

# Технология и технологические машины

УДК 532.5:536.461:537.5

DOI 10.18698/0536-1044-2017-4-21-26

## Экспериментальное исследование электрофизических характеристик газовых потоков при стендовых испытаниях элементов проточного тракта ПВРД

А.В. Рудинский<sup>1,2</sup>, В.Ю. Александров<sup>1</sup>, Д.А. Ягодников<sup>2</sup><sup>1</sup> ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова», 111116, Москва, Российская Федерация, Авиамоторная ул., д. 2<sup>2</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

## An Experimental Study of Electrophysical Characteristics of Gas Flow when Bench Testing Elements of Flow Ducts in Ramjets

A.V. Rudinskiy<sup>1,2</sup>, V.Y. Aleksandrov<sup>1</sup>, D.A. Yagodnikov<sup>2</sup><sup>1</sup> Federal State Unitary Enterprise Baranov Central Institute of Aviation Motors CIAM, 111116, Moscow, Russian Federation, Aviamotornaya St., Bldg. 2<sup>2</sup> BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1

e-mail: alex\_rudinskiy@mail.ru, aleksandrov@rtc.ciam.ru, daj@bmstu.ru



Приведены результаты экспериментального исследования собственного электромагнитного поля сверхзвуковой струи продуктов сгорания прямооточного воздушно-реактивного двигателя, работающего на углеводородном горючем. Выявлено увеличение амплитуды сигнала магнитометра газового потока при горении такого топлива. Проведена оценка относительной напряженности индуцированного собственного магнитного поля высокотемпературных продуктов сгорания, зарегистрированной магнитным датчиком в области критического сечения камеры сгорания прямооточного воздушно-реактивного двигателя. При горении топлива экспериментально установлено увеличение амплитуды сигнала магнитометра, что можно использовать как диагностический признак при мониторинге технического состояния двигателя в процессе огневых стендовых испытаний.

**Ключевые слова:** прямооточный воздушно-реактивный двигатель, огневые испытания, электрофизическая диагностика, магнитометр газового потока, напряженность магнитного поля.



This paper presents the results of an experimental study of the natural electromagnetic field of a supersonic jet of products of combustion in a ramjet engine operating on hydrocarbon fuel. An increase in the amplitude of the magnetometer signal of the gas flow when such fuels are burned is registered. The relative strength of the induced magnetic field of high-temperature products of combustion, registered by a magnetic sensor in the critical section

of the ramjet combustion chamber is assessed. An increase in the amplitude of the magnetometer signal is experimentally determined on fuel combustion modes, which can be used as a diagnostic indication for monitoring the technical condition of the engine in the process of bench firing tests.

**Keywords:** ramjet engine, fire tests, electrophysical diagnostics, gas flow magnetometer, magnetic field strength.

Разработка систем диагностики рабочего процесса реактивного двигателя включает в себя решение ряда задач по обеспечению заданной надежности, быстродействию и устойчивости к внешним помехам [1–3]. Предпочтение получают бесконтактные системы, которые не вносят изменения в рабочий процесс двигательной установки и позволяют его контролировать по косвенным параметрам газового потока [4, 5]. Однако эти параметры должны находиться в однозначной зависимости от термодинамических свойств потока.

В работе [6] описана возможность определения температуры высокоэнтальпийного потока продуктов сгорания прамоточного воздушно-реактивного двигателя (ПВРД) путем нахождения его электрической проводимости. Установленная в ходе экспериментально-теоретических исследований зависимость температуры продуктов сгорания углеводородного горючего (УВГ) от электропроводности позволила определить этот параметр с достаточной точностью. В качестве первичного измерительного преобразователя (ПИП) в такой системе использовался зонд-уловитель заряженных частиц, образующихся в результате экзотермических реакций в камере сгорания (КС) реактивного двигателя. Существенными недостатками этого метода диагностики являются ограниченность применения по температуре (1 600 °С) и зависимость частотного диапазона принимающего сигнала от конструкции зонда, который вводится в поток, внося в него возмущения.

Применение ПИП магнитного и электрического полей позволяет расширить частотные диапазоны опроса системы диагностики двига-

теля, а также отслеживать малейшие колебания параметров потока (пульсаций давления, температуры, расхода компонентов) и определять наличие частиц металлов (применимо в качестве ранней диагностики аварийного разгара элементов проточного тракта), не внося возмущений в истекающий из сопла двигателя поток. Отсутствие прямого воздействия высокотемпературных продуктов сгорания на элементы приема сигнала (ПИП магнитного и электрического полей) повышает надежность такой системы. Отметим, что применительно к жидкостным ракетным двигателям в работах [7–10] показаны принципиальные возможности диагностики, основанные на регистрации параметров электромагнитного поля.

Цель работы — экспериментально-теоретическое определение параметров собственного электромагнитного поля сверхзвуковой струи продуктов сгорания УВГ, истекающего из сопла ПВРД.

#### Описание экспериментальной установки.

Экспериментальное исследование проводилось на модельной КС ПВРД. Квасивоздушный поток поступал из огневого подогревателя 1 (рис. 1) в модельную КС 3, где в основной поток через ряд инжекторов впрыскивалось УВГ.

Высокотемпературный поток истекал в окружающую среду через сопловой насадок, где был установлен датчик магнитного поля (магнитометр 4), представляющий собой цилиндрическую катушку индуктивностью  $L_m = 19,9$  мкГн и активным сопротивлением  $R_m = 18,2$  Ом (рис. 2).

Подача УВГ осуществлялась через 35...40 с после пуска огневого подогревателя воздуха,

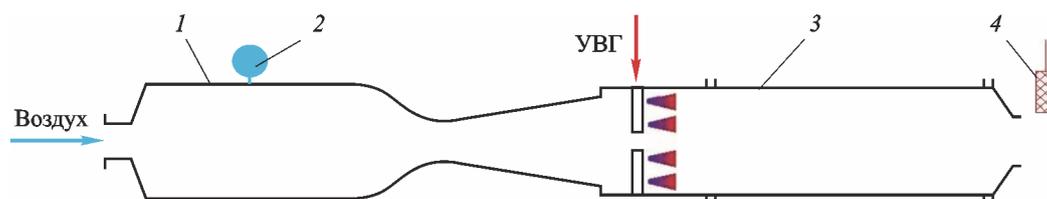


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 — огневой подогреватель; 2 — датчик давления; 3 — модельная КС; 4 — магнитометр газового потока

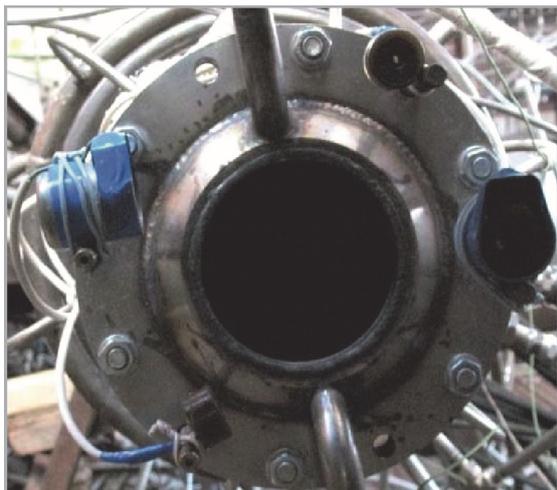


Рис. 2. Расположение магнитометра газового потока на выходе из модельной КС ПВРД

затем подавалась команда на останов. При этом запись параметров с магнитометра велась постоянно. Полученные в процессе огневых испытаний сигналы с ПИП давления и магнитометра представлены на рис. 3.

Из приведенных реализаций выделяется полезный сигнал, регистрируемый магнитометром в виде увеличения амплитуды примерно в 3 раза

при горении УВГ. Этот факт можно объяснить тем, что вектор магнитной индукции собственного поля газового потока, расположенный по концентрическим окружностям соосно направлению скорости потока, проходит сквозь контур катушки. Индуцированное магнитное поле  $H_i$  возникает с напряженностью электрического поля  $E$ , которое в свою очередь определяется как суперпозиция поля  $E_i$ , обусловленного выносимым струей потока объемным зарядом  $Q$  и вихревым полем  $E_v$  [11].

**Обработка результатов эксперимента.** Динамический процесс генерации электрического напряжения в магнитометре газового потока под действием внешнего переменного магнитного поля напряженностью  $H_i$  описывается выражением [12]

$$U_{\text{м.г.п}} = -\mu_0 \mu_r S_k \frac{dH_i(\tau)}{d\tau}, \quad (1)$$

где  $\mu_0$  — магнитная постоянная;  $\mu_r$  — относительная магнитная проницаемость газового потока;  $S_k$  — эффективная площадь катушки.

Интегрируя уравнение (1) по времени пуска, получим зависимость напряженности соб-

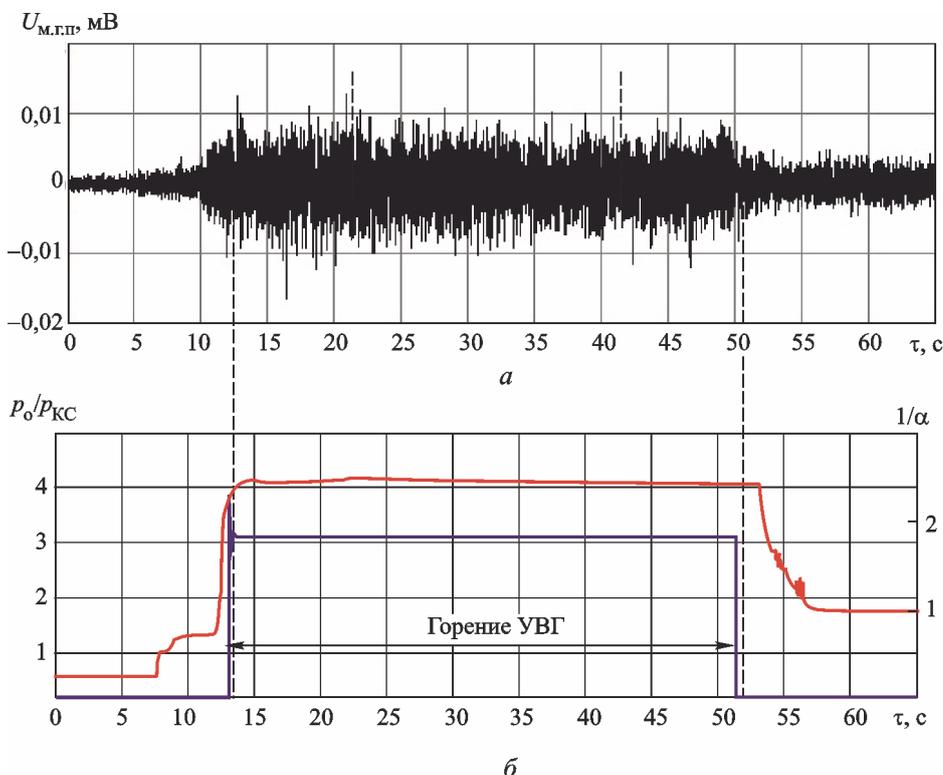


Рис. 3. Осциллограммы генерируемого катушкой магнитометра напряжения (а), отношения давления в огневом подогревателе воздуха к давлению в модельной КС ПВРД и коэффициента избытка воздуха (б): —  $p_0/p_{\text{КС}} = f(\tau)$ ; —  $1/\alpha = f(\tau)$

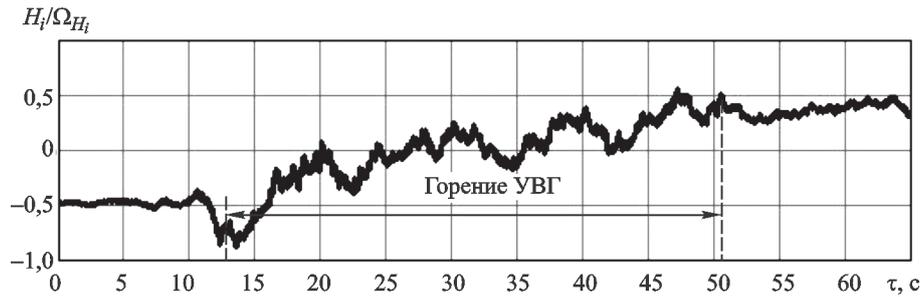


Рис. 4. Зависимость относительной напряженности  $H_i/\Omega_{H_i}$  магнитного поля от времени  $\tau$

ственного магнитного поля газового потока, регистрируемого датчиком

$$H_i(\tau) = -\frac{1}{\mu_0 \mu_r S_k} \int_0^{\tau} U_{\text{м.г.п.}} d\tau. \quad (2)$$

Генерируемое находящимися в струе заряженными частицами электромагнитное поле описывается известными уравнениями Максвелла. Приняв допущение, что в струе газового потока доминирующими являются заряженные частицы одного знака, например положительно заряженные ионы, амплитуду напряженности магнитного поля можно оценить по соотношению

$$\Omega_{H_i} \sim \frac{q_e N^+ W F_{\text{кр}}}{2\pi r_{\text{м.г.п}}}, \quad (3)$$

где  $q_e$  — элементарный заряд;  $N^+$  — концентрация заряженных частиц;  $W$  — скорость звука;  $F_{\text{кр}}$  — площадь критического сечения;  $r_{\text{м.г.п}}$  — расстояние от оси магнитометра до газового потока.

Известно, что концентрация заряженных частиц  $N^+$ , как и скорость звука, является

функцией давления и температуры газового потока, что позволяет сделать вывод о зависимости амплитуды  $\Omega_{H_i}$  от газодинамических параметров.

На рис. 4 представлено изменение во времени отношения напряженности индуцированного магнитного поля  $H_i$  (формула (2)) к амплитуде  $\Omega_{H_i}$ , оцененной по выражению (3), применительно к условиям эксперимента.

## Выводы

1. Полученные экспериментальные данные амплитуды были связаны с параметрами рабочего процесса — давлением и температурой.

2. Результаты исследований могут быть использованы при проектировании высокочувствительных ПИП, например, для установки корреляционных зависимостей между турбулентными пульсациями температуры и давления, а также для дальнейшего развития бесконтактных методов электрофизической диагностики рабочего процесса ПВРД в целом.

## Литература

- [1] Головин Ю.М. Перспективы развития систем диагностики и аварийной защиты ЖРД. *Фундаментальные и прикладные проблемы космонавтики*, 2002, № 9, с. 34–38.
- [2] Гафуров Р.А., Соловьев В.В. *Диагностика внутрикамерных процессов в энергетических установках*. Москва, Машиностроение, 1991. 271 с.
- [3] Жежеря А.П., Суворова Т.Г. Основные направления развития бортовых средств аварийной защиты ЖРДУ. Расчет, проектирование, конструирование и испытания космических систем. *Ракетно-космическая техника*, 2000, сер. XXII, вып. 1–1, с. 238–247.
- [4] Couch R.P. Detecting Abnormal Turbine Engine Deterioration Using Electrostatic Methods. *Journal of Aircraft*, 1978, vol. 15, no. 10, pp. 692–695.
- [5] Ватажин А.Б., Голенцов Д.А., Гулин А.Г., Лихтер В.А., Вавиловская С.Л. Электростатическая диагностика состояния элементов двигательных аппаратов и энергетических устройств. *Мир измерений*, 2012, № 5, с. 52–58.
- [6] Кучинский, В.В., Никитенко А.Б. Аналитические методы оценки параметров плазмы продуктов сгорания и определение температуры по результатам измерений проводимости плазмы. *Журнал технической физики*, 2010, т. 80, № 8, с. 13–21.
- [7] Ковалёв В.И., Кузнецов С.В., Курина В.В., Пушкин Н.М., Ушков А.Н., Черных В.И. Системы контроля и бесконтактной диагностики рабочих процессов при проведении

- огневых испытаний ЖРД. *Тр. НПО «Энергомаш»*, Москва, НПО Энергомаш им. академика В.П. Глушко, 2012, № 29, с. 328–341.
- [8] Пушкин Н.М., Бацев С.В., Иванов Т.В. Магнитное поле ионизированного газового потока как диагностический параметр при испытаниях и эксплуатации ЖРД. *Информационно-технологический вестник*, 2015, т. 5, № 3, с. 124–132.
- [9] Ковалёв В.И., Кузнецов С.В., Курина В.В., Пушкин Н.М., Ушков А.Н., Черных В.И. Системы контроля и бесконтактной диагностики рабочих процессов при проведении огневых испытаний ЖРД. *Тр. НПО «Энергомаш»*, Москва, НПО Энергомаш им. академика В.П. Глушко, 2007, № 25, с. 373–394.
- [10] Ягодников Д.А., Рудинский А.В. Моделирование неравномерного течения и параметров электромагнитного поля в камере жидкостного ракетного двигателя при наличии пристеночного слоя. *Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2015, № 4, с. 141–154. URL: <http://www.technomag.edu.ru/issue/763210.html> (дата обращения 25 декабря 2016).
- [11] Ватажин А.Б. Частотные характеристики отрицательного коронного разряда в турбулентной струе. *Механика жидкости и газа*, 2001, № 4(3), с. 677–679.
- [12] Рудинский А.В., Ягодников Д.А. Экспериментально-теоретическое определение параметров быстрого действия системы аварийной защиты жидкостного ракетного двигателя по электромагнитным свойствам продуктов. *Теория и практика современного ракетного двигателестроения. Тр. МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2013, № 607, с. 24–32.

## References

- [1] Golovin Iu.M. Perspektivy razvitiia sistem diagnostiki i avariinoi zashchity ZhRD [Prospects of development of system diagnostics and emergency protection of rocket engines]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy kosmonavтики* [Fundamental and applied problems of cosmonautics]. 2002, no. 9, pp. 34–38.
- [2] Gafurov R.A., Solov'ev V.V. *Diagnostika vnutrikamernykh protsessov v energeticheskikh ustanovkakh* [Diagnosis of intrachamber processes in power plants]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1991. 271 p.
- [3] Zhezheria A.P., Suvorova T.G. Osnovnye napravleniia razvitiia bortovykh sredstv avariinoi zashchity ZhRDU. Raschet, proektirovanie, konstruirovaniye i ispytaniia kosmicheskikh sistem [Main directions of development of the on-board equipment emergency protection liquid rocket engine. Calculation, design and testing of space systems]. *Raketno-kosmicheskaya tekhnika* [Aerospace technology]. 2000, ser. 22, is. 1–1, pp. 238–247.
- [4] Couch R.P. Detecting Abnormal Turbine Engine Deterioration Using Electrostatic Methods. *Journal of Aircraft*, 1978, vol. 15, no. 10, pp. 692–695.
- [5] Vatazhin A.B., Golentsov D.A., Gulin A.G., Likhter V.A., Vavirovskaya S.L. Elektrostaticheskaya diagnostika sostoiianiia elementov dvigatel'nykh apparatov i energeticheskikh ustroystv [Electrostatic Condition Diagnostics of Components of Aircraft Engines and Power Units]. *Mir izmerenii* [World of measurement]. 2012, no. 5, pp. 52–58.
- [6] Kuchinskii V.V., Nikitenko A.B. Analytical methods for estimating combustion product plasma parameters and determination of temperature by measuring the plasma conductivity. *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*, 2010, vol. 55, no. 8, pp. 1087–1096.
- [7] Kovalev V.I., Kuznetsov S.V., Kurina V.V., Pushkin N.M., Ushkov A.N., Chernykh V.I. Sistemy kontrolya i beskontaktnoi diagnostiki rabochikh protsessov pri provedenii ognevykh ispytaniy ZhRD [Systems of monitoring and contactless diagnostics of working processes at carrying out fire tests of LPRE]. *Trudy NPO «Energomash»* [Proceedings of JSC NPO «Energomash» named by academician V.P. Glushko]. Moscow, JSC NPO Energomash named by academician V.P. Glushko publ., 2012, no. 29, pp. 328–341.
- [8] Pushkin N.M., Batsev S.V., Ivanov T.V. Magnitnoye pole ionizirovannogo gazovogo potoka kak diagnosticheskii parametр pri ispytaniyakh i ekspluatatsii ZhRD [Magnetic field of the ionized gas stream as diagnostic parameter at tests and operation of LJE]. *Informatsionno-tekhnologicheskii vestnik* [Information technology bulletin]. 2015, vol. 5, no. 3, pp. 124–132.
- [9] Kovalev V.I., Kuznetsov S.V., Kurina V.V., Pushkin N.M., Ushkov A.N., Chernykh V.I. Sistemy kontrolya i beskontaktnoi diagnostiki rabochikh protsessov pri provedenii ognevykh

- ispytanii ZhRD [Systems of monitoring and contactless diagnostics of working processes at carrying out fire tests of LPRE]. *Trudy NPO «Energomash»* [Proceedings of JSC NPO Energomash named by academician V.P. Glushko]. Moscow, JSC NPO Energomash named by academician V.P. Glushko publ., 2007, no. 25, pp. 373–394.
- [10] Yagodnikov D.A., Rudinskii A.V. Modelirovanie neravnomernogo techeniia i parametrov elektromagnitnogo polia v kamere zhidkostnogo raketnogo dvigatel'ia pri nalichii pristenoch'nogo sloia [Modeling of Uneven Flow and Electromagnetic Field Parameters in the Combustion Chamber of Liquid Rocket Engine with a Near-wall Layer Available]. *Nauka i obrazovanie. MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education of Bauman MSTU]. 2015, no. 4, pp. 141–154. Available at: <http://www.technomag.edu.ru/issue/763210.html> (accessed 25 December 2016).
- [11] Vatazhin A.B. Chastotnye kharakteristiki otritsatel'nogo koronnogo razriada v turbulentnoi strue [Frequency characteristics of negative corona discharge in a turbulent jet]. *Mekhanika zhidkosti i gaza* [Fluid mechanics]. 2001, no. 4(3), pp. 677–679.
- [12] Rudinskii A.V., Yagodnikov D.A. Eksperimental'no-teoreticheskoe opredelenie parametrov bystrodeistviia sistemy avariinoi zashchity zhid-kostnogo raketnogo dvigatel'ia po elektromagnitnym svoistvam produktov [Experimental and theoretical determination of the parameters of the performance of protection systems of liquid-propellant rocket engine according to the electromagnetic properties of the products]. *Teoriia i praktika sovremennogo raketnogo dvigatelestroeniia. Tr. MGTU im. N.E. Baumana* [Theory and practice of modern rocket propulsion. Trudy MGTU im. N. Uh. Bauman]. 2013, no. 607, pp. 24–32.

Статья поступила в редакцию 23.01.2017

## Информация об авторах

**РУДИНСКИЙ Александр Викторович** (Москва) — кандидат технических наук, инженер отдела НИИ ЭМ 1.1. МГТУ им. Н.Э. Баумана; научный сотрудник отдела «Аэрокосмические двигатели». ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова» (111116, Москва, Российская Федерация, Авиамоторная ул., д. 2, e-mail: alex\_rudinskiy@mail.ru).

**АЛЕКСАНДРОВ Вадим Юрьевич** (Москва) — кандидат технических наук, зам. начальника отдела «Аэрокосмические двигатели». ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова» (111116, Москва, Российская Федерация, Авиамоторная ул., д. 2, e-mail: aleksandrov@rtc.ciam.ru).

**ЯГОДНИКОВ Дмитрий Алексеевич** (Москва) — доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Ракетные двигатели». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: daj@bmstu.ru).

## Information about the authors

**RUDINSKIY Aleksandr Viktorovich** (Moscow) — Candidate of Science (Eng.), Engineer of the Research Institute of Power Engineering 1.1. Bauman Moscow State Technical University; Researcher, Aerospace Engine Department. Federal State Unitary Enterprise Baranov Central Institute of Aviation Motors CIAM (111116, Moscow, Russian Federation, Aviamotornaya St., Bldg. 2, e-mail: alex\_rudinskiy@mail.ru).

**ALEKSANDROV Vadim Yurievich** (Moscow) — Candidate of Science (Eng.), Deputy Head, Aerospace Engine Department. Federal State Unitary Enterprise Baranov Central Institute of Aviation Motors CIAM (111116, Moscow, Russian Federation, Aviamotornaya St., Bldg. 2, e-mail: aleksandrov@rtc.ciam.ru).

**YAGODNIKOV Dmitriy Alekseevich** (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Head of Rocket Engine Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: daj@bmstu.ru).