

УДК 621.453

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ПРОДУКТОВ ЖИДКОФАЗНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СЖРТ НА НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ ГОРЕНИЯ

© 2014 В.Е. Нигодюк, А.В. Сулинов

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

В статье приведены результаты экспериментального исследования преобразования промежуточных (жидкофазных и газифицированных) продуктов экзотермического жидкофазного взаимодействия самовоспламеняющихся компонентов топлива на начальной стадии горения. Для исследования рассматриваемой стадии преобразования промежуточных продуктов использован экспериментальный метод проточного реактора. В качестве систем смесеобразования компонентов топлива в проточном реакторе в процессе эксперимента применялись клиновые и центробежный смесительные элементы, которые обеспечивали взаимодействие компонентов в жидкой фазе и последующее течение жидкофазных промежуточных продуктов по стенке канала реактора, тем самым разделяя потоки жидкофазных и газифицированных промежуточных продуктов по поперечному сечению. В процессе эксперимента выявлено влияние следующих основных параметров на процессы преобразования промежуточных продуктов: эффективности жидкофазного смешения компонентов топлива, времени пребывания промежуточных продуктов в канале и давления газифицированных продуктов. Результаты исследования преобразования жидкофазных промежуточных продуктов на стадии горения подтверждают предположение о перспективности использования жидкофазных продуктов для внутреннего охлаждения стенок камеры ракетного двигателя малой тяги при эффективной организации их внутрикамерного рабочего процесса, поскольку по всей длине канала реактора температура жидкофазных продуктов, омывающей внутреннюю поверхность канала, изменяется незначительно. Экзотермические процессы жидкофазного взаимодействия компонентов топлива на этой стадии практически завершаются, и для последующей газификации жидкофазных промежуточных продуктов требуется теплоподвод энергии от ранее газифицированных промежуточных продуктов. В отличие от преобразования жидкофазных промежуточных продуктов процесс преобразования газифицированных промежуточных продуктов на начальной стадии горения происходит достаточно интенсивно. Значение температуры газифицированных промежуточных продуктов в зависимости от граничных условий в предпламенной зоне составляло 900...1100 К, а в выходном сечении канала реактора достигало 1400...2000 К.

Самовоспламеняющееся жидкое ракетное топливо, жидкофазное взаимодействие, газифицированные и жидкофазные промежуточные продукты, стадия горения, экспериментальное исследование.

Двухкомпонентные самовоспламеняющиеся жидкие ракетные топлива (СЖРТ) на основе гидразиновых горючих и азотнокислотноокислительных окислителей широко применяются в ракетных двигателях малых тяг (РДМТ) - исполнительных органах систем управления космическими аппаратами (КА).

Ведущую роль в обеспечении высокой эффективности внутрикамерного рабочего процесса РДМТ играет организация жидкофазного взаимодействия самовоспламеняющихся компонентов топлива [1, 2] как при запуске двигателя, так и при его работе на непрерывном режиме. При этом в результате экзотермического жидкофазного взаимодействия компонентов

топлива в период до воспламенения образуются высокоактивные газифицированные (дымообразные аэрозольные) и жидкофазные промежуточные продукты (соответственно ГФПП и ЖФПП), условия образования и относительные количества которых определяют скорость преобразования топлива в конечные продукты сгорания.

В статье приведены результаты экспериментального исследования преобразования промежуточных продуктов экзотермического жидкофазного взаимодействия самовоспламеняющихся компонентов топлива на начальной стадии горения (после воспламенения газифицированных продуктов). Исследование

преобразования ГФПП на начальной стадии горения ограничивалось областью изменения комплекса $p_k^* \tau_{np}^{сф}$ (где p_k^* и $\tau_{np}^{сф}$ - соответственно давление и время пребывания ГФПП в канале реактора) в диапазоне от 10 до 50 Нс/м².

Для исследования рассматриваемой стадии преобразования промежуточных продуктов жидкофазного взаимодействия компонентов СЖРТ использован экспериментальный метод проточного реактора [3]. В качестве систем смесеобразования компонентов топлива в проточном реакторе в процессе эксперимента использовались клиновые (ЭДКл) и центробежный (ЭДЦ) смесительные элементы, которые обеспечивали взаимодействие компонентов в жидкой фазе и последующее течение ЖФПП по стенке канала реактора, тем самым разделяя потоки жидкофазных и газифицированных промежуточных продуктов по поперечному сечению. Большинство экспериментов было проведено на проточном реакторе, который имел плоский клиновой смесительный элемент ЭДКл, а камера реактора представляла собой канал с прямоугольным поперечным сечением. Плоский клиновой смесительный элемент ЭДКл обеспечивал контакт пелён жидких компонентов на кромке клина. Отдельные эксперименты проводились на проточном реакторе с центробежным смесительным элементом ЭДЦ, реактор представлял собой цилиндрический канал с коническим выходом. Жидкофазное смешение компонентов в центробежном смесительном элементе, представляющего собой двухкомпонентную форсунку внешнего смешения, происходило на стенке цилиндрического канала реактора. Эффективность жидкофазного смешения компонентов СЖРТ на входе в канал реактора изменялась за счёт изменения геометрии смесительного элемента. Конструкция спроектированного проточного реактора давала возможность реализовать структуру потока продуктов преобразования топлива, в которой отсутствовали массообмен и охлаждающее влияние «свежих», вновь образующихся про-

межуточных продуктов жидкофазного взаимодействия самовоспламеняющихся компонентов топлива на предпламенный разогрев ранее поступившей в канал реактора порции промежуточных продуктов.

В процессе эксперимента с использованием метода проточного реактора измерялись усилие (тяга), создаваемое реактором; расходы компонентов топлива и параметры промежуточных продуктов преобразования СЖРТ: статическое p_k и полное p_k^* давления газов в канале реактора, температуры газифицированных T_k^* и жидкофазных $T_{кжф}^*$ промежуточных продуктов преобразования. Измерение параметров продуктов преобразования выполнялось либо в выходном его сечении l_k (рис. 1 а), либо по длине канала x (рис. 1 б, в) реактора. В качестве первичных преобразователей температуры использовались хромель-копелевые, хромель-алюмелевые и вольфрам-ренийевые термопары диаметром «горячего» спая 0,2 мм.

Исследование проводилось на стационарных режимах работы проточного реактора. При исследовании промежуточных продуктов использовались реакторы различной длины (от 1,2 до 62,5 мм), что позволяло изменять время пребывания ГФПП и ЖФПП в канале реактора. В процессе эксперимента также изменялись режимные параметры смешения компонентов топлива в жидкой фазе за счёт изменения суммарного расхода компонентов топлива. Варьировалось давление газов и скорость течения газов в канале путём изменения режимных параметров, площади поперечного сечения (высоты канала) основного и выходного участков канала проточного реактора. Исследования осуществлялись в вакуумной камере при давлении не более 100 Па. Эксперименты проводились при температуре компонентов топлива в диапазоне 15...25°C и в основном при коэффициенте избытка окислителя в диапазоне 0,5...0,7.

В зависимости от граничных условий процесс в канале реактора протекал либо на предпламенном режиме, либо включал режим со стадией горения топлива. Воспламенение ГФПП происходило по механизму теплового взрыва для реакций второго порядка [4], и момент воспламенения регистрировался по взрывообразному росту температуры газов в канале реактора.

Давление газифицированных промежуточных продуктов в канале реактора в предпламенный период в процессе эксперимента составляло $p_k^* = 0,02...0,3$ МПа, а давление на режиме со стадией горения - $p_k^* = 0,2...0,7$ МПа. Температуры ГФПП и ЖФПП на предпламенном режиме были равны $T_k^* = 340...370$ К и слабо зависели от изменения граничных условий в рассмотренном диапазоне.

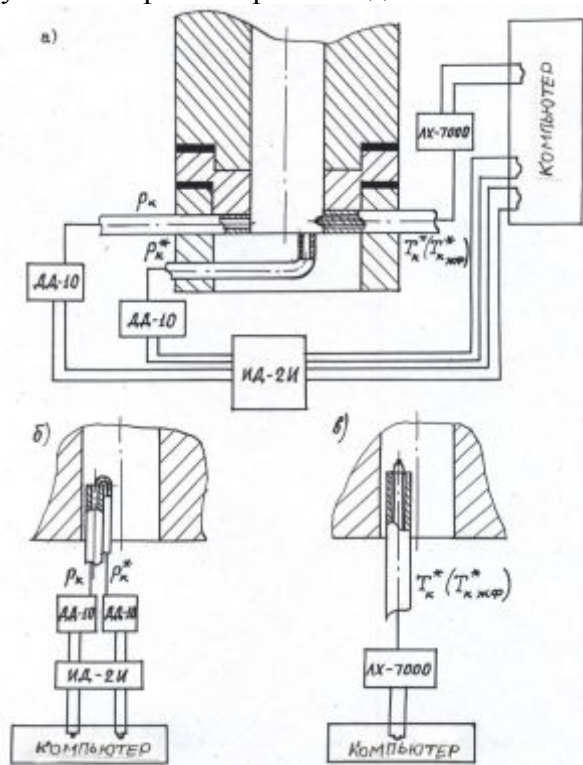


Рис. 1. Схема измерений параметров промежуточных продуктов преобразования топлива в плоском канале проточного реактора с клиновым смесительным элементом ЭДКл

С помощью комплекса $p_k^* \tau_{пр}^{эф}$ был определен в рассматриваемых граничных условиях диапазон значений комплекса, равных $p_k^* \tau_{пр}^{эф} = 8...10$ Нс/м² (рис. 2, где

φ_k - коэффициент полноты преобразования топлива в проточном реакторе) [4], при которых происходил процесс воспламенения в газовой фазе и переход преобразования топлива из предпламенного режима к режиму с реализацией стадии горения топлива.

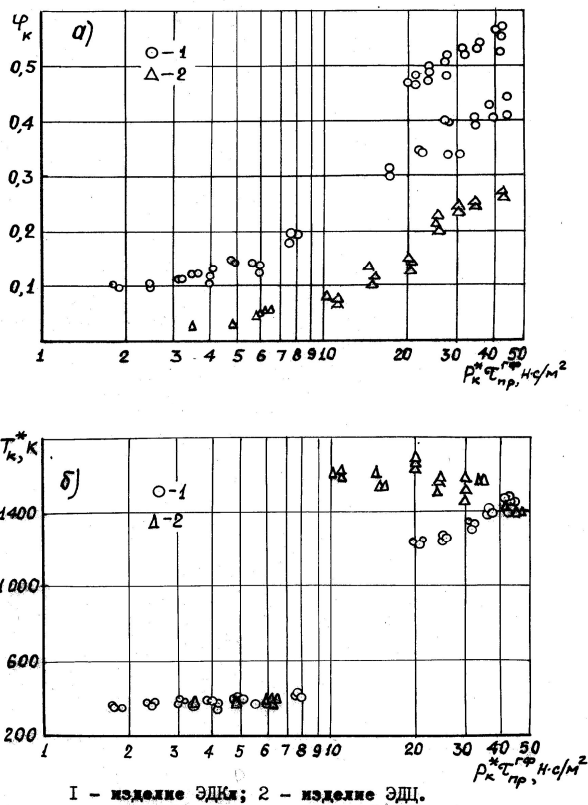


Рис. 2. Зависимости коэффициента полноты преобразования топлива φ_k (а) и температуры газифицированных продуктов T_k^* (б) от комплекса $p_k^* \tau_{пр}^{эф}$

В процессе эксперимента выявлено влияние следующих основных параметров на процессы преобразования ЖФПП и ГФПП экзотермического жидкофазного взаимодействия самовоспламеняющихся компонентов топлива на начальной стадии горения: эффективности жидкофазного смешения компонентов топлива, времени пребывания промежуточных продуктов в канале и давления газифицированных продуктов.

Результаты измерений параметров промежуточных продуктов преобразова-

ния топлива (температуры ГФПП T_k^* ; температуры ЖФПП $T_{кжф}^*$; полного p_k^* и статического p_k давлений ГФПП) и оценки полноты преобразования топлива (коэффициента полноты преобразования топлива φ_k ; степени газификации топлива $z_{зф}$) по длине канала x проточного реактора и в зависимости от длины канала реактора l_k для различных массовых расходов топлива $\dot{m}_{ср}$ представлены на рис. 3 - 6.

Из анализа представленных на рис. 3 - 6 результатов можно отметить следующее.

Зона стадии горения топлива (расположение фронта пламени) находится на расстоянии 6 мм от плоскости выходного сечения смесительного элемента (рис. 3). Для начальной стадии горения преобразование ЖФПП, проходящего после завершения большей части жидкофазного взаимодействия самовоспламеняющихся компонентов [2], характерно постоянство или незначительное увеличение температуры ЖФПП по длине канала (рис. 3). Причём на предпламенной стадии (до воспламенения ГФПП) процесс газификации ЖФПП практически прекращается, а на начальной стадии горения (рис. 4 - 6) процесс газификации ЖФПП происходит за счёт теплоподвода от высокотемпературных газофазных промежуточных продуктов.

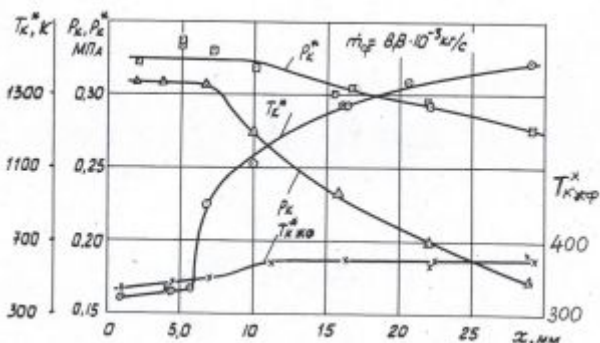


Рис. 3. Результаты измерений параметров промежуточных продуктов преобразования топлива по длине канала x проточного реактора ЭДКл высотой $h_k = 4$ мм

В рассматриваемом случае степень газификации топлива на предпламенной стадии (рис. 6, поз. 1, 2) достигает 0,5...0,6 в зависимости от массового расхода топлива, который существенно влияет на эффективность жидкофазного взаимодействия компонентов топлива: с ростом массового расхода эффективность жидкофазного смешения компонентов возрастает. На стадии горения (рис. 4, 5; рис. 6, поз. 3,4) степень газификации на завершающей стадии жидкофазного взаимодействия компонентов топлива (l_k до 12,5 мм) и вследствие подвода тепла от высокотемпературных газифицированных промежуточных продуктов к ЖФПП возрастает до 0,8...0,85.

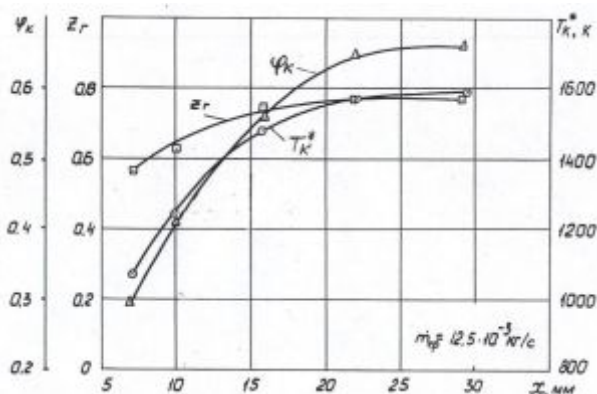


Рис. 4. Изменение коэффициента полноты преобразования топлива φ_k , степени газификации топлива $z_{зф}$ и температуры ГФПП T_k^* по длине канала x проточного реактора ЭДКл высотой $h_k = 4$ мм

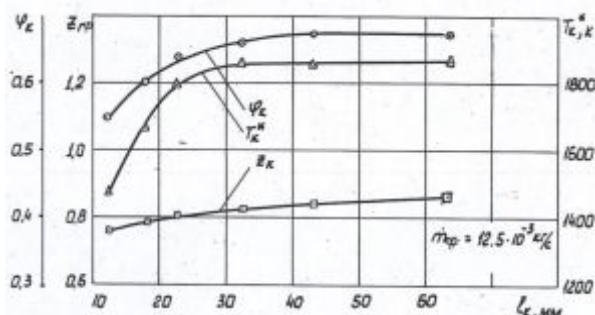


Рис. 5. Изменение коэффициента полноты преобразования топлива φ_k , степени газификации топлива $z_{зф}$ и температуры ГФПП T_k^* в зависимости от длины канала l_k проточного реактора ЭДКл высотой $h_k = 2$ мм

Результаты исследования преобразования жидкофазных промежуточных продуктов на стадии горения подтверждают предположение о перспективности использования ЖФПП для внутреннего охлаждения стенок РДМТ [1] при эффективной организации их внутрикамерного рабочего процесса, поскольку по всей длине канала реактора температура ЖФПП, омывающей внутреннюю поверхность канала, изменяется незначительно. Экзотермические процессы жидкофазного взаимодействия СЖРТ завершены и для последующей газификации жидкофазных промежуточных продуктов требуется теплоподвод энергии от ГФПП.

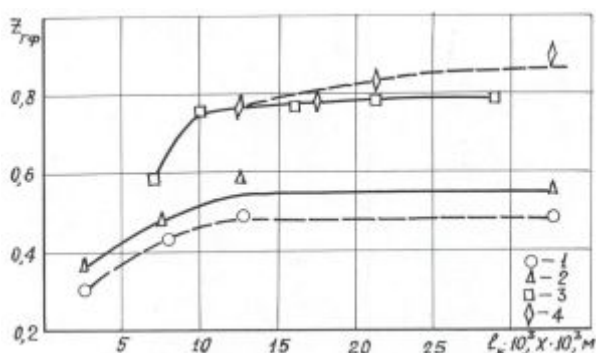


Рис. 6. Зависимости степени газификации топлива $z_{гф}$ от длины канала l_k (поз. 1, 2, 4) и по длине канала x (поз. 3) проточного реактора ЭДКл высотой $h_k = 2$ мм и $h_k = 4$ мм при различных расходах топлива на предпламенном режиме (поз. 1, 2) и режиме со стадией горения (поз. 3, 4): 1 - $\dot{m}_{ср} = 4,5 \cdot 10^{-3}$ кг/с; 2 - $\dot{m}_{ср} = 6,0 \cdot 10^{-3}$ кг/с; 3, 4 - $\dot{m}_{ср} = 8,6 \cdot 10^{-3}$ кг/с

В отличие от преобразования ЖФПП процесс преобразования ГФПП на стадии горения после воспламенения происходит достаточно интенсивно. Значение температуры газифицированных промежуточных продуктов в зависимости от граничных условий в выходном сечении канала реактора достигало 1400...2000 К, в предпламенной зоне составляло 900...1100 К (рис. 3 - 5).

В процессе исследования преобразования ГФПП на начальной стадии горения было зафиксировано, что с увеличением эффективности жидкофазного смешения

компонентов при равных других граничных условиях (длинах канала реактора – времени пребывания ГФПП) увеличивается температура газофазных промежуточных продуктов, растёт коэффициент полноты преобразования топлива и величина давления ГФПП. Например (рис. 7 а), на длине канала реактора 17,5 мм при изменении коэффициента эффективности жидкофазного смешения [3] $\varphi_{жф}$ от 0,47 до 0,69 коэффициент полноты преобразования топлива φ_k растёт с 0,31 до 0,52.

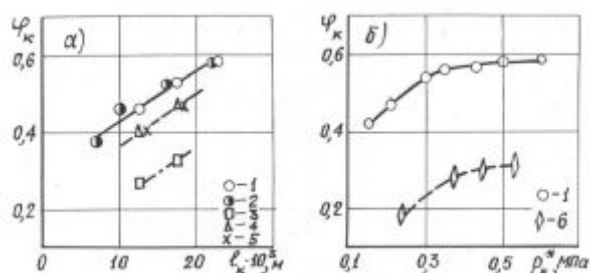


Рис. 7. Зависимости коэффициента полноты преобразования топлива φ_k от длины канала l_k и от давления ГФПП p_k^* : а - $\dot{m}_{ср} \approx 8,6 \cdot 10^{-3}$ кг/с; б - $l_k = 17,5$ мм; 1...5 - реактор ЭДКл; 6 - реактор ЭДЦ; 1, 3-6 - l_k ; 2-х; 1, 2 - $\varphi_{жф} \approx 0,69$; 3 - $\varphi_{жф} \approx 0,47$; 4 - $\approx 0,65$; 5 - $\varphi_{жф} \approx 0,58$

При сравнении влияния на эффективность преобразования СЖРТ геометрии спроектированных клиновидного ЭДКл и центробежного ЭДЦ смесительных элементов при одинаковых длинах канала реактора и давлениях ГФПП (рис. 7 б) клиновидный смесительный элемент обеспечивал увеличение коэффициента полноты преобразования топлива φ_k по сравнению с центробежным смесительным элементом почти в два раза.

На рис. 8 представлены результаты исследования влияния высоты канала проточного реактора ЭДКл (с постоянной высотой по длине канала $h_k = 2$ мм и $h_k = 4$ мм и каналом высотой $h_k = 4$ мм с выходным участком высотой $h_k^{вых} = 2$ мм) на эффективность преобразования СЖРТ. Высота канала проточного реактора, с одной стороны, за счёт изменения скорости

газового потока может оказывать влияние на время пребывания ГФПП в канале и на процесс теплообмена между ГФПП и ЖФПП и, следовательно, на изменение интенсивности газификации жидкофазных продуктов. С другой стороны, изменение высоты выходного сечения канала приводит к изменению давления в канале и, как следствие, к изменению эффективности протекания химических реакций в газовой фазе.

Анализируя полученные экспериментальные данные по влиянию высоты канала проточного реактора на эффективность преобразования СЖРТ, можно отметить, что в рассматриваемых граничных условиях при температуре ГФПП 1600...1900 К влияние давления в канале на эффективность протекания химических реакций в газовой фазе, судя по полученным значениям температуры ГФПП, незначительно. Наибольшее влияние высота канала в полученных результатах оказывает на коэффициент полноты преобразования топлива, который при переходе с реактора высотой $h_k = 4$ мм на реактор с высотой $h_k = 2$ мм, несмотря на уменьшение времени пребывания рабочего тела в канале, возрастает с 0,6 до 0,65 (при массовом расходе $\dot{m}_{cp} = 8,6 \cdot 10^{-3}$ кг/с). С уменьшением высоты канала интенсифицируется процесс теплообмена между ГФПП и ЖФПП, что приводит к росту степени газификации жидкофазных продуктов.

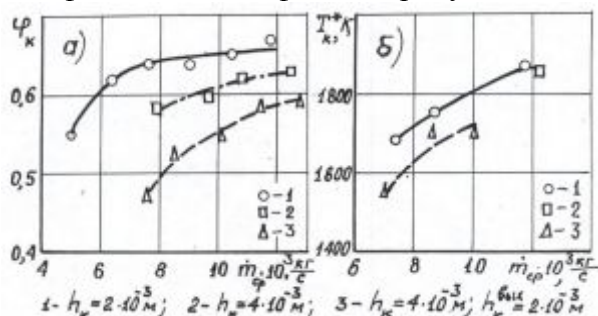


Рис. 8. Влияние высоты канала проточного реактора ЭДКл длиной $l_k = 30...32,5$ мм на эффективность преобразования СЖРТ при различных массовых расходах топлива \dot{m}_{cp}

На проточном реакторе ЭДКл с постоянной по длине канала высотой $h_k = 4$ мм был проведён эксперимент с установкой внутри канала платины, разделяющей канал по высоте пополам на расстоянии 2,5 мм от смесительной головки до его выходного сечения и позволяющей исследовать преобразование жидкофазных и газофазных промежуточных продуктов отдельно. Полученные результаты исследования в ходе данного эксперимента подтвердили отсутствие существенных изменений процесса преобразования ГФПП: режим стадии горения регистрируется в части канала с ГФПП, при этом уровень значений температуры газифицированных продуктов, измеренных в выходном сечении канала, в сравнении с исходным вариантом (без пластины) сопоставим.

Основной объём экспериментальных исследований преобразования промежуточных продуктов жидкофазного взаимодействия СЖРТ, как отмечалось выше, был проведён для двухкомпонентного топлива с коэффициентом избытка окислителя 0,5...0,7. Отдельные экспериментальные данные по преобразованию газифицированных промежуточных продуктов были получены в более широком диапазоне изменения коэффициента избытка окислителя от 0,3 до 1,4. Результаты представлены на рис. 9.

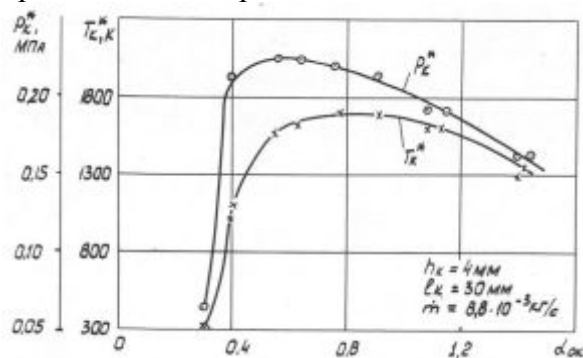


Рис. 9. Влияние коэффициента избытка окислителя $\alpha_{ок}$ на параметры газифицированных промежуточных продуктов p_k^* и T_k^*

Из рис. 9 видно, что при коэффициенте избытка окислителя $\alpha_{ок} \approx 0,3$ при

достаточно длительном времени пребывания промежуточных продуктов в канале реактора не удаётся реализовать процесс воспламенения топлива. С другой стороны, при избытке окислителя (коэффициент избытка окислителя достигает $\alpha_{ок} \approx 1,4$), процесс воспламенения топлива и стадия горения в канале реактора реализуются.

Полученные экспериментальные данные по преобразованию промежуточных продуктов (ГФПП и ЖФПП) экзотермического жидкофазного взаимодействия самовоспламеняющихся компонентов топлива на начальной стадии горения можно использовать при создании физической модели преобразования СЖРТ и для эффективной организации внутрикамерного рабочего процесса РДМТ в процессе их проектирования.

Библиографический список

1. Дубинкин Ю.М., Нигодюк В.Е. Проблемы организации рабочего процесса жидкостных ракетных двигателей малой тяги // Известия ВУЗов. Авиационная техника. 1993. № 2. С. 71-74.

2. Нигодюк В.Е., Сулинов А.В. Исследование закономерностей жидкофазного взаимодействия компонентов СЖРТ // Вестник СГАУ. 2009. № 3(19), ч. 2. С. 316-321.

3. Нигодюк В.Е., Сулинов А.В. Проточный реактор как инструмент экспериментального исследования процессов преобразования СЖРТ // Вестник СГАУ. 2009. № 3(19), ч. 2. С. 311-315.

4. Нигодюк В.Е., Сулинов А.В. Исследование кинетических свойств газифицированных продуктов жидкофазного взаимодействия СЖРТ // Вестник СГАУ. 2011. № 3(27), ч. 3. С. 251-256.

Информация об авторах

Нигодюк Валентин Евгеньевич, кандидат технических наук, доцент, 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.

Сулинов Александр Васильевич, кандидат технических наук, доцент кафедры теории двигателей летательных аппаратов, старший научный сотрудник Научно-исследовательского центра космической энергетики, 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.

INVESTIGATION OF TRANSFORMATION OF INTERMEDIATE PRODUCTS OF LIQUID-PHASE INTERACTION PROPELLANT AT THE ONSET OF COMBUSTION FOR ROCKET ENGINE

©2014 V.E. Nigodjuk, A.V. Sulinov

Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

The results of an experimental study of the conversion of intermediate (liquid-phase and gasified) product exothermic liquid-phase interaction of hypergolic propellant components in the initial stage of combustion are presented. To investigate the present step conversion of intermediates experimental method for the flow reactor is used. In the process of the experiment the centrifugal and wedge mixing elements is used as propellants mixing systems for flowing reactor. This mixing elements allowed interaction of components in the liquid phase and subsequent flow of the liquid-phase intermediates on the wall of the reactor. Thereby dividing the flow of liquid and gasified intermediates in cross-section is achieved. During the experiment the effect of the following basic parameters of the processes of transformation of intermediates is revealed: the effectiveness of liquid-phase mixing of the fuel components, the residence time of intermediate products in the channel and the pressure of gasified products. Results of the study of converting liquid-phase intermediates in the combustion stage confirm the assumption about the prospects of using of liquid-phase products for internal cooling of rocket engine chamber wall provided efficient organization of the chamber working process, because of the temperature of liquid-phase products, washing the inner surface of the channel changes slightly along the entire length of the channel. Exothermic processes of liquid-phase interaction between fuel components at this stage is substantially complete. Heat removal of energy from previously gasified intermediates is required for subsequent gasification of liquid-phase intermediates. Unlike the liquid-phase conversion of intermediates, converting process of the gasified intermediates occurs quite rapidly in the initial stage of combustion. The temperature of gasified intermediates depending on the boundary conditions in preflame zone was ~ 900 ... 1100 K, and in the output section of the channel of the reactor reached ~ 1400 ... 2000 K.

Hypergolic liquid propellant, liquid-phase interaction, gasified liquid-phase intermediates stage combustion experimental study.

References

1. Dubinkin Y.M., Nigodyuk V.E. Problems of organization of workflow in liquid rocket microthrusters // Russian Aeronautics. 1993. No. 2. P. 71-74.
2. Nigodyuk V.E., Sulinov A.V. Research of laws of interaction of components in a liquid phase self-igniting liquid rocket fuel // Vestnik of the Samara State Aerospace University. 2009. No. 3(19), part 2. P. 311-315. (In Russ.)
3. Nigodyuk V.E., Sulinov A.V. The flowing reactor as the tool of an experimental research of processes of transformation self-igniting liquid rocket fuel // Vestnik of the Samara State Aerospace University. 2009. No. 3(19), part 2. P. 311-315. (In Russ.)
4. Nigodyuk V.E. Sulinov A.V. Investigation of the kinetic properties of gas products of liquid-phase interaction hypergolic liquid rocket fuel // Vestnik of the Samara State Aerospace University. 2011. No. 3(27), part 3. P. 251-256. (In Russ.)

About the authors

Nigodjuk Valentin Evgenevich, Candidate of Science (Engineering), associate professor of the department of aircraft engines theory of Samara State Aerospace University. E-mail: ke_src@ssau.ru. Area of Research: the working process in the engines of the aircraft.

Sulinov Alexander Vasilyevich, Candidate of Science (Engineering), associate professor of the department of aircraft engines theory and senior research fellow, research center of cosmic energy of Samara State Aerospace University. E-mail: ke_src@ssau.ru. Area of Research: the working process in the engines of the aircraft.