficiency, mixing in the liquid phase, Indirect device.

Информация об авторах

Нигодюк Валентин Евгеньевич, кандидат технических наук, доцент кафедры теории двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет). E-mail: ke_src@ssau.ru. Область научных интересов: исследование рабочего процесса в двигателях летательных аппаратов.

Сулинов Александр Васильевич, кандидат технических наук, доцент кафедры теории двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: ke_src@ssau.ru. Область научных интересов: исследование рабочего процесса в двигателях летательных аппаратов.

Nigodjuk Valentin Evgenevich, candidate of technical science, associate Professor of Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: ke_src@ssau.ru. Area of research: the working process in the aircraft engines.

Sulinov Alexander Vasilyevich, candidate of technical science, associate Professor, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: ke_src@ssau.ru. Area of research: the working process in the aircraft engines.