

УДК 641.454.2

Исследование эффективности рабочего процесса в малогабаритных генераторах высокоэнтальпийного воздушного потока

Александров В. Ю.¹, Арефьев К. Ю.^{1,2},
Ильченко М. А.^{1,*}, Ананян М. В.¹

*012@ciam.ru

¹Центральный институт авиационного моторостроения
имени П.И. Баранова, Москва, Россия

²МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Генераторы высокоэнтальпийных воздушных потоков (ГВВП) широко применяются для имитации условий потока на входе в камеры сгорания (КС) при испытаниях прямоточных воздушно-реактивных двигателей (ПВРД) перспективных летательных аппаратов. В виду строгих массогабаритных ограничений, накладываемых условиями испытаний КС ПВРД и используемым стендовым оборудованием, важной задачей является уменьшение размеров и массы ГВВП. Для малогабаритных ГВВП известны проблемы организации эффективного рабочего процесса, связанные с малым временем пребывания рабочего тела и незавершенностью физико-химических процессов в КС ГВВП. В большинстве случаев подобные проблемы могут быть выявлены и решены непосредственно на этапе стендовой отработки малогабаритных ГВВП. В статье представлены результаты исследования эффективности рабочего процесса в малогабаритном ГВВП и приведены результаты его экспериментальной апробации. Полученные данные могут быть использованы при отработке различных ГВВП, в том числе предназначенных для испытаний камер сгорания прямоточных воздушно-реактивных двигателей перспективных летательных аппаратов.

Ключевые слова: высокоэнтальпийный поток, испытания двигателей, расходный комплекс, экспериментальное исследование, эффективность рабочего процесса

Введение

При испытаниях камер сгорания (КС) прямоточных воздушно-реактивных двигателей (ПВРД) для перспективных летательных аппаратов (ЛА) большое внимание уделяется исследованиям характеристик рабочего процесса, в том числе коэффициента полноты сгорания топливной смеси [1].

Наиболее оправданным на стадии экспериментального исследования характеристик рабочего процесса в КС является проведение их испытаний на стенде с присоединенным воздухопроводом. Для экспериментального определения коэффициента полноты сгорания

топливной смеси проводится сравнение рассогласования реально полученной тяги, создаваемой экспериментальным объектом при весовых испытаниях и теоретически возможной при заданных условиях испытания.

Испытания КС ПВРД требуют создания условий на входе максимально приближенных к натурным, в первую очередь по температуре торможения T_0 , числу Маха M_0 и полному давлению p_0 воздушного потока. Достижение температуры потока на входе в КС $T_0 = 1000...2000$ К может быть обеспечено путем применения генератора высокоэнтальпийного воздушного потока (ГВВП), обеспечивающего огневой подогрев воздуха и компенсацию кислородного баланса [2].

В виду строгих массогабаритных ограничений, накладываемых условиями испытаний ряда КС ПВРД и используемым стендовым оборудованием, требуется снижение размеров и массы ГВВП. Использование малогабаритных ГВВП сопровождается высокой расходонапряженностью в проточном тракте [3] и значительными тепловыми нагрузками на элементы конструкции [4]. Также известны проблемы организации эффективного рабочего процесса и обеспечения стабильности горения в малогабаритных ГВВП [3]. В большинстве случаев подобные проблемы могут быть выявлены и решены непосредственно на этапе стендовой отработки малогабаритных ГВВП.

Определяющим критерием эффективности рабочего процесса в ГВВП является завершенность физико-химических процессов сгорания компонентов рабочего тела. Это обусловлено тем, что в процессе испытаний возможное догорание компонентов рабочего тела ГВВП в проточном тракте КС ПВРД оказывает существенное влияние на исследуемые характеристики двигателя, что негативно сказывается на качестве проводимого эксперимента. Таким образом, при испытаниях требуется достичь максимального сгорания компонентов рабочего тела именно в КС ГВВП.

В виду особенностей применения и экспериментальной отработки малогабаритных ГВВП актуальной задачей становится исследование эффективности рабочего процесса в КС. В статье описан метод, основанный на использовании в процессе экспериментальной отработки камеры дожигания и приведены результаты его апробации. В процессе апробации исследована эффективность работы малогабаритного ГВВП на различных компонентах топлива.

Конструктивная схема и принцип работы ГВВП

Из анализа ряда исследований [2, 5] следует, что малогабаритные ГВВП, используемые для испытаний КС ПВРД, могут отличаться компонентами рабочего тела, системами их подачи, смешения и воспламенения, а также конфигурацией проточного тракта. Как показано в работе [2] наиболее оправданной для условий испытаний КС ПВРД является схема ГВВП, представленная на рис. 1. Подобная конфигурация позволяет достигать высокой эффективности работы ГВВП при использовании в качестве горючего как водорода, так и газообразных или жидких углеводородных соединений (УВС).

Конструкция представленного малогабаритного ГВВП состоит из входного участка 1 с устройством распыла кислорода 2, смесительной камеры 3, распределителя компонентов 4 с форсунками 5, КС ГВВП 6 с воспламенителем 7, сопла 8, системы охлаждения 9, стендового переходника 10, систем подачи воздуха 11, кислорода 12 и горючего 13.

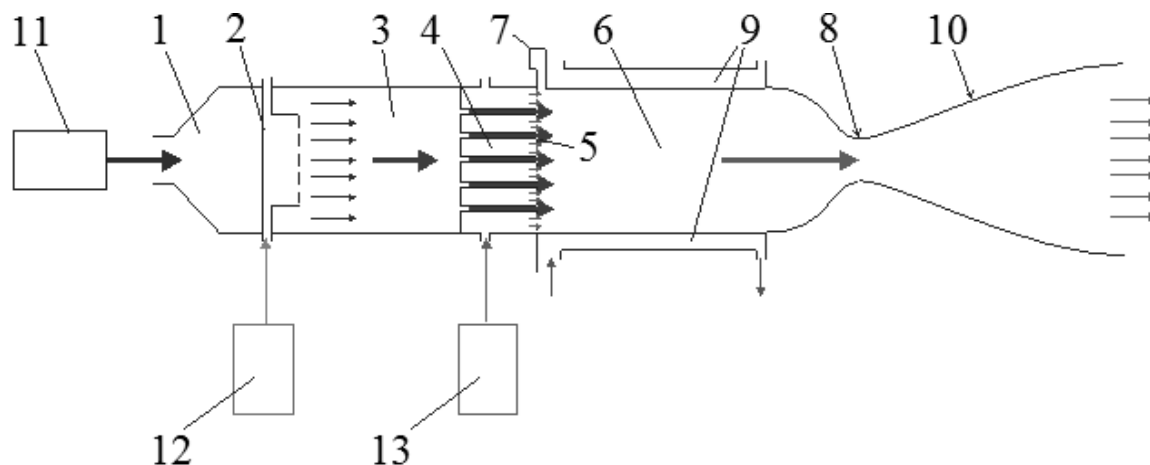


Рис. 1. Схема малогабаритного ГВВП: 1 - входной участок; 2 – устройство распыла кислорода; 3 - смесительная камера; 4 - распределитель компонентов; 5 – форсунки; 6 – КС КВВП; 7 - воспламенитель; 8 – сопло; 9 - система охлаждения; 10 – стендовый переходник; 11 - система подачи воздуха; 12 - система подачи кислорода; 13 - система подачи горючего

Принцип действия ГВВП заключается в следующем. Подаваемый с помощью системы 11 воздух смешивается с кислородом в камере 3. При этом для повышения равномерности распределения кислорода используется специальное устройство 2. Далее по потоку в распределителе компонентов 4 через форсунки 5 происходит подача горючего в кислородно-воздушный поток. После инициирования рабочего процесса воспламенителем 7 в КС ГВВП происходит сгорание с образованием высокоэнтальпийного рабочего тела. Далее рабочее тело попадает в стендовое сопло 8, в котором происходит ускорение потока до заданной скорости и через переходник 10 подается к экспериментальному объекту.

В большинстве случаев, соотношение компонентов рабочего тела ГВВП выбирается таким образом, чтобы по завершению их полного сгорания массовая концентрация кислорода в высокоэнтальпийном воздушном потоке максимально соответствовала его содержанию в воздухе.

На основе моделирования термодинамического равновесия с помощью программы TERRA [6] могут быть определены концентрации компонентов рабочего тела (необходимые для создания высокоэнтальпийного воздушного потока с заданной температурой) и химический состав продуктов их сгорания. Некоторые результаты

расчетов представлены в таблице 1. В качестве горючего рассмотрен водород и газообразное УВС (метан).

Таблица 1. Массовые концентрации компонентов рабочего тела и химических элементов в высокоэнтальпийном воздушном потоке

Компонент, химическое соединение	1000 К		1500 К		2000 К	
Компоненты рабочего тела						
Воздух	0,920	0,900	0,830	0,812	0,766	0,706
Кислород	0,070	0,085	0,155	0,159	0,212	0,248
Водород	0,010	-	0,015	-	0,022	-
УВС (метан)	-	0,015	-	0,029	-	0,044
Химический состав высокоэнтальпийного воздушного потока						
N ₂	0,698	0,679	0,626	0,612	0,576	0,531
O ₂	0,231	0,231	0,231	0,231	0,231	0,231
H ₂ O	0,059	0,034	0,128	0,064	0,174	0,099
CO ₂	-	0,043	-	0,079	-	0,121
NO	-	-	0,001	0,001	0,006	0,006
Прочее	0,012	0,013	0,014	0,013	0,013	0,012

Рассматривая результаты термодинамических расчетов можно отметить следующее. При сгорании водорода в кислородно-воздушной смеси продукты сгорания могут содержать пары воды (H₂O) с массовой концентрацией до 18 %, значение которой зависит от моделируемой температуры. Применение УВС позволяет снизить долю паров воды в продуктах сгорания на 30...40 %, однако приводит к появлению значительного количества диоксида углерода (CO₂), массовая концентрация которого при температуре 2000 К составляет ~ 12 %. Кроме того, повышение температуры рабочего тела ГВВП приводит к появлению радикала NO.

Значительная разница в составе высокоэнтальпийного воздушного потока может оказать влияние на выбор горючего для ГВВП в зависимости от режимов работы испытываемых КС ПВРД и применяемых топлив.

Оценка эффективности рабочего процесса в ГВВП

Определяющим критерием эффективности рабочего процесса в ГВВП является завершенность физико-химических процессов сгорания компонентов рабочего тела. Это обусловлено тем, что в процессе испытаний возможное догорание компонентов рабочего тела ГВВП в проточном тракте КС ПВРД оказывает существенное влияние на исследуемые характеристики двигателя, что негативно сказывается на качестве проводимого эксперимента. Таким образом, при испытаниях требуется достичь максимального сгорания компонентов рабочего тела именно в КС ГВВП.

Одним из наиболее распространенных показателей завершенности физико-химических процессов сгорания компонентов рабочего тела является коэффициент расходного комплекса $\varphi_\beta = \beta_\beta / \beta_T$ [7]. Здесь β_β - экспериментальное значение расходного комплекса, β_T - теоретическое значение расходного комплекса, полученное при термодинамическом равновесии продуктов сгорания компонентов рабочего тела. Для определения β_β возможно использование адаптированного уравнения следующего вида:

$$\beta_\beta = \frac{p_{\text{КС}} \cdot F_{\text{крКС}} \cdot \mu_c}{\pi(M_{\text{КС}}) \cdot G_\Sigma},$$

где $p_{\text{КС}}$ - статическое давление в КС ГВВП, $F_{\text{крКС}}$ - площадь критического сечения сопла ГВВП, μ_c - коэффициент расхода сопла ГВВП, $\pi(M_{\text{КС}})$ - газодинамическая функция [8], $M_{\text{КС}}$ - число Маха в КС ГВВП.

Зависимость газодинамической функции $\pi(M)$ от числа Маха M имеет следующий вид [8]:

$$\pi(M) = \left(1 + \frac{k-1}{2} \cdot M^2 \right)^{\frac{k}{1-k}},$$

где k – показатель адиабаты.

Для определения числа Маха в КС ГВВП возможно использовать соотношения:

$$\frac{F_{\text{крКС}}}{F_{\text{КС}}} = M_{\text{КС}} \cdot \left(\frac{k+1}{2 + (k-1) \cdot M_{\text{КС}}^2} \right)^{\frac{k+1}{2 \cdot (k-1)}};$$

$$M_{\text{КС}} \leq 1.$$

Здесь $F_{\text{КС}}$ – площадь поперечного сечения КС ГВВП в месте измерения статического давления $p_{\text{КС}}$.

Следует отметить, что в случае отсутствия потерь на теплоотвод в стенки и полном сгорании компонентов рабочего тела ГВВП значение коэффициента расходного комплекса составляет $\varphi_\beta \approx 1$.

С помощью коэффициента φ_β возможно определить температуру рабочего тела ГВВП. Характерная зависимость $T_{\text{КС}}/T_p$ от φ_β для рассматриваемых компонентов рабочего тела ГВВП представлена на рис. 2. Здесь T_p - расчетная термодинамически равновесная температура продуктов полного сгорания компонентов рабочего тела в условиях отсутствия тепловых потерь в КС.

Однако, на коэффициент φ_β оказывает влияние не только незавершенность физико-химических процессов, но и отвод тепла в стенки охлаждаемой КС. В виду этого использование коэффициента φ_β как прямого индикатора эффективности рабочего процесса в КС ГВВП затруднено и требует пересчет с учетом тепловых потерь на охлаждение. Для этого необходимо выполнение точных измерений тепловых потоков в

стенки КС малогабаритных ГВВП, что в ряде случаев сопровождается рядом технических трудностей, связанных с условиями испытаний.

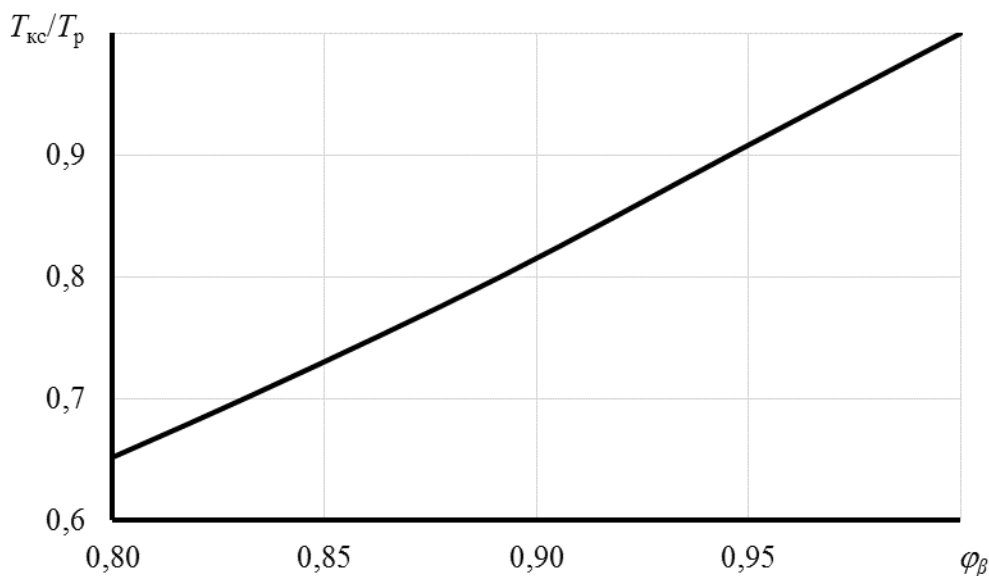


Рис. 2. Характерная зависимость T_{kc}/T_p от φ_β

Ввиду вышесказанного в работе предложен метод определения завершенности процесса горения в КС ГВВП, который заключается в следующем (рис. 3). К переходнику 5 присоединяется камера дожигания (КД) высокоэнтальпийного воздушного потока 6 с соплом 7.

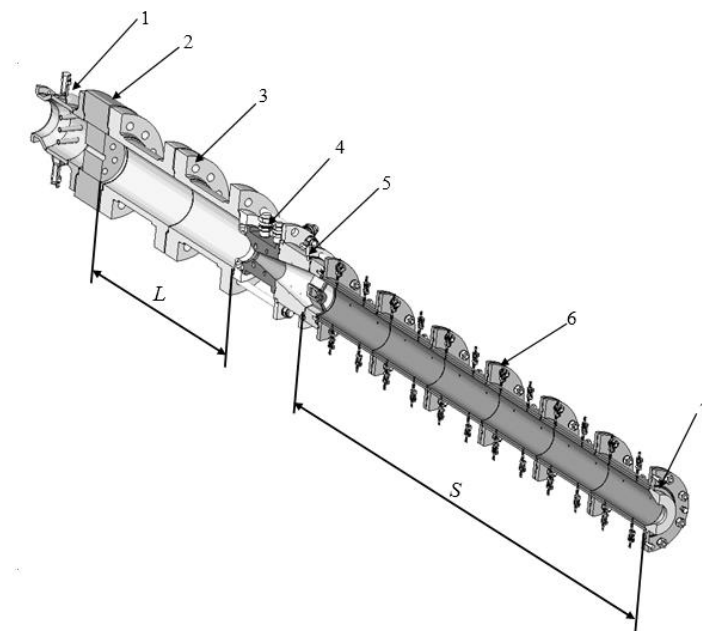


Рис. 3. Конструктивная схема установки для оценки эффективности рабочего процесса в ГВВП: 1 - входной участок с устройством распыла кислорода; 2 - распределитель компонентов; 3 - КС КВВП; 4 - сопло ГВВП; 5 - стендовый переходник; 6 - КД; 7 - сопло КД

Предполагается, что в случае незавершенности физико-химических процессов в КС ГВВП, в КД произойдет догорание смеси. Для наиболее полного догорания смеси в КД требуется выполнение следующего условия:

$$\frac{F_{\text{кд}} \cdot S}{F_{\text{кркд}}} > \frac{F_{\text{кс}} \cdot L}{F_{\text{кркс}}}$$

Здесь L – длина КС ГВВП, S – длина КД, $F_{\text{кркд}}$ – площадь критического сечения сопла КД, $F_{\text{кс}}$ – площадь поперечного сечения КД.

В виду значительного времени пребывания рабочего тела в КД, в ее выходном сечении следует ожидать практически полного завершения процессов горения. Исходя из этого эффективность рабочего процесса непосредственно в КС ГВВП может быть оценена с помощью коэффициента $\psi_\beta = \beta_\beta / \beta_{\text{кд}}$. Здесь $\beta_{\text{кд}}$ – экспериментальное значение расходного комплекса, соответствующего течению в сопле КД. Для определения $\beta_{\text{кд}}$ может быть использовано следующее выражение:

$$\beta_{\text{кд}} = \frac{p_{\text{кд}} \cdot F_{\text{кркд}} \cdot \mu_{\text{скд}}}{\pi(M_{\text{кд}}) \cdot G_\Sigma}.$$

Здесь $p_{\text{кд}}$ – статическое давление в КД, $F_{\text{кркд}}$ – площадь критического сечения сопла КД, $\mu_{\text{скд}}$ – коэффициент расхода сопла КД. Число Маха в проточном тракте КД $M_{\text{кд}}$ определяется с помощью следующих соотношений:

$$\frac{F_{\text{кркс}}}{F_{\text{кс}}} = M_{\text{кс}} \cdot \left(\frac{k+1}{2 + (k-1) \cdot M_{\text{кс}}^2} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}};$$

$$M_{\text{кс}} \leq 1.$$

Экспериментальная апробация данной методики проведена с помощью малогабаритного ГВВП и использованием в качестве горючего водорода, а также УВС (метана).

Пример осциллограмм изменения статического давления в КС ГВВП и КД, а также значения ψ_β и ϕ_β при испытаниях с использованием УВС (метана) и водорода в качестве горючего представлены на рис. 4. Расчетное значение давления термодинамически равновесного рабочего тела составляло $p_p \sim 2$ МПа.

Анализ показывает, что для малогабаритных ГВВП $\phi_\beta = 0,7 \dots 0,75$, что указывает на значительные тепловые потери. В случае использования УВС в качестве горючего $\psi_\beta < 1$. Это является следствием выделения энергии в КД, которое может быть связано с догоранием подаваемой смеси. Для водорода $\psi_\beta > 1$, а соответственно температура в КД меньше, чем температура в КС ГВВП, что может быть объяснено потерями на отвод тепла в стенки КД. При использовании водорода значения ϕ_β меньше, а ψ_β больше по сравнению с УВС. Исходя из этого можно предположить, что для водорода потери тепла в КС ГВВП находятся на более высоком уровне относительно УВС. Завершенность рабочего процесса в КС ГВВП с использованием водорода также выше.

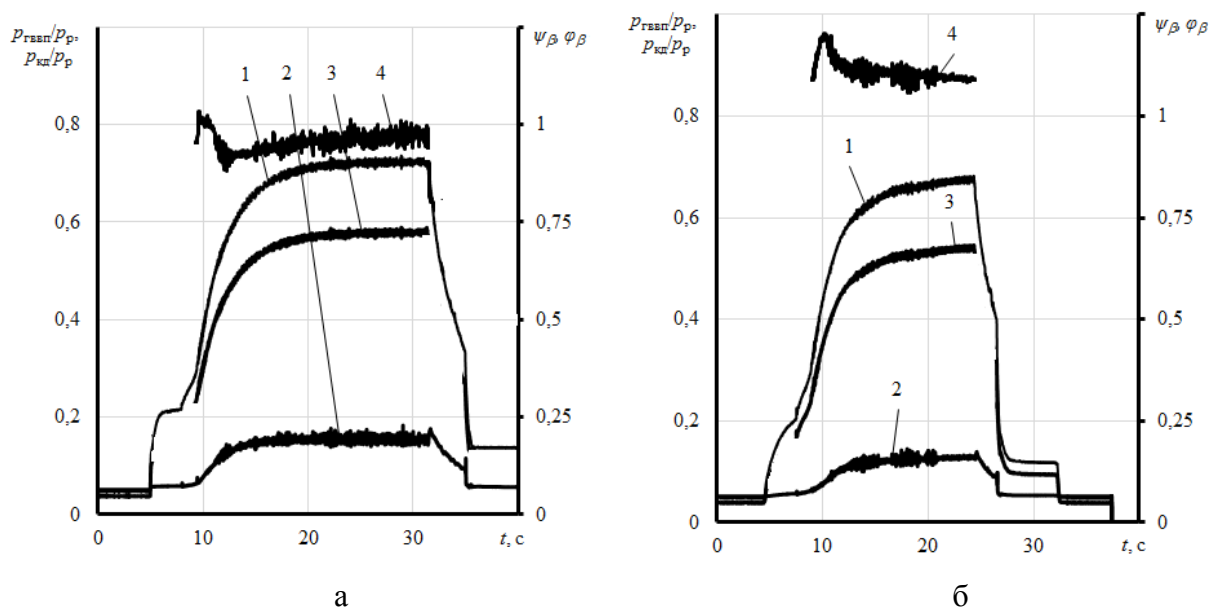


Рис. 4. Пример осциллограмм параметров при испытаниях с использованием УВС (а) и водорода (б):
1 - $p_{кд}/p_p$; 2 - $p_{гввп}/p_p$; 3 - φ_β ; 4 - ψ_β

Изменение в процессе испытаний ψ_β и приближения его к $\psi_\beta \approx 1$ является следствием повышения эффективности рабочего процесса в ГВВП и снижением тепловых потерь в КД (в виду повышения температуры стенок). Оценки показывают, что максимальные потери тепла в стенки КД составляют до 10 % относительно полной энтальпии потока.

Анализ ряда экспериментальных данных показывает, что в случае использования смесевых горючих (УВС + водород) эффективность рабочего процесса в ГВВП имеет сильную зависимость от соотношения компонентов в нем. Влияние массового содержания водорода g_{H_2} в смесевом горючем на коэффициент ψ_β представлено на рис. 5.

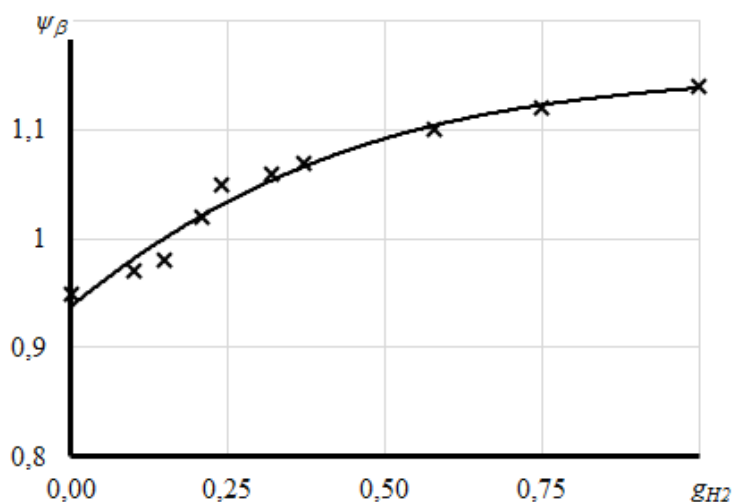


Рис. 5. Влияние g_{H_2} в смесевом горючем на коэффициент ψ_β

Из приведенных данных следует, что для обеспечения $\psi_\beta > 1$ содержание водорода в смесевом горючем должно составлять около 20 %. Дальнейшее повышение содержания водорода приводит к росту степени завершенности рабочего процесса в ГВВП.

Заключение

В результате выполненных исследований показано, что при использовании водорода в качестве горючего ГВВП концентрация паров воды в продуктах сгорания имеет массовую концентрацию до 18 %, значение которой зависит от моделируемой температуры. Применение УВС позволяет снизить долю паров воды в продуктах сгорания на 30...40 %, однако приводит к появлению значительного количества диоксида углерода (CO_2), массовая концентрация которого при температуре 2000 К составляет ~ 12 %. Кроме того, повышение температуры рабочего тела ГВВП приводит к появлению радикала NO . Концентрация прочих соединений составляет не более 1,4 %.

Предложен и экспериментально апробирован метод определения завершенности процессов горения в проточном тракте малогабаритных ГВВП, основанный на использовании дополнительной КД и сравнения экспериментальных значений расходного комплекса в КС ГВВП и КД соответственно.

Для малогабаритных ГВВП $\varphi_\beta = 0,7...0,75$, что указывает на значительные тепловые потери. В случае использования УВС в качестве горючего $\psi_\beta < 1$. Это является следствием выделения энергии в КД, которое может быть связано с догоранием подаваемой смеси. Для водорода $\psi_\beta > 1$, что может быть объяснено потерями на отвод тепла в стенки КД. При использовании водорода значения φ_β меньше, а ψ_β больше по сравнению с УВС. Установлено, что при использовании в качестве горючего водорода, потери тепла в КС ГВВП находятся на более высоком уровне относительно использования УВС. Завершенность рабочего процесса в КС ГВВП с использованием водорода также выше. Использование смесевых горючих эффективно в случае содержания в нем ~ 20 % водорода.

Полученные данные могут быть использованы при отработке различных ГВВП, в том числе предназначенных для испытаний камер сгорания прямоточных воздушно-реактивных двигателей перспективных летательных аппаратов.

Список литературы

1. Курзинер Р.И. Реактивные двигатели для больших сверхзвуковых скоростей полета. М.: Машиностроение, 1989. 263 с.
2. Александров В.Ю. Теоретический анализ и экспериментальные исследования на наземных стендах процессов смешения и горения в камерах сгорания применительно к проблемам создания и испытаний гиперзвуковых двигателей: дис. ... канд. техн. наук. М., 2003. 220 с.

3. Александров В.Ю., Арефьев К.Ю., Ильченко М.А. Расчетно-экспериментальные исследования пульсационных процессов в малогабаритных генераторах высокоэнтальпийного потока с газодинамической системой воспламенения // Известия РАН. Энергетика. 2014. № 6. С. 96-107.
4. Авдеевский В.С., Галицейский Б.М., Глебов Г.А. Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике / под ред. В.С. Авдеевского, В.К. Кошкина. М.: Наука, 1992. 515 с.
5. Прохоров А.Н. Экспериментальные исследования влияния геометрических и режимных параметров топливных пилонов на эффективность рабочего процесса в камерах сгорания ГПВРД: дис. ... канд. техн. наук. М., 2003. 232 с.
6. Трусев Б.Г. Программная система TERRA для моделирования фазовых и химических равновесий при высоких температурах // III Международный симпозиум «Горение и плазмохимия» (Казахстан, Алмата, 24 – 26 августа 2005 г.): тр. Алматы: Изд-во Казахского национального ун-та, 2005. С. 52-57.
7. Добровольский М.В. Жидкостные ракетные двигатели / под ред. Д.А. Ягодникова. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. 488 с.
8. Черный Г.Г. Газовая динамика. М.: Наука, 1988. 424 с.

Research of Workflow Efficiency in High-Enthalpy Air Flow Compact Generators

V.Yu. Aleksandrov¹, K.Yu. Aref'ev^{1,2},
M.A. Il'chenko^{1,*}, M.V. Ananyan¹

[*012@ciam.ru](mailto:012@ciam.ru)

¹Central Institute of Aviation Motors n. a. P.I. Baranov,
Moscow, Russia

²Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: high-enthalpy flow, engine tests, consumables complex, experimental research, working process efficiency

To test the combustion chambers (CC) of high-speed ramjet engine (ramjet) it is necessary to create the inlet conditions as realistic as possible, including the stagnation temperature T_0 , the Mach number M_0 , and the total airflow pressure p_0 . To achieve $T_0 = 1000 \dots 2000$ K is possible using a high-enthalpy airflow generator (HAG) providing the fired air-heating and oxygen balance compensation.

Due to strict weight and size restrictions imposed by the test conditions of the ramjet CC and bench equipment, there is a need to reduce HAG size and weight. For small HAG the relevant tasks are to organize effective workflow and ensure combustion stability, which can be solved directly at the developmental testing stage.

The characteristic criterion of the workflow efficiency in HAG is the completed physico-chemical combustion processes of the working fluid components. This is due to the fact that in the testing process a possible after-burning component of the working fluid in the flow path of the ramjet CC has a significant impact on the studied characteristics of the engine, thereby having a detrimental effect on the quality of the experiment.

The examination of the workflow efficiency in HAG showed that the use of hydrogen as a fuel allows us to achieve a high degree of completing the physicochemical processes and reaching the specified conditions at the CC inlet to the ramjet under test. The use of hydrocarbon fuels reduces the completion degree of the workflow process in HAG and is accompanied by the development of pressure pulsations.

The data obtained can be used when developing various HAGs, including those intended for testing the CC of ramjets for the prospective aircrafts

References

1. Kurziner R.I. *Reaktivnye dvigateli dlya bol'shikh sverkhzvukovykh skorostei poleta* [Jet engines for high-supersonic speeds]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989. 263 p. (in Russian).
2. Aleksandrov V.Yu. *Teoreticheskii analiz i eksperimental'nye issledovaniya na nazemnykh stendakh protsessov smesheniya i goreniya v kamerakh sgoraniya primenitel'no k problemam sozdaniya i ispytaniy giperzvukovykh dvigatelei. Kand. dis.* [The theoretical analysis and experimental research of mixing and burning processes in combustion chambers on the ground test facilities in relation to the problems of creation and test of hypersonic engines. Cand. dis.]. Moscow, 2003. 220 p. (in Russian).
3. Aleksandrov V.Y., Arefyev K.Y., Ilchenko M.A. Numerical and experimental investigation non-stationary processes in the compact high enthalpy flows generators with gasdynamically ignition system. *Izvestiya RAN. Energetika = Proceedings of RAS. Power Engineering*, 2014, no. 6, pp. 96-107. (in Russian).
4. Avduevskii V.S., Galitseiskii B.M., Glebov G.A. *Osnovy teploperedachi v aviatsionnoi i raketno-kosmicheskoi tekhnike* [Fundamentals of heat transfer in the aviation and aerospace technology]. Moscow, Nauka Publ., 1992. 515 p. (in Russian).
5. Prokhorov A.N. *Eksperimental'nye issledovaniya vliyaniya geometricheskikh i rezhimnykh parametrov toplivnykh pilonov na effektivnost' rabochego protsessa v kamerakh sgoraniya GPVRD. Kand. dis.* [Experimental study of the effect of geometrical and operational parameters of fuel pylons on the efficiency of working processes in combustion chambers of scramjet. Cand. dis.]. Moscow, 2003. 232 p. (in Russian).
6. Trusov B.G. [TERRA software system for modeling phase and chemical equilibria at high temperatures]. *3 Mezhdunarodnyi simpozium "Gorenie i plazmokhimiya": tr.* [Proc. of the 3rd International Symposium "Combustion and Plasmochemistry"], Almaty, Kazakhstan, 24-26 August 2005. Almaty, Kazakh National University Publ., 2005, pp. 52-57. (in Russian).
7. Dobrovol'skii M.V. *Zhidkostnye raketnye dvigateli* [Liquid rocket engine]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2005. 488 p. (in Russian).
8. Chernyi G.G. *Gazovaya dinamika* [Gasdynamics]. Moscow, Nauka Publ., 1988. 424 p. (in Russian).