

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ЖИДКОФАЗНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОМПОНЕНТОВ СЖРТ

© 2009 В. Е. Нигодюк, А. В. Сулинов

Самарский государственный аэрокосмический университет

Представленные результаты позволяют внести коррективы в существующие физические модели жидкофазного взаимодействия самовоспламеняющихся компонентов топлива и дают информацию по времени индукции жидкофазной реакции, параметрам ЖФПП и ГФПП, необходимую для моделирования и проведения более точных расчетов рассматриваемых процессов и эффективной организации внутрикамерного рабочего процесса ЖРДМТ.

Жидкофазное взаимодействие компонентов, самовоспламеняющиеся компоненты топлива, эффективность жидкофазного смешения, время индукции жидкофазных реакций, жидкофазные и газофазные промежуточные продукты

Для достижения высокой эффективности преобразования двухкомпонентного самовоспламеняющегося жидкого ракетного топлива (СЖРТ) необходимым условием является обеспечение эффективной организации жидкофазного взаимодействия компонентов [1-4]. Анализ результатов исследований рабочего процесса ЖРДМТ на самовоспламеняющемся топливе [2-4] показывает, что организация жидкофазного взаимодействия компонентов играет ведущую роль в обеспечении высокой эффективности внутрикамерных рабочих процессов ЖРДМТ как при запуске двигателя и его работе в импульсном режиме, так и при его работе на непрерывном режиме.

Поэтому потребность в проведении подобного исследования обусловлена необходимостью получения результатов, позволяющих разрабатывать ЖРДМТ повышенной эффективности и надежности.

Жидкофазное взаимодействие компонентов СЖРТ включает в себя следующие основные физико-химические процессы: жидкофазное смешение компонентов, экзотермические химические жидкофазные реакции, образование жидкофазных и газофазных промежуточных продуктов (ЖФПП и ГФПП).

Экспериментальное исследование процессов жидкофазного взаимодействия компонентов было проведено на высотном огневом стенде с использованием метода проточного реактора [5]. В качестве двухкомпо-

нентного самовоспламеняющегося жидкого ракетного топлива использовалось топливо: окислитель - четырехокись азота и горючее гидразинового ряда. Большинство экспериментов были проведены на проточном реакторе, который имел плоский клиновидный смесительный элемент, а канал (камера) реактора представлял собой канал с прямоугольным поперечным сечением. Плоский клиновидный смесительный элемент обеспечивал контакт плен жидких компонентов на кромке клина. Отдельные эксперименты проводились на проточном реакторе с центробежным смесительным элементом, канал его реактора представлял собой цилиндрический канал с коническим выходом. Жидкофазное смешение компонентов в центробежном смесительном элементе происходило на стенке цилиндрического канала реактора. Эффективность жидкофазного смешения компонентов СЖРТ на входе в канал реактора изменялась за счет изменения геометрии смесительного элемента. Конструкция смесителя и проточного реактора проектировалась таким образом, чтобы обеспечить разделение по поперечному сечению канала реактора потоков течения, образующихся в результате жидкофазного взаимодействия ЖФПП и ГФПП, с целью изучения преобразования как жидкофазных, так и газофазных промежуточных продуктов в зависимости от времени их пребывания в канале, эффективности жидкофазного смешения компонентов и других возможных влияющих на процесс

граничных условий.

Исследование осуществлялось в вакуумной камере при давлениях не более 100 Па. Эксперименты проводились при температуре компонентов топлива в диапазоне от 15 до 30°C и коэффициенте избытка окислителя от 0,5 до 0,7.

В процессе эксперимента с использованием проточного реактора измерялись усилие (реактивная тяга), создаваемое реактором, расходы компонентов топлива и параметры продуктов преобразования СЖРТ: статическое и полное давления газов в канале реактора, температуры газофазных и жидкофазных промежуточных продуктов преобразования, причем измерение параметров продуктов преобразования проводилось как по длине канала реактора, так и в выходном его сечении. Методика обработки экспериментальных данных представлена в [5].

Для изучения основных физико-химических процессов жидкофазного взаимодействия компонентов СЖРТ в проточном реакторе в процессе проводимого эксперимента реализовалась начальная стадия преобразования СЖРТ - стадия (режим) парогазогенерации, которая позволяла в зависимости от времени пребывания промежуточных продуктов преобразования разделить и выделить различные этапы жидкофазного взаимодействия компонентов топлива. Под стадией парогазогенерации, как правило, понимают процессы преобразования СЖРТ, проходящие до самовоспламенения топлива или, иначе говоря, до начала возникновения стадии (режима) горения топлива. Момент перехода к стадии горения – момент самовоспламенения топлива регистрировался по «взрывообразному» росту температуры и давления газов в канале реактора.

Основные результаты экспериментального исследования процессов жидкофазного взаимодействия компонентов СЖРТ представлены на рис. 1-6.

На рис. 1 приведены данные коэффициента полноты преобразования топлива φ_k при различных временах пребывания жидкой фазы $\tau_{пр}^{жф}$ в самых коротких для рассматриваемого эксперимента каналах проточного реактора: обозначения на рис.1: 1, 2 - экспериментальные данные, полученные при организации жидкофазного взаимодействия

компонентов на входе в канал проточного реактора; 3, 4 – данные, полученные при подаче лишь одного окислителя – четырехоксида азота в канал реактора. Длина каналов реактора составляла: $l_k=1,2$ мм (1,3); $l_k= 2,5$ мм (2,4).

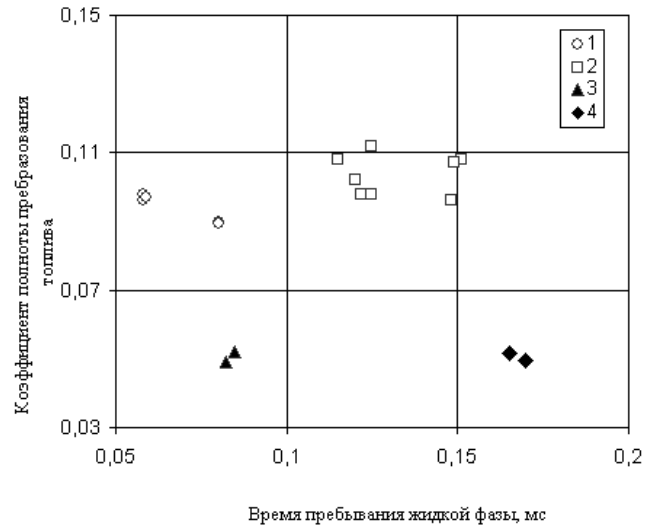


Рис. 1. Коэффициенты полноты преобразования топлива при различных временах пребывания жидкой фазы в канале проточного реактора

Из анализа экспериментальных данных, представленных на рис. 1, можно сделать два важных вывода.

Во-первых, даже при минимальных временах пребывания топлива в канале реактора, которые были реализованы в рассматриваемом эксперименте и равных $\tau_{пр}^{жф} \approx 0,05$ мс ($\tau_{пр}^{жф} \approx 50$ мкс), наблюдаются проявления жидкофазных реакций при взаимодействии компонентов в жидкой фазе. Это утверждение вытекает из того, что при подаче в канал реактора одного наиболее летучего компонента- четырехоксида азота - параметры, характеризующие полноту преобразования топлива и степень его газификации, получаются существенно более низкими, чем при организации жидкофазного взаимодействия компонентов. Поэтому на основании полученных экспериментальных данных можно утверждать, что период индукции жидкофазных реакций для рассматриваемых компонентов топлива не превышает 0,05 мс (50 мкс).

Во-вторых, эти результаты еще раз подчеркивают важность организации жидкофазного взаимодействия компонентов в повышении эффективности преобразования

СЖРТ, поскольку при организации жидкофазного взаимодействия компонентов (по сравнению с процессом испарения) компонентов коэффициент полноты преобразования топлива и степень его газификации существенно возрастают. При организации жидкофазного взаимодействия компонентов коэффициент полноты преобразования топлива на таких коротких длинах канала реактора 1,2 мм, 2,5 мм составил $\varphi_k \approx (0,09 \dots 0,11)$ и степень газификации топлива $z_{gf} \approx (0,37 \dots 0,44)$, при этом коэффициент эффективности жидкофазного смешения компонентов превышал 0,7. В то же время для варианта с подачей окислителя коэффициент полноты преобразования топлива был равен $\varphi_k \approx 0,05$ и степень газификации топлива $z_{gf} \approx 0,2$.

На рис. 2 представлены экспериментальные данные температур ГФПП и ЖФПП, образующихся при жидкофазном взаимодействии компонентов при различных массовых расходах топлива в диапазоне от 4,5 до 13,3 г/с для канала реактора длиной $l_k = 12,5$ мм.

Величины температур ГФПП и ЖФПП практически совпадают между собой и изменяются в зависимости от массового расхода топлива от 340 до 370 К. Рост температур с увеличением массового расхода топлива обусловлен ростом полноты жидкофазного смешения компонентов топлива и, как следствие этого, более большим выделением энергии при протекании экзотермических химических жидкофазных реакций.

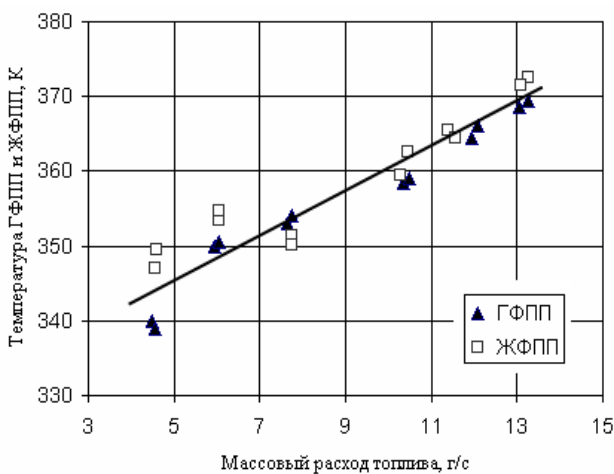


Рис. 2. Зависимость температуры ГФПП и ЖФПП от массового расхода топлива

Влияние полноты жидкофазного смешения компонентов топлива на эффективность преобразования топлива отчетливо прослеживается при изучении процессов преобразования СЖРТ с использованием смесительных элементов различной геометрии при разных длинах канала проточного реактора (рис. 3, 4).

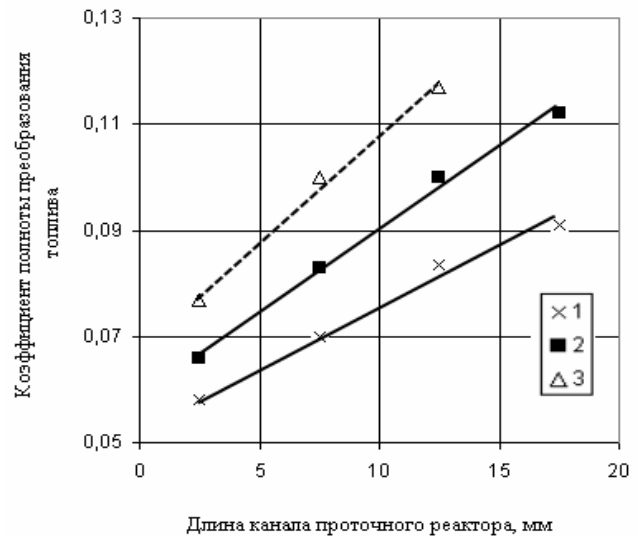


Рис. 3. Влияние геометрии смесительного элемента на коэффициент полноты преобразования топлива

Коэффициент жидкофазного смешения для рассматриваемых на рис. 3, 4 смесительных элементов при одном и том же массовом расходе топлива составлял $\varphi_{жф} \approx 0,37$ (1); $\approx 0,49$ (2); $\approx 0,63$ (3).

Из анализа рис. 3, 4 видно, что с ростом полноты жидкофазного смешения компонентов топлива эффективность преобразования топлива возрастает прежде всего за счет газификации топлива. Кроме того, из данных, представленных на рис. 3 и 4 следует, что с ростом длины канала реактора с 2,5 до (12,5-17,5) мм и, следовательно, времени пребывания, прежде всего, ЖФПП, полнота преобразования топлива и степень его газификации возрастают. При этом время пребывания ЖФПП в рассматриваемом случае изменяется от 0,2 до (1,0...1,5) мс. Повышение полноты преобразования топлива с увеличением времени пребывания обусловлено процессом преобразования ЖФПП, их газификацией. Например, на длине канала реактора 7,5 мм при изменении коэффициента эффективности жидкофазного смешения от 0,37 до 0,63 коэффициент полноты преобразования топлива растет с 0,07 до 0,10, а степень газификации топлива увеличивается с 0,30 до 0,44.

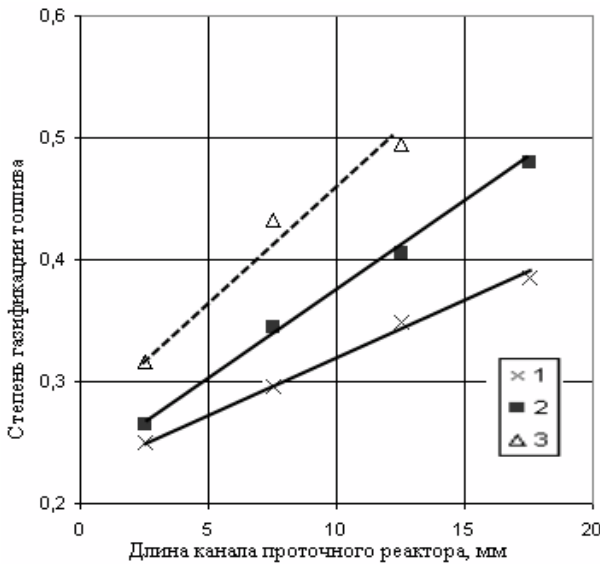


Рис. 4. Влияние геометрии смесительного элемента на степень газификации топлива

При дальнейшем увеличении длины канала реактора (рис. 5, 6) и, следовательно, увеличении времени пребывания ЖФПП более (1,0...1,5) мс процесс жидкофазного взаимодействия самовоспламеняющегося жидкого ракетного топлива завершается. Значения температуры ЖФПП, коэффициента полноты преобразования топлива и степени его газификации с ростом длины канала (времени пребывания ЖФПП) достигают максимальных величин и выходят на «полку». Время протекания стадии жидкофазного взаимодействия СЖРТ составляет около (1,0...1,5) мс в зависимости от эффективности жидкофазного смешения компонентов, чем выше эффективность жидкофазного смешения, тем меньше время протекания данной стадии.

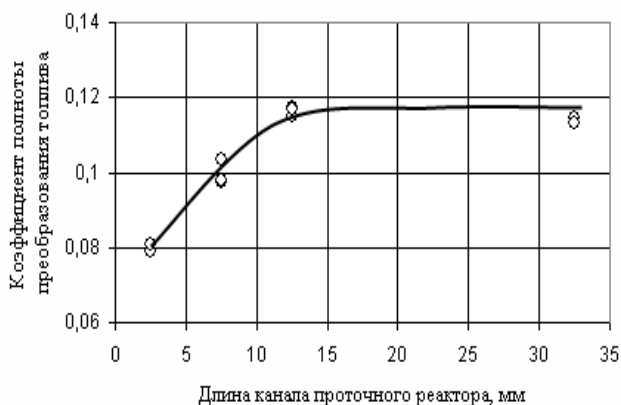


Рис. 5. Зависимость коэффициента полноты преобразования топлива от длины канала проточного реактора



Рис. 6. Зависимость температуры ЖФПП от длины канала проточного реактора

В заключение анализа результатов проведенного экспериментального исследования процессов можно отметить следующее. На стадии жидкофазного взаимодействия СЖРТ происходит протекание экзотермических жидкофазных реакций с интенсивным выделением ГФПП. При этом степень газификации топлива может достигать ~50%. Эффективность газификации ЖФПП зависит от двух факторов: полноты жидкофазного смешения компонентов топлива и времени пребывания жидкофазных продуктов в канале реактора. С увеличением полноты жидкофазного смешения компонентов топлива и времени пребывания жидкофазных продуктов в канале полнота преобразования топлива возрастала. В процессе изучения процессов жидкофазного взаимодействия компонентов была определена верхняя граница периода индукции жидкофазной реакции компонентов топлива, которая составила $\tau_{пр}^{жф} \approx 0,05$ мс ($\tau_{пр}^{жф} \approx 50$ мкс). Было показано, что степень газификации топлива при наличии жидкофазного взаимодействия компонентов существенно выше степени парообразования окислителя при тех же граничных условиях. Температуры ЖФПП и ГФПП на стадии парогенерации практически не отличались друг от друга и изменялись в диапазоне от 340 до 370°C. Была дана оценка времени протекания стадии жидкофазного взаимодействия самовоспламеняющегося ЖРТ, которая составила около (1,0...1,5) мс, в зависимости от эффективности жидкофазного смешения компонентов.

Полученные результаты позволяют внести коррективы в существующие физические модели жидкофазного взаимодействия самовоспламеняющихся компонентов топлива и дают информацию по времени ин-

дукции жидкофазной реакций, параметрам ЖФПП и ГФПП, необходимую для моделирования и проведения более точных расчетов рассматриваемых процессов и эффективной организации внутрикамерного рабочего процесса ЖРДМТ.

Библиографический список

1. Неустойчивость горения в ЖРД / под ред. Д.Т. Харье и Ф.Г. Рирдона. – М.: Мир, 1975. – 870 с.
2. Дубинкин, Ю.М. Проблемы организации рабочего процесса жидкостных ракетных двигателей малой тяги / Ю.М. Дубинкин, В.Е. Нигодюк // Изв. вузов. Авиационная техника. - 1993. - № 2. - С. 71...74.
3. Нигодюк, В.Е. Исследование закономерностей преобразования самовоспламеняющегося жидкого ракетного топлива / В.Е. Нигодюк, А.В. Сулинов // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: матер. междунар. науч.-техн. конференции. – Ч. 1. - Самара: СГАУ, 2006.- С. 29-31.
4. Нигодюк, В.Е., Некоторые пути повышения эффективности ЖРДМТ на самовоспламеняющихся компонентах топлива / В.Е. Нигодюк, А.В. Сулинов // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: матер. междунар. науч.-техн. конференции. – Ч. 1. - Самара: СГАУ, 2006.- С. 27-29.
5. Нигодюк, В.Е., Метод исследований процессов преобразования самовоспламеняющихся жидких ракетных топлив. / В.Е. Нигодюк, А.В. Сулинов // Проблемы и пер-

спективы развития двигателестроения: матер. междунар. науч.-техн. конференции. – Ч. 1. - Самара: СГАУ, 2006.- С. 31, 32.

References

1. Instability of burning in ZHRD/Under D.T.Hare and F.G.Rirdona's edition. – M, the World, 1975. – 870 with.
2. Dubinkin J.M., Nigodjuk V. E. Problems of the organisation of working process of liquid rocket engines of small draught//News of HIGH SCHOOLS. Aviation that-nika. 1993. № 2, with. 71 ... 74.
3. Nigodjuk V. E, Sulinov A.V. Research of laws of transformation of self-igniting liquid rocket fuel//Problems and development prospects dvi-gatelestroenija / Materials of the international scientific and technical conference. A part 1. Samara: SSAU, 2006, with. 29-31.
4. Nigodjuk V. E, Sulinov A.V. Some of a way of increase of efficiency liquid rocket engine of small draught on self-igniting components of fuel//Problems and prospects of development dvigate-lestroenija/materials of the international scientific and technical conference. A part 1. Samara: SSAU, 2006, with. 27-29.
5. Nigodjuk V. E, Sulinov A.V.method of researches of processes of transformation self-igniting liquid rocket топлив.//- Problems and prospects of development of a dvigate-telestructure / Materials of the international scientific and technical conference. A part 1. Samara: SSAU, 2006, with. 31, 32.

RESEARCH OF LAWS OF INTERACTION OF COMPONENTS IN A LIQUID PHASE SELF-IGNITING LIQUID ROCKET FUEL

©2009 V. E. Nigodjuk, A. V. Sulinov

Samara State Aerospace University

Experimental results of processes of interaction of components in a liquid phase of self-igniting liquid rocket fuel are presented. The data on sizes of time of an induction of reactions in a liquid phase and to temperatures of liquid and gas intermediate products is obtained. Sizes of completeness of transformation and degree of gasification of fuel at the given stage of transformation of fuel and influence on them of completeness of mixture of components in a liquid phase and time of stay of intermediate products are defined.

Interaction of components in the liquid phase, self-igniting components of fuel, efficiency of mixture in a liquid phase, time of an induction of reactions in a liquid phase, liquid and gas intermediate products

Информация об авторах

Нигодюк Валентин Евгеньевич, кандидат технических наук, доцент кафедры Теории двигателей летательных аппаратов Самарского государственного аэрокосмического университета. Тел. (846) 335-59-21. E-mail: engin@ssau.ru. Область научных интересов: исследование рабочего процесса в двигателях летательных аппаратов.

Сулинов Александр Васильевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Научно-исследовательского центра космической энергетики Самарского государственного аэрокосмического университета. Тел. (846) 335-59-21. E-mail: engin@ssau.ru. Область научных интересов: исследование рабочего процесса в двигателях летательных аппаратов.

Nigodjuk Valentine Evgenevich, Candidate of Technical Science, the senior lecturer of The theory of engines of flying machines department of Samara state aerospace university. Phone: (846) 335-59-21. E-mail: engin@ssau.ru. Area of research: working process in engines.

Sulinov Alexander Vasilevich, Candidate of Technical Science, the senior scientific employee of Scientifically-issledovatelky the centre of space power of Samara state aerospace university. Phone: (846) 335-59-21. E-mail - engin@ssau.ru. Area of research: working process in engines.