

Экспериментально-теоретическое исследование истечения продуктов сгорания из двухсоплового газогенератора

© Д.А. Ягодников, К.Ю. Арефьев, А.В. Сухов,
И.И. Хомяков, Н.Я. Ирьянов

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

Представлены результаты расчетно-экспериментального исследования процесса истечения из регулируемого двухсоплового газогенератора продуктов сгорания энергетической конденсированной системы, а также процесса их смешения. Расчетные исследования основаны на математическом моделировании газодинамического течения в трехмерной постановке для вязкого теплопроводного газа с частицами конденсированной фазы. Выполнены экспериментальные исследования модельного газогенератора с зарядом энергетической конденсированной системы торцевого горения. В процессе диагностики истечения из сопел газогенератора продуктов ее сгорания использованы методы визуализации и яркостной пирометрии. Выявлены закономерности изменения структуры потока продуктов сгорания при истечении и процессов взаимодействия газогенераторных струй при различных значениях давления в газогенераторе и диаметра критических сечений сопел.

Ключевые слова: газогенератор, энергетические конденсированные системы, истечение, математическое моделирование, эксперимент, визуализация.

Введение. Во многих технических системах применяют газогенераторы (ГГ), предназначенные для выработки рабочего тела с необходимыми для дальнейшего потребления характеристиками [1]. При этом определенными преимуществами обладают регулируемые ГГ, позволяющие повысить эффективность их использования, например, за счет рационального расходования рабочего тела и увеличения времени работы.

В настоящее время в качестве источника рабочего тела применяют сжатый газ, жидкое топливо и энергетические конденсированные системы (ЭКС). В ракетном двигателестроении ГГ в большинстве случаев используют для наддува топливных баков ракет-носителей и в качестве пусковых устройств турбонасосной системы подачи топлива [2]. Кроме того, ГГ на ЭКС можно применять в различных конверсионных приложениях ракетного двигателестроения, в частности в установках бурения скважин, системах пожаротушения [3]. Причем эффективность использования последних во многом определяется возможностью регулирования в зависимости от реальных условий применения.

Если для ГГ на жидком топливе задача регулирования, например, расходом рабочего тела может быть решена довольно просто с использованием традиционных систем гидropневмоавтоматики, то создание регулируемых ГГ на ЭКС связано с некоторыми техническими трудностями. Они вызваны условиями работы исполнительного элемента — регулятора — в высокотемпературном потоке, содержащем при определенных условиях конденсированную фазу (к-фазу). В связи с этим в последнее время проводятся научно-исследовательские работы по оптимизации как конструкции ГГ, так и способа, позволяющего управлять, например, расходом рабочего тела. Имеющиеся в этой области публикации посвящены в основном вопросам разработки конструктивных материалов и приводов регуляторов расхода ГГ [4]. Тем не менее большой практический интерес представляют характеристики рабочего тела, генерируемого в процессе регулирования ГГ, в частности пространственное распределение температуры, концентрации рабочего тела и его однородность.

В соответствии с изложенным целью данной работы является экспериментально-теоретическое исследование процесса истечения из регулируемого двухсоплового ГГ продуктов сгорания ЭКС, а также процесса их смешения.

В качестве объекта исследования принята конструкция двухсоплового ГГ, что позволяет регулировать расход путем изменения диаметра минимальных отверстий, а также путем изменения их проходного сечения, например, с помощью поворотного блока, перекрывающего соответствующие выходные отверстия.

На рис. 1 приведена схема модельного ГГ, использующего в качестве источника рабочего тела образец ЭКС, горящий по торцевой поверхности и забронированный по всем остальным поверхностям.

В сопловом блоке размещены два вкладыша с одинаковыми диаметрами минимальных сечений.

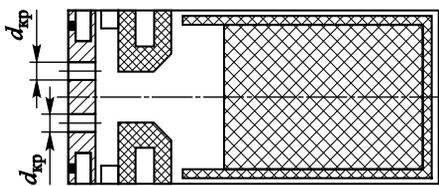


Рис. 1. Схема газогенератора

Анализ результатов расчетного исследования истечения продуктов газогенерации из соплового блока ГГ. Сначала выполнено математическое моделирование истечения продуктов газогенерации из ГГ в затопленное пространство. Расчеты газодинамического тече-

ния проведены путем численного интегрирования уравнений Навье — Стокса, уравнения неразрывности и уравнения сохранения энергии в трехмерной постановке для вязкого теплопроводного газа с помощью программного комплекса Fluent. Для решения системы уравнений использован метод RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes equations) с осреднением уравнений по Фавру и их замыканием с помощью однопараметрической модели турбулентности Спаларта — Аллмараса [5] и уравнения состояния идеального газа.

Расчетная область состоит из объема ГГ, соплового блока без расширяющейся части («очковое» сопло) и внешнего затопленного пространства — окружающего воздуха при нормальных условиях: $p_n = 0,1$ МПа, $T_n = 293$ К. Используются смешанные расчетные сетки (неструктурированная топология в области соплового блока и структурированная — в области внешнего пространства и объема ГГ) с общим количеством элементарных ячеек более $2,5 \cdot 10^6$.

Расчеты выполнены при давлении в ГГ $p_{ГГ} = 1,2 \dots 2,6$ МПа и температуре торможения продуктов газогенерации $2\ 277$ К, что соответствует условиям проведения экспериментального исследования, результаты которого рассмотрены далее. На основе предварительного термодинамического расчета получено, что в равновесном случае массовая доля к-фазы в продуктах газогенерации $z = 0,62$. Теплофизические параметры продуктов газогенерации для модельной ЭКС взяты из работы [6] и в зависимости от температуры представлены в таблице.

Теплофизические параметры продуктов газогенерации

Температура T , К	c_p , кДж/(кг · К)	R , кДж/(кг · К)	$\mu \cdot 10^4$, Па · с	λ , Вт/(м · К)
1 000	2,20	0,67	0,27	0,21
1 500	2,46	1,54	0,33	0,48
2 300	2,58	0,95	0,47	0,55

Примечание: c_p — удельная теплоемкость; R — газовая постоянная; μ — динамическая вязкость; λ — теплопроводность.

Для установившегося газодинамического течения расчет траекторий частиц к-фазы продуктов газогенерации проведен путем интегрирования дифференциального уравнения изменения скорости частиц аналогично рассмотренному в работе [7].

Диаметры частиц полидисперсной к-фазы заданы в диапазоне значений $1 \dots 200$ мкм. Среднесчетный диаметр частиц $d_{10} = 11,69$ мкм, среднеобъемный $d_{30} = 112,2$ мкм, среднеповерхностный $d_{32} = 66,6$ мкм [8].

Были получены распределения газодинамических параметров при истечении из двухсоплового блока с одинаковыми диаметрами критических сечений $d_{кр} = 8,5 \dots 5,5$ мм. Пример линий тока, образу-

щихся в таком течении, приведен на рис. 2. Видно, что на начальном участке затопленной струи имеется небольшое расширение газовой фазы в радиальном направлении, которое определяет траектории движения частиц к-фазы в окружающем воздухе. Поскольку происходит истечение недорасширенной струи продуктов газогенерации, то наблюдаются характерная «бочкообразная» структура потока (рис. 3) и возникновение чередующихся зон ускорения газа до ~ 1450 м/с и торможения до $800 \dots 900$ м/с. После второй системы структурной неоднородности происходит монотонное торможение потока, которое сопровождается размытием границ отдельной струи и соответственным смыканием двух соседних струй на расстоянии $\sim 200 \dots 250$ мм от среза сопел.

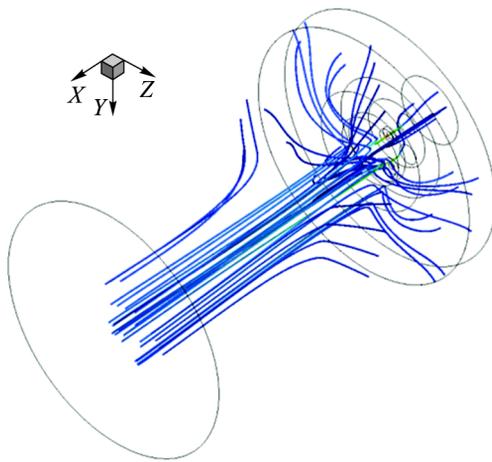


Рис. 2. Линии тока при истечении продуктов газогенерации в атмосферу

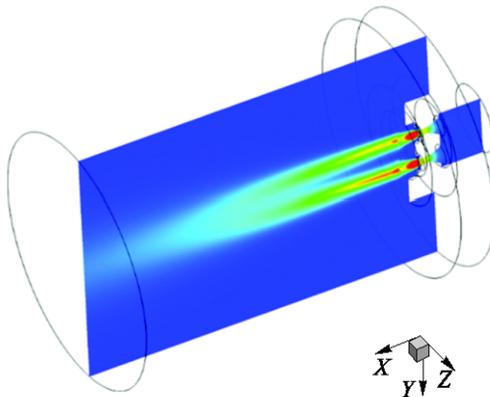
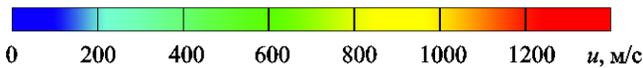


Рис. 3. Распределение осевой скорости u газа в плоскости сопел ГТ

Наиболее значимыми показателями истечения продуктов газогенерации из двухсоплового блока в атмосферу являются расстояние l между срезом сопел и замыкающим висячим скачком уплотнения каждой струи и расстояние L от среза сопел до места смыкания струй. В зависимости от давления в ГГ установлены закономерности изменения относительных параметров $l/d_{кр}$ и L/S_c , где S_c — расстояние между центрами сопловых отверстий (рис. 4).

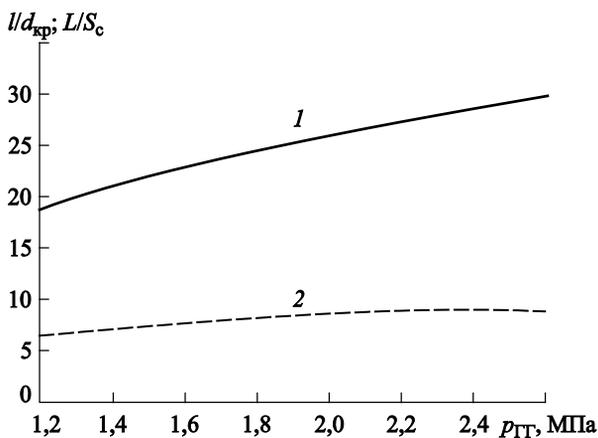


Рис. 4. Зависимость параметров истечения продуктов газогенерации из двухсоплового блока в атмосферу от давления в ГГ:
1 — $l/d_{кр}$; 2 — L/S_c

Анализ показывает, что повышение давления $p_{ГГ}$ от 1,2 до 2,6 МПа приводит к увеличению $l/d_{кр}$ более чем в 1,6 раза, в то время как L/S_c изменяется менее чем в 1,3 раза. Это связано с тем, что увеличение давления в ГГ сопровождается повышением степени нерасчетности течения на срезе сопла и образованием висячих скачков уплотнения большей интенсивности, которые в свою очередь приводят к интенсификации размытия и смыкания границ отдельных струй.

В соответствии с общими закономерностями течения двухфазных потоков за срезом сопел ГГ реализуется движение частиц к-фазы с чередованием их ускорения и торможения. Такой режим характерен для частиц всех рассмотренных фракций. Наибольшие и наименьшие значения скорости u_p частиц составляют ~ 1450 и ~ 700 м/с соответственно, что иллюстрирует большую инерционность частиц, особенно крупных фракций (рис. 5).

Скорости частиц диаметром более 50 мкм в затопленной струе продуктов газогенерации (на удалении от среза сопел около 200 мм) превышают скорости течения газа на 200...300 м/с. Это объясняется их первоначальным ускорением газовым потоком вблизи сопла до высоких скоростей и последующим торможением в атмосфере.

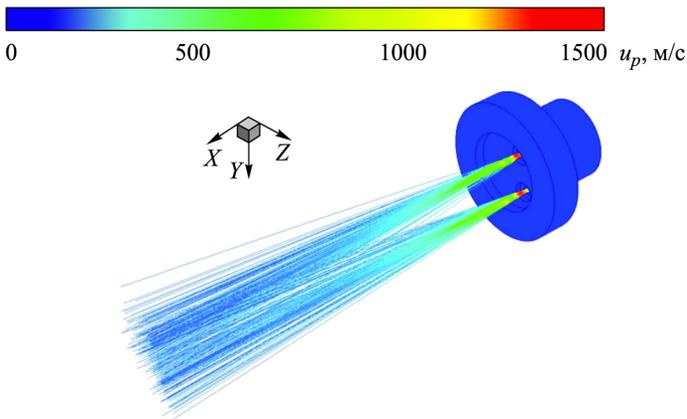


Рис. 5. Траектории, окрашенные в цвет скорости частиц полидисперсной к-фазы, при истечении продуктов газогенерации в атмосферу

Движение частиц меньшей фракции сопровождается небольшой скоростной неравновесностью с газовым потоком. Таким образом, при диаметре частиц менее 5 мкм разность скоростей становится пренебрежимо малой. На расстоянии ~350 мм от среза сопел происходит смешение двух потоков частиц и монотонное их торможение до скоростей ~50...100 м/с. Скорость частиц на выходе из сопел максимальна и составляет ~1 450 м/с. По мере движения происходит естественное торможение и расширение границ поля течения частиц к-фазы.

На рис. 6 представлено распределение статической температуры газа в плоскости расположения сопел ГГ, иллюстрирующее постепенное охлаждение струи продуктов сгорания в результате смешивания с холодным окружающим воздухом. Причем в соответствии с основными балансовыми уравнениями газовой динамики расчетом

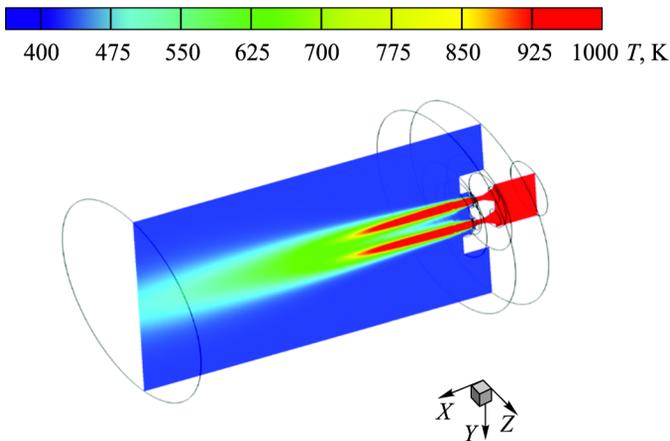


Рис. 6. Распределение статической температуры газа в плоскости расположения сопел ГГ

получена тонкая структура температурного поля, характеризующаяся локальным повышением статической температуры в зонах торможения в прямых скачках за срезом сопел. Заметим, что в данном расчете не учитывалось догорание продуктов газогенерации, имеющих отрицательный кислородный баланс, в кислороде окружающего воздуха.

Визуализация и оптико-электронная дешифровка видеоизображений. Рассмотрим результаты цифровой обработки видеоизображений испытаний модельного ГГ, полученные с использованием скоростной цифровой видеокамеры «Видео Спринт», и результаты пирометрической диагностики, которая выполнена в соответствии с методикой, изложенной в работе [9]. В основу методики положена яркостная пирометрия — изменение интенсивности излучения нагретого тела при увеличении (уменьшении) его температуры. Сущность методики заключается в измерении на фиксированной длине волны λ_{max} интенсивности излучения объекта, которая пропорциональна яркости и зависит от абсолютной температуры излучающего тела. Регистрация монохроматической яркости осуществляется с помощью интерференционного светофильтра, выделяющего из видимого спектрального диапазона узкий участок длин волн. В работе использован светофильтр с максимумом пропускания в области 552,5 нм.

Были заданы следующие параметры видеосъемки:

- частота 500 кадр/с;
- экспозиция кадра 2 мкс;
- разрешение 1280 × 500 пикселей.

На рис. 7, 8 приведены видеоизображения (в режиме наложения псевдоцветового изображения на полутоновое) процесса истечения продуктов сгорания из двухсоплового блока модельного ГГ с вкладышами минимального сечения диаметром 5,5 и 8,5 мм соответственно.

Анализ поля температур позволяет заключить следующее.

1. Скоростная съемка выявила ярко выраженную турбулентную структуру факела, наличие на его периферии вихревых структур, генерируемых в результате взаимодействия истекающей струи с окружающим воздухом.

2. Химические реакции, обусловленные догоранием продуктов газогенерации в воздухе, приводят к повышению температуры за срезом сопла. Так, на серии видеок кадров (см. рис. 7) наибольшее значение радиационной температуры $\sim 2\ 300$ К наблюдается на некотором расстоянии за соплами ГГ. После выхода на режим наибольшее значение температуры увеличивается и составляет $\sim 2\ 500$ К. Причем области с наибольшими температурами локализованы и имеют осевую протяженность 40...80 мм.

3. Струи, истекающие из верхнего и нижнего сопел, смыкаются на расстоянии $\sim 100...120$ мм от плоскости их выходных отверстий, и ниже по потоку газодинамическая картина соответствует истечению из односоплового блока.

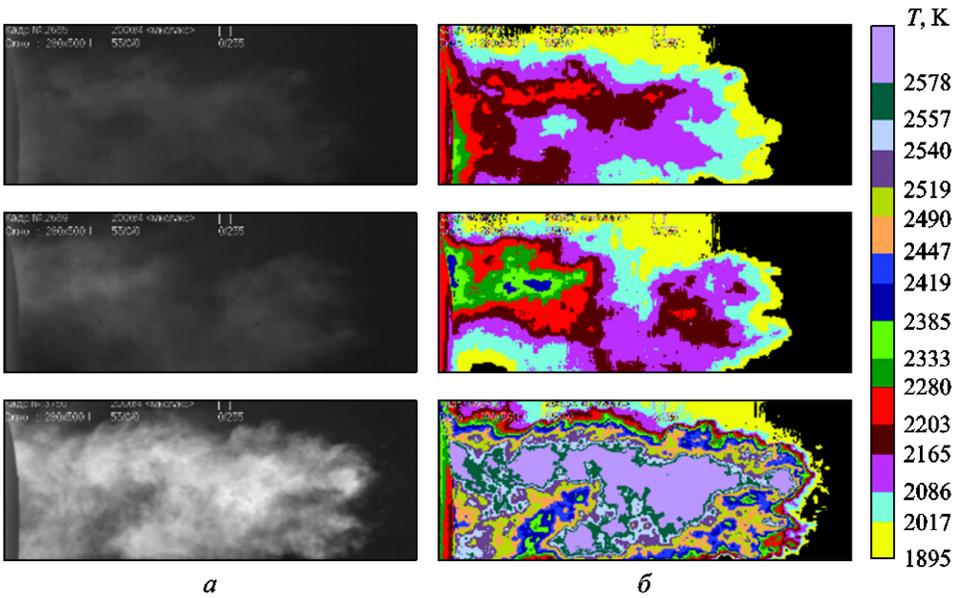


Рис. 7. Результаты анализа изображений истечения продуктов сгорания из сопел с диаметром минимального сечения 5,5 мм (расчетный режим):
a — исходное полутоновое изображение; *б* — псевдоцветовое изображение

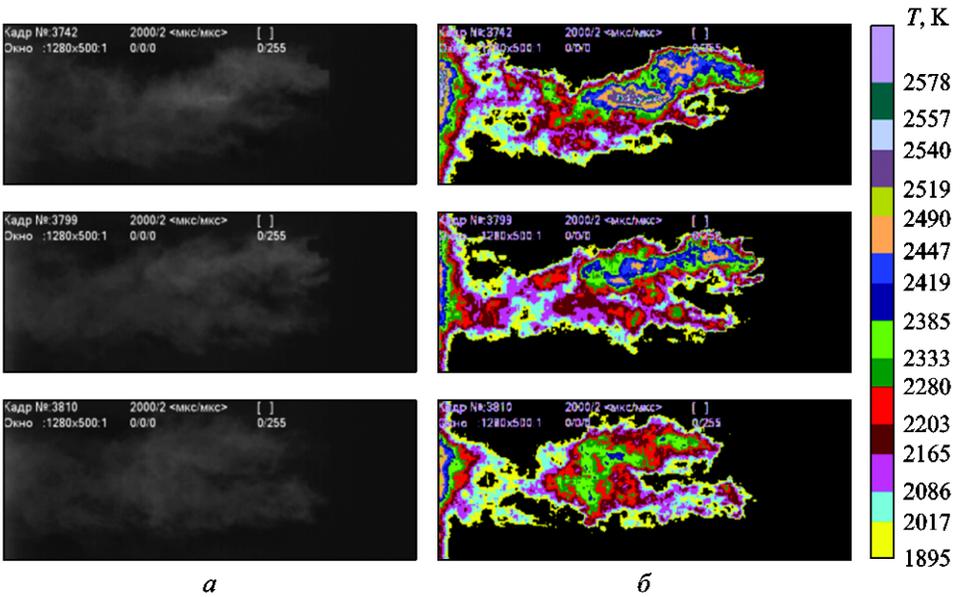


Рис. 8. Результаты анализа изображений истечения продуктов сгорания из сопел с диаметром минимального сечения 8,5 мм (расчетный режим):
a — исходное полутоновое изображение; *б* — псевдоцветовое изображение

На основании результатов первой видеосъемки с целью снизить влияние фоновой засветки с помощью программы задания режимов видеосъемки время экспозиции каждого кадра увеличено с 2 до 4 мкс. В результате увеличилась засветка ПЗС-матрицы скоростной видеокамеры и изображение стало ярче. Заметим, что градуировка оптического канала проводилась при новых (измененных) режимах видеосъемки.

Вывод. Разработанная методика моделирования истечения продуктов сгорания может быть использована при выборе схем дискретного регулирования ГГ с многосопловым блоком. Сравнение результатов видеосъемки, приведенных на рис. 7, 8, с расчетными данными свидетельствует об удовлетворительном согласовании скоростных и температурных полей.

Работа выполнена при поддержке гранта Ведущей научной школы России (проект НШ-9774.2016.8).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Жуков Б.П., ред. *Энергетические конденсированные системы. Краткий энциклопедический словарь.* Москва, Янус-К, 2000, 596 с.
- [2] Добровольский М.В. *Жидкостные ракетные двигатели.* Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016, 461 с.
- [3] Власов Ю.Н. Использование модифицированного рабочего тела двигательных установок для создания эффективных устройств пожаротушения. *Инженерный вестник.* 2012, № 9. DOI:77-48211/465812.
- [4] Сорокин В.А., ред. *Конструкция и проектирование комбинированных ракетных двигателей на твердом топливе.* Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014, 304 с.
- [5] Фрик П.Г. *Турбулентность: подходы и модели.* Москва, РХД, 2010, 107 с.
- [6] Соколов Б.И., Черенков А.С., Саломыков А.И. *Термодинамические и теплофизические свойства твердых ракетных топлив и их продуктов сгорания.* Москва, Изд-во Мин-ва обороны СССР, 1977, 320 с.
- [7] Воронцов А.В. Метод сравнительной оценки эффективности горения мелкодисперсного конденсированного горючего в камерах РПД произвольной геометрии. *Наука и образование,* 2016, № 1. DOI: 10.7463/0116.0830993
- [8] Ягодников Д.А., Лапицкий В.И., Сухов А.В., Томак В.И. Результаты морфологического, химического и дисперсного анализа конденсированных продуктов сгорания пиротехнических составов. *Инженерный вестник,* 2014, № 11. URL: <http://engbul.bmstu.ru/doc/743675.html> (дата обращения 21.08.2016).
- [9] Ягодников Д.А., Хомяков И.И., Бурков А.С., Артюхова О.А. Визуализация и анализ изображений процесса истечения продуктов сгорания пиротехнического состава из модельного газогенератора. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение,* 2014, № 3, с. 101–109. URL: <http://vestnikmach.ru/catalog/powgen/hidden/488.html> (дата обращения 16.08.2016).

Статья поступила в редакцию 01.09.2016

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Ягодников Д.А., Арефьев К.Ю., Сухов А.В., Хомяков И.И., Ирьянов Н.Я. Экспериментально-теоретическое исследование истечения продуктов сгорания из двухсopлового газогенератора. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2016, вып. 10. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2016-10-1544>

Ягодников Дмитрий Алексеевич родился в 1961 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1984 г. Д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 220 научных работ в области экспериментально-теоретических исследований рабочих процессов и разработки бесконтактных методов диагностики ракетных и реактивных двигателей. e-mail: daj@bmstu.ru

Арефьев Константин Юрьевич родился в 1988 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2011 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 70 работ в области моделирования рабочего процесса в энергетических и силовых установках перспективных образцов авиационно-космической техники. e-mail: arefyev@rambler.ru

Сухов Алексей Васильевич родился в 1937 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1961 г. Д-р техн. наук, профессор кафедры «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 100 научных работ в области горения металлсодержащих энергетических конденсированных систем и методологии диагностики рабочих процессов в ракетных и реактивных двигателях. e-mail: samurajack85@rambler.ru

Хомяков Илья Игоревич родился в 1984 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2007 г. Научный сотрудник НИИ энергетического машиностроения МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 10 научных работ в области экспериментально-теоретических исследований рабочих процессов в ракетно-прямоточных двигателях. e-mail: homyakovii@mail.ru

Ирьянов Николай Яковлевич родился в 1938 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1961 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 40 научных работ в области двухфазных течений в газовом тракте ракетных двигателей и методологии отработки ракетных двигателей. e-mail: kafedra-el@yandex.ru

Experimental and theoretical study of combustor discharge from the double-nozzled gas generator

© D.A. Yagodnikov, K.Yu. Arefev, A.V. Sukhov,
I.I. Khomyakov, N.Ya. Iryanov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The article considers the computational and experimental study results of condensed system combustor discharge from the double-nozzled gas generator, as well as mixing process of combustion products. Calculations are based on mathematical modeling of gas-dynamic flow in a three-dimensional way for viscous heat-conducting gas with condensed phase particles. The article analyses gas generator model experimental studies with the charge of energy condensed system of end burning. We used imaging techniques and luminance pyrometry while diagnosing combustor discharge from the gas generator nozzles. The study reveals the regularities of changes in discharged combustion products flow structure, and the gas-jets interaction processes at different pressures and at different diameters of nozzle critical sections in the gas generator.

Keywords: gas generator, energy condensed systems, combustor discharge, mathematical modeling, experimentation, visualization.

REFERENCES

- [1] Zhukov B.P., ed. *Energeticheskie kondensirovannye sistemy. Kratkiy ehntsiklopedicheskiy slovar* [Energy condensed systems. Concise encyclopedic dictionary]. Moscow, Yanus-K Publ., 2000, 596 p.
- [2] Dobrovolskiy M.V. *Zhidkostnye raketnye dvigateli* [Liquid motors], Moscow, BMSTU Publ., 2016, 461 p.
- [3] Vlasov Yu.N. *Inzhenerny vestnik — Engineering Bulletin*, 2012, no. 9. DOI: 77-48211/465812
- [4] Sorokin V.A., ed. *Konstruktsiya i proektirovanie kombinirovannykh raketnykh dvigateley na tverdom toplive* [The construction and design of combined rocket engine on solid fuel]. Moscow, BMSTU Publ., 2014, 304 p.
- [5] Frik P.G. *Turbulentnost: podkhody i modeli* [Turbulence: approaches and models]. Moscow, RHD Publ., 2010, 107 p.
- [6] Sokolov B.I., Cherenkov A.S., Salomykov A.I. *Termodinamicheskie i teplofizicheskie svoystva tverdykh raketnykh toplivnykh produktov sgoraniya* [Thermodynamic and transport properties of solid rocket fuels and their combustion products]. Moscow, Voenizdat Publ., 1977, 320 p.
- [7] Voronetskiy A.V. *Nauka i obrazovanie — Science and Education*, 2016, no. 1. DOI: 10.7463/0116.0830993
- [8] Yagodnikov D.A., Lapitskiy V.I., Sukhov A.V., Tomak V.I. *Inzhenerny Vestnik — Engineering Bulletin*, 2014, no. 11. Available at: <http://engbul.bmstu.ru/doc/743675.html> (accessed August 21, 2016).
- [9] Yagodnikov D.A., Khomyakov I.I., Burkov A.S., Artyukhova O.A. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Seria Mashinostroenie — Herald of Bauman Moscow State Technical University, Series: Mechanical Engineering*, 2014, no. 3, pp. 101–109. Available at: <http://vestnikmach.ru/catalog/powgen/hidden/488.html> (accessed August 16, 2016).

Yagodnikov D.A. (b. 1961) graduated from Bauman Moscow Higher Technical School in 1984. Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Rocket Engines, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 220 publications in the field of experimental and theoretical studies of working processes and the development of non-contact methods of rocket and jet engines diagnostics. e-mail: daj@bmstu.ru

Arefev K.Yu. (b. 1988) graduated from Bauman Moscow State Technical University in 1984. Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Professor of the Department of Rocket Engines, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 70 publications in the field of modeling workflow in the energy and power plants advanced models of aerospace engineering. e-mail: arefyev@rambler.ru

Sukhov A.V. (b. 1937) graduated from Bauman Moscow Higher Technical School in 1961. Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Rocket Engines, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 100 publications in the field of combustion of metal-containing energy condensed systems and diagnostics methodology of workflow in rocket and jet engines.

Khomyakov I.I. (b. 1984) graduated from Bauman Moscow State Technical University in 2007. Research Scientist of BMSTU Power Engineering Research Institute. Author of 10 scientific publications in the field of theoretical research working processes in rocket and ramjet engines. e-mail: homyakovii@mail.ru

Iryanov N.Ya. (b. 1938) graduated from Bauman Moscow Higher Technical School in 1961. Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Professor of the Department of Rocket Engines, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 40 scientific publications in the field of two-phase flow in the rocket engines gas path and rocket engines mining methodology. e-mail: kafedra-e1@yandex.ru