

## ПРОТОЧНЫЙ РЕАКТОР КАК ИНСТРУМЕНТ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СЖРТ

© 2009 В. Е. Нигодюк, А. В. Сулинов

Самарский государственный аэрокосмический университет

Предложен метод проточного реактора, позволяющий исследовать при различных граничных условиях закономерности протекания и параметры различных стадий преобразования топлива: время индукции жидкофазных реакций СЖРТ, время индукции газофазных реакций, степень газификации и эффективность преобразования СЖРТ, влияние жидкофазного смешения компонентов на процессы преобразования топлива, особенностей течения и взаимодействия жидкофазных и газофазных промежуточных продуктов преобразования, давления в реакторе.

*Процессы преобразования топлива, самовоспламеняющиеся жидкие ракетные топлива, метод проточного реактора, коэффициент полноты преобразования топлива, степень газификации топлива*

Исследование процессов преобразования самовоспламеняющихся жидких ракетных топлив (СЖРТ), для которых характерны необходимость организации взаимодействия компонентов в жидкой фазе (в виде струй, плен и др.), быстропротекающие экзотермические химические реакции в жидкой фазе, образование жидкофазных и газофазных промежуточных продуктов (ЖФПП и ГФПП), ограниченное и очень малое время пребывания топлива в камере сгорания [1, 2] представляют как прикладной, так и научный интерес.

Изучение процессов преобразования СЖРТ, прежде всего, представляет интерес с точки зрения эффективной организации внутрикамерных рабочих процессов в жидкостных ракетных двигателях и в особенности в жидкостных ракетных двигателях малой тяги (ЖРДМТ). Анализ результатов исследований рабочего процесса ЖРДМТ [2, 3] показывает, что ведущую роль в этом при использовании самовоспламеняющихся компонентов топлива играет организация жидкофазного взаимодействия компонентов как при запуске двигателя и его работе в импульсном режиме, так и на непрерывном режиме. Поэтому важным представляется изучение кинетических характеристик преобразования топлива при жидкофазном взаимодействии компонентов с целью их использования при проектировании высокоэффективных ЖРДМТ.

С точки зрения научной стороны вопроса в теории горения различных топлив изучение особенностей организации жидкофазного взаимодействия компонентов и его влияния на процессы преобразования топлива в такой постановке до сих пор не рассматривались и фактически отсутствуют материалы по изучаемой проблеме.

В научно-исследовательском центре космической энергетики (ОНИЛ-2) СГАУ для изучения физико-химических закономерностей процессов преобразования СЖРТ разработан и апробирован экспериментальный метод, в котором использован так называемый проточный химический реактор.

Сущность предложенного экспериментального метода проточного реактора состоит в следующем.

В проточном реакторе с помощью смесительного элемента обеспечивается подача, организация жидкофазного взаимодействия самовоспламеняющихся компонентов топлива на входе в канал реактора и создание определенной структуры потока продуктов преобразования топлива по поперечному сечению канала реактора. Течение ЖФПП и ГФПП реализуется таким образом, чтобы перемещение жидкофазных продуктов происходило по стенке канала реактора, а течение ГФПП и происходящие в них химические процессы происходят практически при одномерном движении газового потока. При этом отсутствует охлаждающее влияние на

последующие процессы преобразования СЖРТ как подаваемых смесителем жидких компонентов топлива, так и образующихся порций ГФПП.

Путем изменения длины канала реактора можно изменять время пребывания ЖФПП и ГФПП в канале реактора и исследовать в стационарных условиях различные стадии преобразования СЖРТ. Обеспечивая соответствующие времена пребывания продуктов преобразования топлива и создавая необходимые граничные условия протекания процессов преобразования за счет изменения геометрии смесительного элемента и канала реактора, а также режимных параметров (давления, массовой скорости), с помощью метода проточного реактора можно изучить влияние различных факторов на протекание процесса преобразования СЖРТ и, прежде всего, на процессы жидкофазного взаимодействия компонентов.

В процессе эксперимента с использованием метода проточного реактора измеряются усилие (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 может проводится как в выходном его сечении, так и по длине канала реактора. Исследование процессов преобразования СЖРТ осуществляется в вакуумной камере (при давлениях не более 100 Па) для полной имитации рабочего процесса ЖРДМТ.

В качестве смесительного элемента проточного реактора могут использоваться различные типы смесительных элементов: плоские и кольцевые клиновые смесительные элементы, соударяющиеся струйные форсунки, двухкомпонентные центробежные форсунки и другие. Соответственно канал проточного реактора может представлять собой канал с плоским, кольцевым, круговым и возможно другим поперечным сечением.

Предложенный метод проточного реактора позволяет исследовать при различных граничных условиях закономерности проте-

кания и параметры различных стадий преобразования топлива: время индукции жидкофазных реакций СЖРТ, время индукции газофазных реакций, степень газификации и эффективность преобразования СЖРТ, влияние жидкофазного смешения компонентов на процессы преобразования топлива, особенностей течения и взаимодействия жидкофазных и газофазных промежуточных продуктов преобразования, давления в реакторе. Результаты, полученные с помощью метода проточного реактора на стационарных режимах, можно будет использовать для описания динамических моделей преобразования СЖРТ, в частности для создания модели внутрикамерного рабочего процесса ЖРДМТ в импульсном режиме работы.

Для анализа и обобщения экспериментальных данных авторами была разработана методика обработки экспериментальных данных, позволяющая определять следующие параметры.

1. Параметры эффективности преобразования топлива:

1.1. При определении параметров преобразования топлива в выходном сечении канала проточного реактора.

Эффективная скорость истечения продуктов преобразования СЖРТ из канала проточного реактора

$$W_{\Sigma}^{вых} = \frac{P_n - p_{\kappa} F_{\kappa}}{\dot{m}_{\Sigma}},$$

где  $P_n$  - усилие (пустотная тяга), создаваемая реактором в пустоте;  $p_{\kappa}$  - статическое давление газофазных продуктов в выходном сечении канала реактора;  $F_{\kappa}$  - площадь выходного сечения канала реактора;  $\dot{m}_{\Sigma}$  - массовый расход топлива.

Коэффициент полноты преобразования топлива

$$\varphi_{\kappa} = z_{эф} \sqrt{\frac{(R_{\kappa} T_{\kappa}^*)}{(R_{\kappa} T_{\kappa}^*)_t}} \approx \frac{W_{\Sigma}^{вых}}{W_t},$$

в этом выражении  $W_t$  - теоретическая скорость истечения продуктов преобразования СЖРТ;  $z_{эф}$  - степень газификации топлива;  $(R_{\kappa} T_{\kappa}^*)$  и  $(R_{\kappa} T_{\kappa}^*)_t$  - соответственно действительные и теоретические значения газовой постоянной и температуры газофазных про-

дуктов преобразования топлива. Теоретические значения параметров преобразования топлива определяются в результате термодинамического расчета [4].

Степень газификации топлива вычислялась с помощью соотношения

$$z_{зф} = \frac{\dot{m}_{зф}}{\dot{m}_{\Sigma}} = \frac{(W_{\Sigma}^{вых} - W_{жф}^{вых})}{(W_{зф}^{вых} - W_{жф}^{вых})},$$

в котором  $W_{зф}^{вых}$  и  $W_{жф}^{вых}$  - скорости течения соответственно газофазных и жидкофазных промежуточных продуктов в выходном сечении канала проточного реактора.

Скорость течения газофазных промежуточных продуктов в выходном сечении канала проточного реактора определялась из соотношения для критического режима истечения газофазных продуктов, характерного для проводимого эксперимента – давление в вакуумной камере не превышало 100 Па:

$$W_{зф}^{вых} = \sqrt{\frac{2n}{(n+1)}(R_{\kappa}T_{\kappa}^*)},$$

где  $n$  - показатель политропы, вычисляемый из соотношения, характерного для критического режима истечения

$$\left(\frac{p_{\kappa}}{p_{\kappa}^*}\right)^{\frac{(n-1)}{n}} = \frac{2}{(n+1)},$$

$p_{\kappa}^*$  - полное давление газофазных продуктов в выходном сечении канала реактора.

На стадии (режиме) парогазогенерации (до воспламенения топлива) действительная газовая постоянная согласно экспериментальным данным для двухкомпонентного самовоспламеняющегося жидкого ракетного топлива: окислитель - четырехокись азота и горючее гидразинового ряда, - принималась равной  $R_{клар} = 185$  Дж/кг·К. На стадии (режиме) горения действительная газовая постоянная находилась из выражения

$$R_{кгор} = \frac{T_{кпар}^* \varphi_{кгор}^2}{T_{кгор}^* \varphi_{кпар}^2} R_{кпар},$$

параметры с индексом «пар» относятся к стадии парогазогенерации, параметры с индексом «гор» относятся к стадии горения.

Скорость течения жидкофазных промежуточных продуктов в выходном сечении канала проточного реактора в первом приближении принималась равной суммарной

скорости жидких компонентов топлива на выходе из смесителя:

$$W_{жф}^{вых} = W_{см} = \frac{W_{см}^{ок} + W_{см}^{г}}{2}.$$

Индексы «г» и «ок» - линии горючего и окислителя на выходе из смесителя.

1.2. При определении параметров преобразования топлива по длине канала проточного реактора.

Коэффициент полноты преобразования топлива

$$\varphi_{\kappa}(x) = z_{зф} \sqrt{\frac{(R_{\kappa}T_{\kappa}^*)}{(R_{\kappa}T_{\kappa}^*)_t}} = \frac{A(n)p_{\kappa}^*F_{\kappa}q(\lambda_n)}{\dot{m}_{\Sigma}\sqrt{(R_{\kappa}T_{\kappa}^*)_t}},$$

где  $A(n) = \sqrt{n\left(\frac{2}{n+1}\right)^{\frac{(n+1)}{(n-1)}}$ ,

$$q(\lambda_n) = \lambda_n \left[ \frac{(n+1)}{2} \left( 1 - \frac{n-1}{n+1} \lambda_n^2 \right) \right]^{\frac{1}{(n-1)}},$$

$$\lambda_n = \sqrt{1 - (p_{\kappa}/p_{\kappa}^*)^{(n-1)/n}}.$$

В этих соотношениях параметры продуктов преобразования топлива: статическое и полное давления, температура ГФПП - параметры по длине канала проточного реактора, зависящие от осевой координаты реактора «х».

Степень газификации топлива вычислялась с помощью выражения

$$z_{зф} = \varphi_{\kappa} / \sqrt{\frac{(R_{\kappa}T_{\kappa}^*)}{(R_{\kappa}T_{\kappa}^*)_t}}.$$

2. Времена пребывания газофазных и жидкофазных продуктов в канале проточного реактора.

Время пребывания газофазных продуктов в канале определялось из соотношения

$$\tau_{нр}^{зф} = \frac{l_{\kappa}}{\int_0^{l_{\kappa}} W_{зф}(x) dx},$$

где  $W_{зф}(x) = \sqrt{\frac{2n}{(n+1)}(R_{\kappa}T_{\kappa}^*)[1 - (p_{\kappa}/p_{\kappa}^*)^{(n-1)/n}]}$ ,

или скорость ГФПП, аппроксимируется эмпирической зависимостью  $W_{зф}(x) = ax^m + b$ , где  $a, b, m$  - постоянные коэффициенты.

Время пребывания жидкофазных продуктов в канале

$$\tau_{np}^{эсф} = \frac{l_k}{\int_0^{l_k} W_{эсф}(x) dx}, \quad W_{эсф}(x) = W_{см} = const.$$

3. Эффективность жидкофазного смешения компонентов СЖРТ.

Коэффициент эффективности жидкофазного смешения компонентов находился из выражения

$$\varphi_{эсф} = \frac{2 \int_0^{\Theta_{max}} \beta(\Theta) \cdot \dot{m}_\Sigma(\Theta) \cdot [\delta_*(\Theta) / \delta_\Sigma(\Theta)] d\Theta}{\beta_{ср} \cdot \dot{m}_\Sigma},$$

в котором  $\Theta$  - полярная угловая координата;  $\beta_{ср}$  и  $\beta(\Theta)$  - среднее и локальные значения расходного комплекса;  $\dot{m}_\Sigma(\Theta)$  - локальное значение массового расхода топлива;  $\delta_*(\Theta)$  - толщина слоя смешения в жидкой фазе;  $\delta_\Sigma(\Theta)$  - суммарная толщина пленок горючего и окислителя.

4. В завершение расчета параметров оценивалась величина комплекса  $p_k^* \tau_{np}^{эсф}$ , характеризующего процессы преобразования газофазных продуктов.

Предложенный метод проточного реактора был апробирован на высотном огневом стенде. Некоторые результаты указанных исследований с помощью метода проточного реактора представлены в [5]. В частности, один из проточных реакторов был выполнен с плоским клиновым смесительным элементом и имеющим канал прямоугольного сечения. Размеры канала прямоугольного сечения не изменялись по длине канала реактора и были следующими: ширина 10 мм, высота 2 мм, длина канала варьировалась в диапазоне от 1,2 до 62,5 мм, что соответствовало изменению приведенной длины реактора (по аналогии с приведенной длиной камеры сгорания ЖРД) от 0,0012 до 0,0625 м. Для исследования влияния на процессы преобразования СЖРТ газодинамических факторов и величины давления в канале рассматривались варианты реактора с постоянной по длине высотой канала 4 мм и суженной в выходном сечении канала реактора с переходом с 4 мм на 2 мм. Изучался вариант независимого преобразования друг от друга ЖФПП и ГФПП путем разделения с помощью пластины канала реактора вдоль его оси, после небольшого общего начального участка на входе в реактор.

## 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 // Известия вузов. Авиационная техника.- 1993. - № 2.- С. 71...74.
3. 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. научно-техн. конф. –Ч. 1. Самара: СГАУ, 2006-С. 27-29.
4. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания: справочник: в 10 т./ под ред. акад. В.П. Глушко. – М.: ВИНТИ АН СССР.- 1971-1979.
5. Нигодюк, В.Е. Исследование закономерностей преобразования самовоспламеняющегося жидкого ракетного топлива/ В.Е. Нигодюк, А.В. Сулинов // Проблемы и перспективы развития двигателестроения / Матер. междунар. научно-техн. конф.- Ч. 1. - Самара: СГАУ.- 2006- С. 29-31.

## 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. 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.
4. Thermodynamic and teplofizicheskie properties of products of combustion. The directory in 10 volumes / Under the editorship of акад. V.P.Glushko. – M: VINITI AN the USSR, 1971-1979.

5. 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.

## THE FLOWING REACTOR AS THE TOOL OF AN EXPERIMENTAL RESEARCH OF PROCESSES OF TRANSFORMATION SELF-IGNITING LIQUID ROCKET FUEL

©2009 V. E. Nigodjuk, A. V. Sulinov

Samara State Aerospace University

The method of the flowing reactor for experimental issledo-vanija processes of transformation self-igniting liquid rocket fuel is offered and approved. The given method allows to investigate initial stages of processes of transformation of fuel and a fashion-lirovat influence on them of various boundary conditions, first of all influences is effective-sti mixtures in a liquid phase of components.

*Processes of transformation of the fuel, self-igniting liquid rocket fuel, a method of the flowing reactor, factor of completeness of transformation of fuel, degree of gasification of fuel*

### 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](mailto: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](mailto: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](mailto: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](mailto:engin@ssau.ru). Area of research: working process in engines.