

## **Интенсификация смешения компонентов топлива в газодинамической системе воспламенения**

© А.В. Воронцовский, К.Ю. Арефьев

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*Повышение эффективности воспламенения топливной смеси является одной из ключевых задач совершенствования генераторов высокоэнтальпийного потока (ГВЭП) с многократным запуском, в том числе с импульсным режимом работы. Одним из перспективных методов решения поставленной задачи является применение газодинамической системы воспламенения (ГСВ), которая состоит из сверхзвукового сопла и расположенного соосно с ним резонатора. Для надежной работы ГСВ в застойной зоне резонансной полости необходимо получить высокую температуру и определенный концентрационный состав топливной смеси. В статье представлены результаты расчетного исследования возможности интенсифицировать смешение компонентов топлива при использовании незамкнутой резонансной полости. На основе полученных данных определены геометрические и режимные параметры, при которых может быть существенно сокращено время выхода ГВЭП на номинальный режим работы. Результаты исследования могут быть использованы при разработке перспективных образцов силовых и энергетических установок, в том числе ЖРД малой тяги, технологических установок по напылению покрытий, абразивной резке материалов и др.*

**Ключевые слова:** генератор высокоэнтальпийного потока, газодинамическая система воспламенения, математическое моделирование, интенсификация смешения.

Генераторы высокоэнтальпийного потока (ГВЭП) с использованием экологически чистых компонентов топлива находят все более широкое применение в современных двигательных и энергетических установках. К их числу можно отнести жидкостные ракетные двигатели (ЖРД), в том числе малой тяги, технологические установки по напылению покрытий и абразивной резке материалов, газогенераторы различного назначения.

Надежность запуска (в особенности, многократного) является ключевым вопросом обеспечения работоспособности ГВЭП, а также их безопасной и эффективной эксплуатации. Наиболее часто отказы системы зажигания имеют место при импульсных режимах работы ГВЭП. Используемые в настоящее время искровые и лазерные свечи или газоразрядные устройства требуют квалифицированного технического обслуживания и периодической замены исполнительных элементов, что не всегда может быть реализовано в условиях приме-

нения ГВЭП. Кроме того, необходимость в дополнительном источнике электрической энергии приводит к увеличению массы и снижению надежности системы.

Создание неэлектрической высоконадежной экологически чистой системы воспламенения основной топливной смеси в ГВЭП — важная научно-техническая задача. Одним из перспективных методов ее решения является применение газодинамической системы воспламенения (ГСВ). Принцип газодинамического воспламенения основан на эффекте Гартмана — Шпренгера [1, 2]. В качестве топливной композиции может быть использована высокоэнергетичная нетоксичная газовая смесь  $N_2O/H_2$ , основные преимущества которой детально проанализированы в работе [3].

Основные элементы ГСВ (рис. 1) располагаются в проточном тракте форкамеры 1 ГВЭП. В процессе запуска ГВЭП через сопло 2 первым в ГСВ подается окислитель 5. При этом возбуждается пульсационный процесс, в результате которого происходит нагрев подаваемого через сопло газа в застойной зоне резонатора 3. Механизм нагрева газа заключается в распространении циклических ударных волн в резонансной полости и их отражении от торцевой поверхности резонатора. Через интервал времени  $t_1$  после открытия клапана окислителя через сопло осуществляется подача горючего 6. Вследствие высокой температуры в застойной зоне резонатора происходит воспламенение топливной смеси, и продукты сгорания попадают в камеру сгорания ГВЭП, где инициируют основной рабочий процесс.

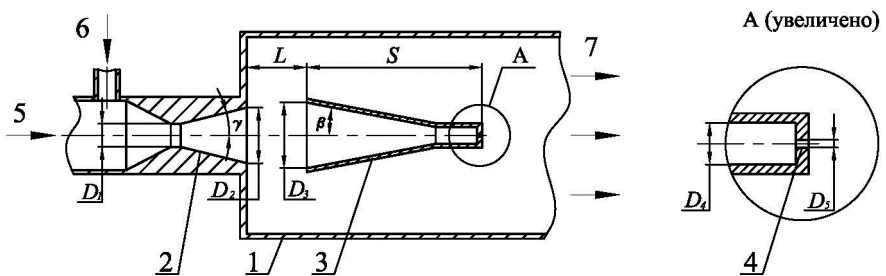


Рис.1. Схема ГСВ:

1 — форкамера ГВЭП; 2 — сопло, 3 — резонатор; 4 — отверстие в торцевой стенке резонатора; 5 — окислитель; 6 — горючее; 7 — продукты сгорания

В настоящее время обычно используются резонаторы ГСВ с конфузорным входом и примыкающим к нему цилиндрическим участком с замкнутой торцевой стенкой. Ранее [4] были определены основные геометрические параметры ГСВ, при которых температура в застойной зоне резонатора  $T_p$  с замкнутой торцевой стенкой имеет максимум. К таким параметрам (см. рис.1) относятся: относительный

зазор  $L/D_1 = 2$ , относительная глубина резонансной полости  $S/D_1 = 13$ , углы  $\gamma = 11...13^\circ$  и  $\beta = 4^\circ$ , степень расширения сопла  $D_2/D_1 = 2,5$ . При этом средние по времени значения температуры  $T_p$  достигают 1500 К, а максимальные значения  $T_p$  — 2200 К.

Проведенное исследование процесса воспламенения топливной смеси [5] показало, что на определенных режимах работы и при неравномерном распределении компонентов топливной смеси во входном сечении резонатора возможна ситуация, когда в его застойной зоне концентрация горючего не достигает необходимого для воспламенения уровня в течение требуемого времени. В результате процесс запуска ЖРД малой тяги существенно затягивается. Этот эффект обусловлен недостаточным перемешиванием топливной смеси в резонансной полости вследствие молекулярно-диффузионного характера процесса.

В качестве одного из вариантов устранения этого негативного эффекта рассматривается схема резонатора, когда в его торцевой части выполняется отверстие диаметром  $D_5$  (см. рис. 1). В этом случае небольшая часть высокотемпературных продуктов сгорания имеет возможность попадать через это отверстие в камеру сгорания. Благодаря этому в резонаторе возникает малорасходный газовый проток и существенно повышается интенсивность перемешивания в нем компонентов топливной смеси. В момент, когда температура и состав смеси в резонаторе достигают определенного уровня, происходит ее воспламенение.

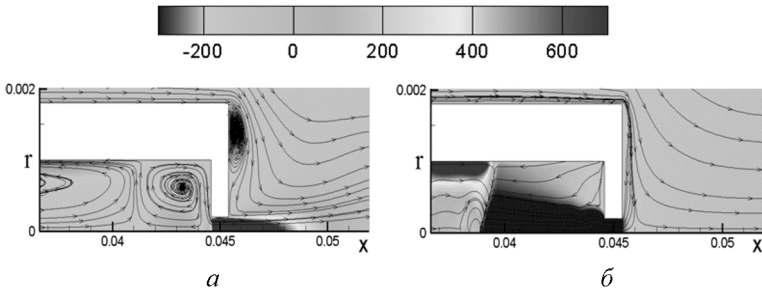
Основная задача работы — расчетное исследование процесса смешения и последующего воспламенения композиции  $N_2O/H_2$  в незамкнутой резонансной полости ГСВ при различных значениях диаметра  $D_5$  отверстия в торцевой стенке резонатора в широком диапазоне концентрационного состава подаваемой топливной смеси.

Моделирование течения в форкамере ГВЭС с ГСВ основано на численном решении системы уравнений Навье — Стокса (в двумерной нестационарной постановке) для многокомпонентной смеси [6] с учетом химических реакций, сопровождающих процесс горения топливной композиции  $N_2O/H_2$ . Для описания макрокинетических процессов использовалась модернизированная модель К.Дж. Яхимовского [7], дополненная рекуррентными уравнениями прямых и обратных реакций, имеющих место при разложении закиси азота.

Математическое моделирование позволило выявить особенности течения газа в незамкнутой резонансной полости. Показано, что в процессе приближения ударной волны к торцевой поверхности резонатора происходит истечение нагретого газа из отверстия  $D_5$  (рис. 2, а). После отражения ударной волны от торцевой поверхности резонатора образуется веер волн разрежения и некоторое количество

газа может втекать в резонансную полость из форкамеры (рис. 2, б). При истечении скорость газа в отверстии  $D_5$  может достигать 700 м/с, при втекании — 300 м/с, что примерно соответствует значениям скорости звука для газа определенной температуры.

При соотношении  $D_5/D_4 = 0,05...0,50$  массовый расход истекающего из отверстия  $D_5$  газа не превышает 2 % массового расхода через сопло ГСВ и составляет 0,002...0,600 г/с.

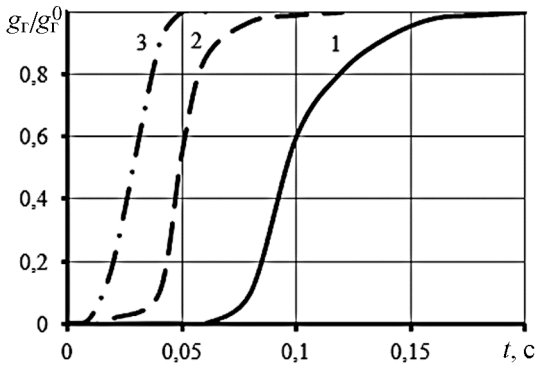


**Рис. 2.** Распределение осевой скорости (м/с) в области торцевой части резонатора при истечении (а) и втекании (б) газа в резонансную полость

Интенсивность смешения определяется пространственным распределением относительной массовой концентрации горючего  $g_\Gamma/g_\Gamma^0$  в резонансной полости. Здесь  $g_\Gamma^0$  — массовая концентрация горючего во входном сечении ГСВ. Основная фаза перемешивания в резонаторе характеризуется интервалом времени  $t_c$ , отсчитываемым от момента подачи горючего в ГСВ до момента, когда концентрация горючего вблизи торцевой поверхности повысится до уровня  $g_\Gamma/g_\Gamma^0 = 0,9$ .

Проведено сравнение интенсивности смешения для резонатора без отверстия в торцевой стенке и при различных значениях диаметра  $D_5$ . Показано, что в резонаторе без отверстия  $t_c > 0,1$  с (рис. 3). Наличие отверстия, имеющего относительный диаметр  $D_5/D_4 = 0,15$ , приводит к сокращению времени основной фазы перемешивания до  $t_c = 0,07$  с. При дальнейшем увеличении диаметра  $D_5$  смешение существенно интенсифицируется, и при  $D_5/D_4 = 0,3$  временной интервал  $t_c$  становится менее 0,04 с.

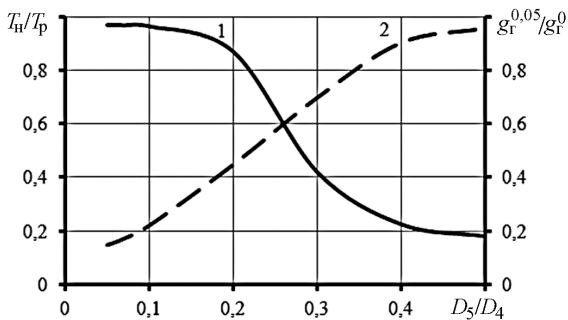
Эффективность процесса смесеобразования в незамкнутой резонансной полости может быть охарактеризована с помощью параметра полноты смешения  $g_\Gamma^{0,05}/g_\Gamma^0$ , где  $g_\Gamma^{0,05}$  — массовая концентрация горючего вблизи торцевой стенки резонатора через 0,05 с после начала его подачи в ГСВ. Зависимость параметра  $g_\Gamma^{0,05}/g_\Gamma^0$  от относительного параметра  $D_5/D_4$  представлена на рис. 4. С увеличением относительного диаметра отверстия в торцевой стенке резонатора про-



**Рис. 3.** Интенсивность смешения топлива в резонансной полости:  
 1 — без отверстия в резонаторе; 2 —  $D_5/D_4 = 0,15$ ; 3 —  $D_5/D_4 = 0,3$

исходит интенсификация смесеобразования, о чем свидетельствует асимптотическое стремление параметра полноты смешения  $g_r^{0,05}/g_r^0$  к единице.

Зависимость температуры газа в незамкнутой резонансной полости  $T_n$  от соотношения  $D_5/D_4$  приведена на рис. 4. На рисунке видно, что с увеличением диаметра отверстия в торцевой стенке резонатора наблюдается снижение температуры  $T_n$ . При  $D_5/D_4 > 0,4$  амплитуда пульсаций давления существенно понижается и  $T_n$  уменьшается до уровня, близкого к полной температуре  $T_0$  компонентов топлива во входном сечении сопла ГСВ. Механизм снижения амплитуды пульсаций давления объясняется малым коэффициентом отражения  $K_{отр} = (1 - \psi)/(1 + \psi)$  ударной волны от незамкнутой торцевой стенки с высокой степенью проницаемости  $\psi = (D_5/D_4)^2$ .



**Рис. 4.** Зависимости параметров в резонансной полости от  $D_5/D_4$ :  
 1 —  $T_n/T_p$ ; 2 —  $g_r^{0,05}/g_r^0$

Моделирование газодинамического течения с учетом химических реакций показало, что для термического воспламенения топливной композиции  $N_2O/H_2$  необходимо получить в застойной зоне резона-

тора температуру не менее 1150 К, что соответствует значению  $T_n/T_p = 0,7$ . В связи с этим допустимые значения диаметра отверстия в торцевой стенке резонатора должны отвечать условию  $D_5/D_4 < 0,25$ . Характерные фазы процесса воспламенения топливной смеси в резонаторе ГСВ показаны на рис. 5.

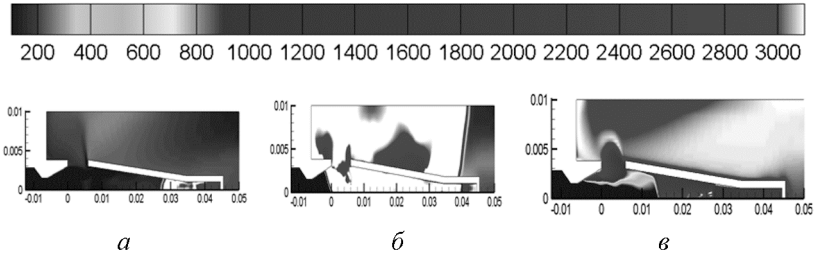


Рис. 5. Распределение температуры (К) в ГСВ для различных моментов времени:

$a$  — 0,19 с;  $b$  — 0,20 с;  $c$  — 0,22 с

Динамические характеристики процесса воспламенения топливной смеси определяются временным интервалом выхода ГСВ на режим  $t_{0,9}$ , который отсчитывается от момента подачи горючего и завершается, когда температура в выходном сечении форкамеры ГВЭП достигает 90 % термодинамически равновесной температуры для данного соотношения компонентов топлива.

Приведенные на рис. 6 зависимости  $t_{0,9}$  от соотношения  $D_5/D_4$  при различных коэффициентах избытка окислителя  $\alpha$  показывают, что динамические характеристики процесса воспламенения имеют экстремальный характер. Минимальные значения  $t_{0,9}$  соответствуют диапазону  $D_5/D_4 = 0,15 \dots 0,20$ . Это объясняется двукратным увеличением интенсивности смешения компонентов топлива в резонансной полости при незначительном снижении температуры  $T_n$  относительно

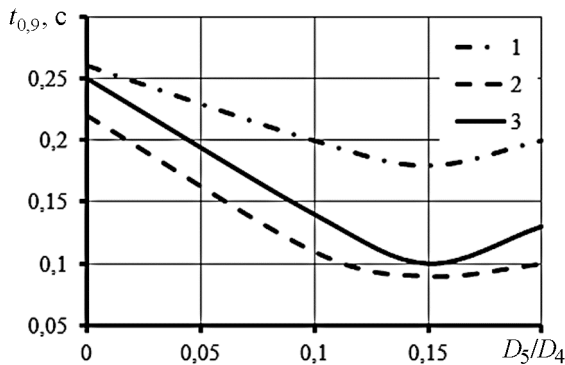
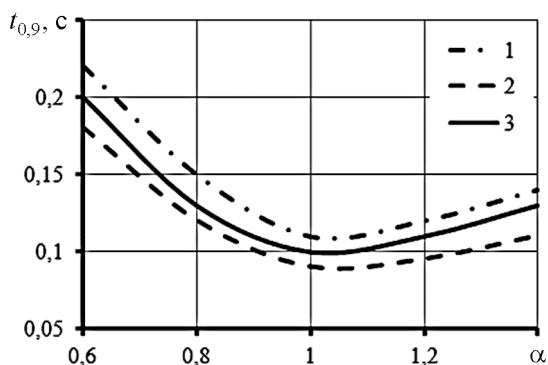


Рис. 6. Зависимость  $t_{0,9}$  от  $D_5/D_4$ :

1 —  $\alpha = 0,6$ ; 2 —  $\alpha = 1$ ; 3 —  $\alpha = 1,4$

$T_p$  (на 5...15 %). При указанных геометрических параметрах временной интервал выхода форкамеры ГВЭП на номинальный режим сокращается более чем в 1,5 раза относительно ГСВ с замкнутой резонансной полостью, для которой  $t_{0,9} = 0,20...0,25$  с.

Как следует из выполненных расчетов, значение  $t_{0,9}$  минимально при соотношении компонентов, близком к стехиометрическому  $\alpha = 1$  (рис. 7), что объясняется ухудшением воспламеняемости топливных смесей с низким содержанием одного из компонентов.



**Рис. 7.** Зависимость  $t_{0,9}$  от  $\alpha$ :  
1 —  $D_5/D_4 = 0,1$ ; 2 —  $D_5/D_4 = 0,15$ ; 3 —  $D_5/D_4 = 0,2$

Таким образом, использование резонаторов с незамкнутой торцевой стенкой позволяет интенсифицировать процесс смешения топлива и сократить время основной фазы смесеобразования до 0,06 с.

По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы.

1. Газовая система воспламенения является одной из перспективных систем воспламенения топливной смеси в ГВЭП различного назначения.

2. При использовании в ГСВ резонаторов с замкнутой торцевой стенкой в ряде случаев наблюдается недостаточная интенсивность смешения компонентов топлива в застойной зоне резонансной полости, причем интервал времени протекания основной фазы смесеобразования достигает 0,10...0,15 с.

3. Размыкание торцевой стенки резонатора позволяет интенсифицировать процесс смешения топлива и сократить время основной фазы смесеобразования до значений менее 0,06 с.

4. В ГСВ с незамкнутой резонансной стенкой, в частности при  $D_5/D_4 = 0,15...0,20$  и соотношении компонентов топлива, близком к стехиометрическому, могут быть получены значения времени выхода форкамеры ГВЭП на номинальный режим менее 0,1 с.

*Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 12-08-31114.*

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Hartman J., Troll B. One New Method for the Generation of Sound Waves. *Physical Review*, 1922, no. 11, pp. 719–730.
- [2] Sprenger H.S. Uber Thermische Effekte bei Resonanzbremsen. *Mitteilungen aus dem Institut fur Aerodynamik*, 1954, bd. 6, ss. 18–35.
- [3] Воронцовский А.В., Арефьев К.Ю. Анализ области эффективного применения закиси азота в качестве компонента топлива для двигательных установок малых космических аппаратов. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/450400.html> (дата обращения 04.09.2012).
- [4] Воронцовский А.В., Арефьев К.Ю., Захаров В.С. Расчетно-теоретическое исследование резонансной системы газодинамического воспламенения ЖРД малой тяги. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2012, № 1, с. 31–41.
- [5] Воронцовский А.В., Арефьев К.Ю. Экспериментальное исследование процесса запуска ЖРД МТ на компонентах  $N_2O/H_2$  с помощью газодинамической системы воспламенения. *Актуальные проблемы российской космонавтики. Материалы XXXVII академических чтений по космонавтике*. Москва, Комиссия РАН, 2013, с. 80–81.
- [6] Зельдович Я.Б., Баренблатт Г.И., Либрович В.Б., Махвиладзе Г.М. *Математическая теория горения и взрыва*. Москва, Наука, 1980, 480 с.
- [7] Яхимовский К.Дж. Упрощенный механизм горения углеводородного топлива. *Аэрокосмическая техника*, 1986, № 6, с. 148–156.

Статья поступила в редакцию 15.07.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

А.В. Воронцовский, К.Ю. Арефьев. Интенсификация смешения компонентов топлива в газодинамической системе воспламенения. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 4.

URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/693.html>

**Воронцовский Андрей Владимирович** родился в 1946 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1970 г., д-р техн. наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ; заведующий отделом НИИ энергетического машиностроения МГТУ им. Н.Э. Баумана; автор более 100 научных работ в области тепло- и массообмена в двухфазных потоках и конверсионного применения ракетных двигателей малой тяги. e-mail: voron@mx.bmstu.ru

**Арефьев Константин Юрьевич** родился в 1988 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2011 г., инженер-конструктор отдела «Аэрокосмические двигатели» ФГУП ЦИАМ им. П.И. Баранова; аспирант кафедры «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана; научные интересы — моделирование инициирования и протекания рабочего процесса в энергетических и силовых установках перспективных аэрокосмических систем. e-mail: arefyev@rambler.ru