

УДК 621.453

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГАЗИФИЦИРОВАННЫХ ПРОДУКТОВ ЖИДКОФАЗНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СЖРТ

© 2011 В. Е. Нигодюк, А. В. Сулинов

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

Представлены результаты экспериментального исследования кинетических свойств газифицированных продуктов жидкофазного взаимодействия двухкомпонентного самовоспламеняющегося жидкого ракетного топлива. Определены параметры газифицированных продуктов и получено соотношение для определения периода индукции процессов в газовой фазе на стадии до воспламенения газифицированных продуктов.

Двухкомпонентное самовоспламеняющееся жидкое ракетное топливо, жидкофазное взаимодействие, газифицированные продукты, период индукции.

Двухкомпонентное самовоспламеняющееся жидкое ракетное топливо (СЖРТ), включающее в свой состав горючее из гидразинового ряда и окислитель из азотнокислотного ряда, широко применяется в жидкостных ракетных двигателях различных типов.

Ведущую роль в обеспечении высокой эффективности внутрикамерного рабочего процесса, прежде всего в жидкостных ракетных двигателях малых тяг (ЖРДМТ), играет организация жидкофазного взаимодействия компонентов топлива [1] как при запуске двигателя, так и при его работе на непрерывном режиме. При этом в результате экзотермического жидкофазного взаимодействия самовоспламеняющихся компонентов топлива в период до воспламенения образуются высокоактивные газофазные (газифицированные) и жидкофазные промежуточные продукты (соответственно ГФПП и ЖФПП), условия образования и относительные количества которых определяют скорость преобразования топлива в конечные продукты сгорания.

Для формирования требований к организации эффективного смесеобразования и проведения расчета рабочего процесса в камере сгорания двигателей необходимо знание основных кинетических параметров физико-химического взаимодействия компонентов топлива при их смешении в жидкой фазе и газифицированных продуктов жидкофазного взаимодействия компонентов, прежде всего, периода индукции процессов в жидкой фазе $\tau_i^{\text{жф}}$ и периода индукции процессов в газовой фазе на стадии до воспламенения газифицированных продуктов (ина-

че: стадия парогазогенерации, предпламенный режим) $\tau_i^{\text{эф}}$. Под периодом индукции процессов в жидкой фазе $\tau_i^{\text{жф}}$ понимаем время от момента контакта жидких компонентов до появления газифицированных продуктов, полученных в результате жидкофазных реакций двухкомпонентного СЖРТ. Под периодом индукции процессов в газовой фазе (периодом индукции газифицированных продуктов) $\tau_i^{\text{эф}}$ понимаем время от момента появления газифицированных продуктов до их воспламенения.

Знание периодов индукции процессов в жидкой фазе $\tau_i^{\text{жф}}$ и в газовой фазе $\tau_i^{\text{эф}}$ при организации жидкофазного взаимодействия двухкомпонентного СЖРТ позволяет оценить не только кинетические возможности топлива, но имеет несомненный практический интерес с точки зрения проектирования и эффективной организации рабочего процесса в ЖРДМТ [1]. В частности, период индукции процессов в жидкой фазе используется при расчете жидкофазного смешения компонентов и при проектировании систем смесеобразования ЖРДМТ. Период индукции процессов в газовой фазе позволяет оценить период задержки самовоспламенения ГФПП, протекающего в идеальных условиях, т.е. при отсутствии теплоотвода и массообмена с реакционным объемом газифицированных продуктов. С точки зрения практического использования период индукции процессов в газовой фазе определяет предельно минимальный период задержки самовоспламенения компонентов при запуске ЖРДМТ в вакууме при идеальной организации его рабочего процесса.

Результаты исследований кинетических параметров ЖФПП представлены в работе [2].

В настоящей статье приведены результаты экспериментального исследования кинетических свойств газифицированных продуктов жидкофазного взаимодействия компонентов СЖРТ на стадии до воспламенения ГФПП и, прежде всего, периода индукции газифицированных продуктов.

Для экспериментального исследования кинетических свойств газифицированных продуктов жидкофазного взаимодействия компонентов СЖРТ использован метод проточного реактора [3]. В качестве систем смесеобразования компонентов топлива в проточном реакторе в процессе эксперимента использовались клиновой (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. Конструкция спроектированного проточного реактора давала возможность реализовать структуру потока продуктов преобразования топлива такую, что отсутствовали массообмен и охлаждающее влияние «свежих» промежуточных продуктов жидкофазного взаимодействия самовоспламеняющихся компонентов топлива на предпламенный разогрев ранее поступившей в канал реактора порции промежуточных продуктов.

Исследование проводилось на стационарных режимах работы проточного реактора. При исследовании кинетических свойств газифицированных продуктов использовались реакторы различной длины, что позволяло изменять время пребывания ГФПП $\tau_{np}^{эф}$ в канале реактора. В процессе эксперимента также изменялись режимные параметры смешения компонентов топлива в жидкой фазе как за счет изменения геометрии смесительного элемента, так и за счет изменения суммарного расхода компонентов топлива. Варьировалось давление газов в канале путем изменения режимных параметров и площади выходного сечения канала реактора. Исследования осуществлялись в вакуумной камере при давлении не более 100 Па. Эксперименты проводились при температуре

компонентов топлива в диапазоне (15...25)°С и коэффициенте избытка окислителя (0,5...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 [3].

В зависимости от граничных условий рабочий процесс в канале реактора можно было реализовать как на режиме до воспламенения, так и на режиме горения. Момент воспламенения газифицированных продуктов регистрировался по взрывообразному росту температуры газов в канале реактора. Период индукции газифицированных продуктов исследованных компонентов топлива определялся по времени пребывания ГФПП $\tau_{np}^{эф}$ в канале реактора на режиме до воспламенения и был равен времени пребывания ГФПП на границе перехода от режима до воспламенения к режиму горения.

Отдельные результаты проведенного исследования кинетических свойств газифицированных продуктов жидкофазного взаимодействия компонентов СЖРТ показаны на рис. 1-5.

Из рис. 1 видно, что температуры ГФПП и ЖФПП на режиме до воспламенения изменяются в диапазоне от 340 до 370 К. При этом значения температур ГФПП и ЖФПП при одних и тех же граничных условиях практически не отличаются друг от друга. Суммарный расход компонентов топлива в процессе эксперимента изменялся за счет изменения давления компонентов топлива на входе в смесительный элемент проточного реактора. С ростом суммарного расхода компонентов топлива и, как следствие этого, ростом давления газа в канале, значения температур ГФПП и ЖФПП повышаются. Причиной этого является, во-первых, повышение эффективности жидкофазного смешения компонентов топлива, обусловленной ростом скоростей взаимодействующих

щих жидких пленок компонентов на выходе из смесителя, которые растут с ростом суммарного расхода топлива. Во-вторых, увеличение давления газа в канале реактора ухудшает условия протекания процесса испарения жидких компонентов и повышает эффективность химических реакций в газовой фазе.

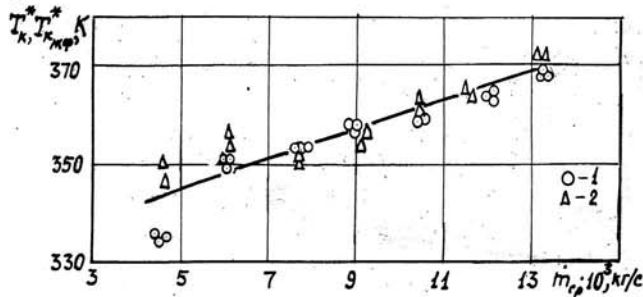


Рис. 1. Экспериментальные данные по температурам ГФПП T_k^* (1) и ЖФПП $T_{кэф}^*$ (2) в зависимости от суммарного расхода компонентов топлива \dot{m}_{cp} при одних и тех же смесительном элементе ЭДКл и длине канала реактора

Сравнивая экспериментальные данные в период до воспламенения, полученные при различных условиях жидкофазного взаимодействия компонентов СЖРТ и при изменении давления газифицированных продуктов в канале реактора в диапазоне $p_k^* = (0,02...0,35)$ МПа (рис. 1, 2) можно отметить, что определяющее влияние на кинетические параметры ГФПП на этой стадии оказывает, прежде всего, процесс жидкофазного взаимодействия компонентов топлива. Свой отпечаток на этот процесс, как отмечалось выше, накладывает величина давления газа в канале реактора, влияющая на процессы испарения компонентов и протекание химических реакций в газовой фазе.

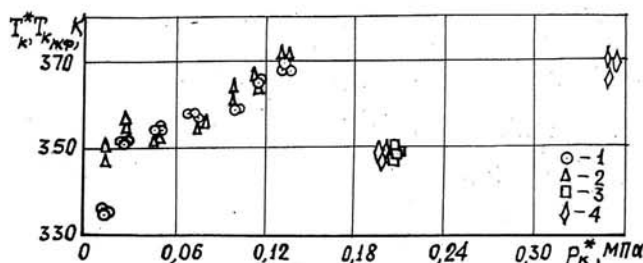


Рис. 2. Экспериментальные данные по температурам ГФПП T_k^* (1, 3) и ЖФПП $T_{кэф}^*$ (2, 4) в зависимости от полного давления газов в реакторе суммарного расхода компонентов топлива p_k^* для различных типов смесительных элементов ЭДКл (1, 2) и ЭДЦ (3, 4)

Кроме указанных факторов на протекающие процессы в газовой фазе оказывает

влияние время пребывания ГФПП в канале реактора. На рис. 3 представлены экспериментальные данные изменения параметров ГФПП в зависимости от длины канала реактора при постоянном суммарном расходе компонентов топлива \dot{m}_{cp} . Изменение значений температуры ГФПП повторяет изменение температуры ЖФПП, определяемой процессом жидкофазного взаимодействия компонентов топлива, в зависимости от длины канала реактора [2]. При этом следует отметить, что около 70% образующихся газифицированных продуктов на режиме до воспламенения осуществляется на начальном этапе жидкофазного взаимодействия компонентов топлива ($l_k \leq 2,5$ мм), остальные 30% образования ГФПП происходят на последующей длине канала реактора $l_k = 10$ мм. С ростом длины канала реактора увеличивалась степень газификации топлива и росло давление газа в канале. Все это способствовало интенсификации и повышению полноты протекания химических реакций в газовой фазе. При длинах канала реактора l_k более 12,5 мм наблюдается незначительное изменение температуры ГФПП, что связано, с одной стороны, с характерным протеканием процессов в газовой фазе в режиме до воспламенения и, с другой стороны, возможным влиянии на протекание данных процессов неадиабатности условий их проведения.

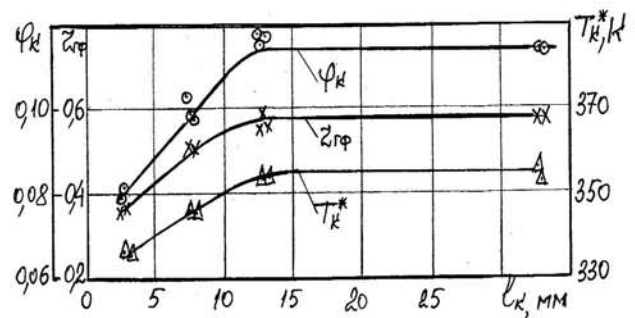


Рис. 3. Изменение коэффициента полноты преобразования топлива φ_k , степени газификации топлива $Z_{гф}$ и температуры ГФПП T_k^* от длины канала реактора l_k

Полученные экспериментальные данные при исследовании кинетических свойств газифицированных продуктов жидкофазного взаимодействия компонентов СЖРТ были обобщены в виде зависимостей температуры газифицированных продуктов T_k^* и коэффициента полноты преобразования топлива φ_k от комплекса $p_k^* \tau_{пр}^{эф}$ (рис. 4, 5).

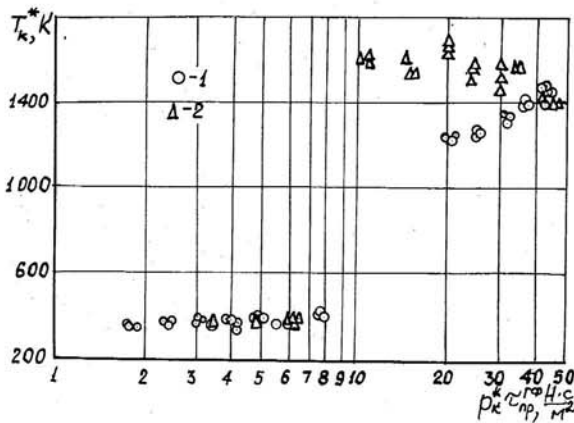


Рис. 4. Зависимость температуры газифицированных продуктов T_k^* от комплекса $p_k^* \tau_{np}^{z\phi}$: 1 – ЭДКл; 2 – ЭДЦ

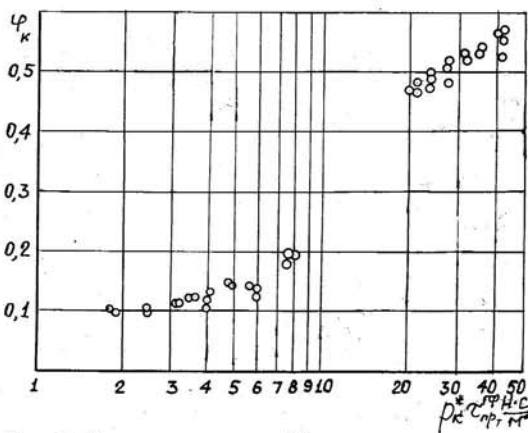


Рис. 5. Зависимость коэффициента полноты преобразования топлива φ_k от комплекса $p_k^* \tau_{np}^{z\phi}$ (смеситель ЭДКл)

При обобщении экспериментальных данных было найдено значение комплекса

$$p_k^* \tau_{np}^{z\phi} = 8 \text{ Нс/м}^2, \quad (1)$$

при котором происходил процесс воспламенения газифицированных продуктов при рассмотренных в эксперименте граничных условиях: исследуемых компонентов топлива, коэффициенте избытка окислителя, эффективности жидкофазного смешения компонентов топлива. Давление газофазных продуктов в канале реактора на режиме горения изменялось в диапазоне $p_k^* = 0,2 \dots 0,7$ МПа.

В соответствии с полученным соотношением (1) выражение для определения периода индукции газифицированных продуктов с учетом его равенства времени пребывания ГФПП на границе перехода от режима до воспламенения к режиму горения можно представить в виде зависимости

$$\tau_i^{z\phi} = \frac{k}{p_k^*}, \quad (2)$$

где $k = 8 \text{ Нс/м}^2$ – постоянный коэффициент при данных граничных условиях проведения эксперимента.

Проанализируем полученные результаты и сравним их с известным выражением для периода индукции химических реакций, характерных для теплового взрыва [4]:

$$\tau_i^{z\phi} = k(p_k^*)^{-\nu+1} e^{\frac{E}{RT_{k0}^*}}, \quad (3)$$

где k – постоянный коэффициент; E – энергия активации химических реакций в газовой фазе; ν – суммарный порядок реакций; R – газовая постоянная; T_{k0}^* – начальная температура газифицированных продуктов.

Из проведенного анализа и сравнения выражений (2) и (3) можно сделать вывод о том, что воспламенение газифицированных продуктов жидкофазного взаимодействия компонентов СЖРТ происходит по механизму теплового взрыва для реакций второго порядка ($\nu=2$).

Знание полученного значения комплекса $p_k^* \tau_{np}^{z\phi}$, при котором происходит воспламенение, позволяет при различных давлениях оценить время индукции газифицированных продуктов на режиме до воспламенения из соотношения

$$\tau_i^{z\phi} = 8 / p_k^*, \quad (4)$$

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

Из соотношения (4) следует (рис. 6), что, например, при изменении значений давления ГФПП в диапазоне от 0,01 до 0,1 МПа период индукции газифицированных продуктов на режиме до воспламенения соответственно будет составлять $\tau_i^{z\phi} = (0,8 \dots 0,08 \text{ мс})$.

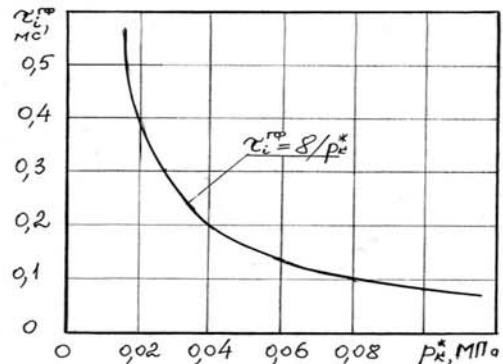


Рис. 6. Зависимость периода индукции газифицированных продуктов $\tau_i^{z\phi}$ от давления газа p_k^*

Полученные значения периода индукции газифицированных продуктов существенно меньше значений времени задержки самовоспламенения топлива в существующих ЖРДМТ. Данное сравнение позволяет констатировать то, что кинетические возможности рассматриваемого двухкомпонентного самовоспламеняющегося жидкого ракетного топлива не достаточно использованы в двигателях и возможно дальнейшее совершенствование организации внутрикамерного рабочего процесса создаваемых ЖРДМТ с целью уменьшения времени задержки самовоспламенения топлива и, как следствие этого, повышения энергетических характеристик двигателя в импульсном режиме работы.

Библиографический список

1. Дубинкин, Ю.М. Проблемы организации рабочего процесса жидкостных ракетных двигателей малой тяги [Текст] /Ю.М. Дубинкин, В.Е. Нигодюк // Изв. вузов. Авиационная техника,-1993.- № 2. - С. 71-74.
2. Нигодюк, В.Е. Исследование закономерностей жидкофазного взаимодействия компонентов СЖРТ [Текст] /В.Е. Нигодюк, А.В. Сулинов // Вестнэ. СГАУ, 2009. № 3 (19). - С. 316-321.
3. 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.
4. Щетинков, Е.С. Физика горения газов [Текст] / Е.С. Щетинков. - М.: Наука, 1965. - 740 с.

INVESTIGATION OF THE KINETIC PROPERTIES OF GAS PRODUCTS OF LIQUID-PHASE INTERACTION HYPERGOLIC LIQUID ROCKET FUEL

© 2011 V. E. Nigodjuk, A. V. Sulinov

Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov
(National Research University)

The paper presents an experimental study of the kinetic properties of liquid-phase interaction products gasified two-hypergolic liquid propellants. The parameters of the gasified products and obtained a relation for the definitions of the induction period processes in the gas phase at a stage prior to ignition of gasified products.

A two-component hypergolic liquid propellant, liquid-phase interaction, gasified products, the induction period.

Информация об авторах

Нигодюк Валентин Евгеньевич, кандидат технических наук, доцент кафедры теории двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Тел.: (846) 335-59-21. 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). Тел.: (846) 335-59-21. E-mail: ke_src@ssau.ru. Область научных интересов: исследование рабочего процесса в двигателях летательных аппаратов.

Nigodjuk Valentin Evgenievich, candidate of technical science, associate professor of the department of theory engines letatel-governmental apparatus, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). Phone: (846) 335-59-21. E-mail: ke_src@ssau.ru. Area of research: working process in the engines of the aircraft.

Sulinov Alexander Vasilyevich, candidate of technical science, associate professor of the department of theory engines letatel-governmental apparatus, senior researcher of Scientific research center of space energy, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). Phone: (846) 335-59-21. E-mail: ke_src@ssau.ru. Area of research: working process in the engines of the aircraft.