



**АРЕФЬЕВ**  
Константин Юрьевич  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

**AREFYEV**  
Konstantin Yurievich  
(Moscow, Russian Federation,  
Bauman Moscow State  
Technical University)

## Исследование методов интенсификации процесса разложения оксида азота в малогабаритных газогенераторах с резонансной газодинамической системой инициирования рабочего процесса<sup>1</sup>

**К.Ю. Арефьев**

*Малогабаритные газогенераторы применяются для создания высокоэнтальпийного потока и могут быть использованы в энергосиловых установках авиационно-космической техники. Перспективным унитарным топливом для малогабаритных газогенераторов является оксид азота ( $N_2O$ ). Однако применение унитарного топлива требует решения задачи интенсификации процесса его разложения. Проанализированы методы повышения степени разложения  $N_2O$  в резонансных газодинамических системах инициирования рабочего процесса применительно к малогабаритным газогенераторам. Представлена математическая модель, результаты исследования газодинамической картины течения с учетом химических реакций, а также приведен сравнительный анализ методов интенсификации разложения унитарного топлива. Исследования показали, что выполнение торцевой поверхности резонатора из каталитического материала является наиболее эффективным средством снижения времени выхода малогабаритных газовых генераторов на рабочий режим; установка предкамерного каталитического блока позволяет дополнительно ускорить выход на рабочий режим и существенно увеличить полноту разложения  $N_2O$  в камере. Рассмотренные методы, основанные на применении каталитических блоков, позволяют повысить эффективность разложения  $N_2O$  в резонансной газодинамической системе и могут быть применены в малогабаритных газогенераторах различного назначения.*

**Ключевые слова:** газодинамическая система, ударная волна, унитарное топливо, математическое моделирование.

## Research of Methods Intensifying the Nitrous Oxide Decomposition in a Small-size Gas Generator with a Resonant Gasdynamic System for a Work-process Initiation

**K.Y. Arefyev**

*Small-size gas generators are used to create a high enthalpic flow and can be used in the power-plants of aerospace equipment. Nitrous oxide ( $N_2O$ ) is a*

<sup>1</sup> Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ в рамках гранта № 12-08-31114.

*promising monopropellant for a small-size gas generator. However, the use of a monopropellant requires the problem solution of its decomposition intensifying. The research is aimed at finding the ways to increase the degree of  $N_2O$  decomposition in the resonant gasdynamic systems initiating a work-process and that are applied to the small-size gas generators. The paper presents: a mathematical model; the research results of the gasdynamic flow picture with the account of chemical reactions; as well as a comparative analysis of methods for the monopropellant decomposition intensifying. The above methods are based on the use of catalyst units to increase the efficiency of  $N_2O$  decomposition in the resonant gasdynamic system and can be applied to the small-size gas generators of various applications.*

**Keywords:** gasdynamic system, shock wave, monopropellant, mathematical modeling.

В настоящее время малогабаритные газогенераторы (МГГ) нашли широкое применение в авиационно-космической отрасли [1]. Ряд решаемых с помощью МГГ задач требует использования унитарных топлив (УТ): гидразина, оксида азота, динитромида аммония, перекиси водорода и др.

Унитарные топлива способны разлагаться с выделением большого количества тепла. Инициирование разложения может быть обеспечено локальным превышением температурной границы деструкции вещества. Применение каталитических элементов позволяет существенно снизить значение температуры деструкции УТ.

В качестве перспективного УТ, благодаря своим уникальным свойствам [2], может использоваться оксид азота ( $N_2O$ ). Преимуществами  $N_2O$ , представляющими наибольший интерес, являются: выделение тепловой энергии в количестве 82 кДж/моль при разложении, упрощение системы подачи за счет эффекта самовытеснения собственными насыщенными парами с давлением более 4 МПа при 290 К, а также его нетоксичность.

Для инициирования рабочего процесса в МГГ применяются различные способы, в том числе термический, каталитический, электроискровой и др. Одним из наиболее перспективных является способ, основанный на использовании резонансной газодинамической системы (РГС). Проточный тракт РГС [3, 4] (рис. 1) состоит из

сверхзвукового сопла 1 и полуоткрытого резонатора 2 с конфузурным входом, установленных на одной оси внутри камеры МГГ. Основные геометрические параметры, влияющие на работу РГС, представлены на рис. 1.

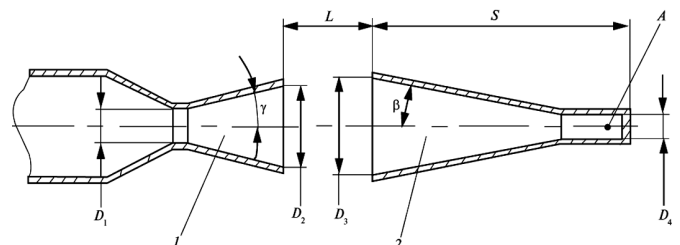


Рис. 1. Схема проточного тракта РГС:

1 — сопло; 2 — резонатор

Принцип действия РГС основан на подаче через сопло газообразного УТ. При определенном соотношении геометрических и режимных параметров РГС формируется неустойчивая структура газодинамического течения, состоящая из «бочки» и диска Маха [5, 6]. В случае, когда диск Маха локализуется в области входной кромки резонатора, возникают продольные автоколебания, поддерживаемые кинетической энергией подаваемого газа. При этом в застойной зоне резонатора осуществляется интенсивный нагрев газообразного УТ. Тепло выделяется за счет высокочастотного циклического процесса прохождения и отражения от торцевой стенки резонатора ударных волн (УВ). Высокий уровень температур в резонансной полости способствует термическому разложению УТ с выделением тепла и распространению данного процесса вверх по потоку с последующим запуском МГГ.

В статье представлены результаты расчетного исследования методов повышения эффективности работы МГГ с РГС за счет использования каталитических блоков. В частности рассмотрены следующие методы: выполнение торцевой поверхности резонатора из каталитического материала, установка предкамерного каталитического блока (рис. 2), а также повышение уровня температуры  $T_0$  оксида азота на входе за счет первоначального подогрева. Про-

веден сравнительный анализ трех вариантов РГС в диапазоне температур  $T_0 = 300...600$  К:

вариант № 1 — базовый, без каталитических блоков;

вариант № 2 — с выполнением торцевой поверхности резонатора РГС из каталитического материала;

вариант № 3 — с торцевой поверхностью резонатора РГС из каталитического материала и установкой каталитического блока.

Схематично расчетная область проточного тракта МГГ с РГС представлена на рис. 2. Для уменьшения затрат машинного времени расчетная область разбита на три участка: две газовых области и область внутри предкамерного каталитического блока из пористого материала. Основные геометрические параметры МГГ приведены на рис. 2.

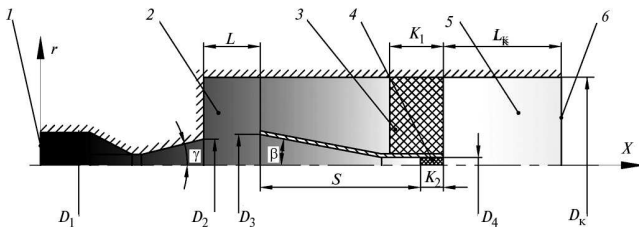


Рис. 2. Расчетная область МГГ с РГС:

- 1 — входной участок; 2 — газовая область № 1;
- 3 — торцевая стенка резонатора из каталитического материала; 4 — предкамерный каталитический блок;
- 5 — газовая область № 2; 6 — выходное сечение

Учитывая особенности течения, газовая область № 1 моделируется в двухмерной нестационарной постановке [7], остальные области — в одномерной нестационарной постановке.

Моделирование нестационарного течения в газовой области № 1 и процесса локального нагрева рабочего тела в резонаторе РГС проводилось путем интегрирования полной (осредненной по Фавру для турбулентных течений) системы уравнений Навье—Стокса [7, 8] для идеального вязкого газа с использованием модели турбулентности  $k-\varepsilon$  [9].

Для решения системы уравнений применен численный метод сквозного счета на основе схемы распада произвольного разрыва С.К. Годунова [10]. Интегрирование системы проводилось методом конечных объемов [11, 12]

в нестационарной постановке с шагом по времени 25 нс, в неявной форме, с параметром Курранта  $K = 1$ .

Осевая скорость газа в каталитическом блоке описывается уравнением

$$V = \frac{mRT}{\rho F_n \Pi},$$

где  $m$  — массовый расход газа;  $R$  — газовая постоянная;  $T, p$  — температура и давление газа;  $F_n$  — площадь проходного сечения в каталитическом блоке с учетом загромождения;  $\Pi$  — пористость материала каталитического блока.

Для расчета потерь давления на единицу длины каталитического блока  $\frac{dp}{dl}$  использовалась зависимость, учитывающая вязкостное и динамическое сопротивление [13]:

$$-\frac{dp}{dl} = \alpha \mu u_\phi + \beta \rho u^2,$$

где  $\alpha, \beta$  — вязкостный и инерционный коэффициенты сопротивления;  $\mu$  — динамический коэффициент вязкости;  $u_\phi = \frac{m}{\rho F_n}$  — скорость фильтрации.

Коэффициенты сопротивления определялись по эмпирическим зависимостям [13]:

$$\alpha = 1,25 \cdot 10^{10} \cdot \Pi^{-5,3};$$

$$\beta = 2 \cdot 10^4 \cdot \Pi^{-6}.$$

Принято, что газовая область № 2 изобарическая с давлением  $p_k$ . В этом случае осевая скорость определяется в соответствии с уравнением

$$V = 4 \frac{mRT}{\pi p_k D_k^2}.$$

Расчетное исследование процесса разложения оксида азота в РГС, каталитическом блоке и камере МГГ основано на численном моделировании изменения химического состава рабочего тела. Для этого использовалась кинетическая модель [14] протекания химических реакций.

Скорость химических реакций с участием  $N$  реагентов рассчитывается из уравнения

$$u = \frac{dA_i}{dt} = k_a \prod_{i=1}^N A_i^{n_i},$$

где  $A_i$  — концентрация  $i$ -го компонента;  $k_a$  — коэффициент скорости химической реакции;  $\sum_{i=1}^N n_i$  — порядок химической реакции,  $i = \overline{1, N}$ .

Коэффициент скорости  $k_a$  определяется в соответствии с уравнением Аррениуса:

$$k_a = A \left( \frac{T}{850 \text{ K}} \right)^\beta e^{\frac{-E_A}{RT}}.$$

Здесь  $A$  — предэкспоненциальный множитель;  $\beta$  — температурный показатель;  $E_A$  — энергия активации.

Константы скорости для каталитического (в случае применения платина-рутений-родиевого катализатора) и термического разложения  $N_2O$  соответствуют экспериментальным данным [15]. Моделирование скорости химических реакций в пористом каталитическом блоке  $k_{a \text{ п.к}}$  проведено с учетом режима течения в нем рабочего компонента [16].

В качестве граничных условий при моделировании задавались давление  $p_b$ , температура  $T_0$   $N_2O$  во входном участке  $1$ , а также давление  $p_k$  в выходном сечении  $b$  камеры МГГ. Для каждого участка внутри расчетной области проведено сопряжение граничных условий согласно методу Л.Г. Михайлова [17].

В работе исследованы особенности процесса разложения  $N_2O$  в диапазоне значений давления  $p_b = 0,2 \dots 2,5$  МПа,  $p_k = 0,1 \dots 2$  МПа, температуры на входе  $T_0 = 300 \dots 600$  К. Выбранное соотношение между диаметром и длиной камеры  $D_k/L_k = 4$  соответствует наиболее часто встречающемуся для существующих МГГ.

Численное решение уравнений газовой динамики показало, что при определенных условиях в резонаторе может возникать автоколебательный режим с пульсациями давления высокой интенсивности, сопровождаемый нагревом газа. При реализации автоколебательного режима период пульсаций давления в резонаторе составляет  $\tau = 0,25 \dots 0,5$  мс. Характер течения газа в различные фазы периода показан в работе [18].

Максимальные значения температуры в застойной зоне резонансной полости  $T_p$  соответствуют частоте пульсаций  $\nu = 3 \dots 4$  кГц. При этом значение температуры  $T_p$  в несколько раз превышает температуру деструкции подаваемого в сопло газообразного УТ ( $N_2O$ ), что подтверждает возможность использования РГС в качестве инициатора рабочего процесса в МГГ.

Получены динамические характеристики процесса разложения  $N_2O$  в РГС и камере МГГ для различных вариантов интенсификации. Зависимость степени разложения оксида азота  $\varphi = 1 - A_{N_2O}$  в выходном сечении камеры МГГ от времени (с момента подачи  $N_2O$  в сопло РГС) для  $T_0 = 300$  К представлена на рис. 3.

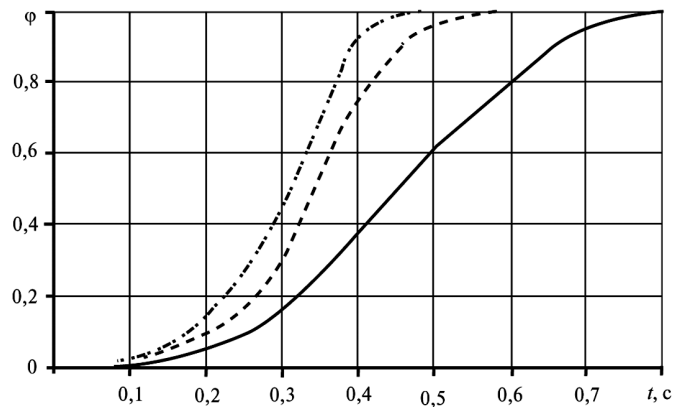


Рис. 3. Зависимость степени разложения  $N_2O$  в выходном сечении МГГ от времени для  $T_0 = 300$  К:

— — вариант № 1; - - - - вариант № 2;  
- · - · - вариант № 3

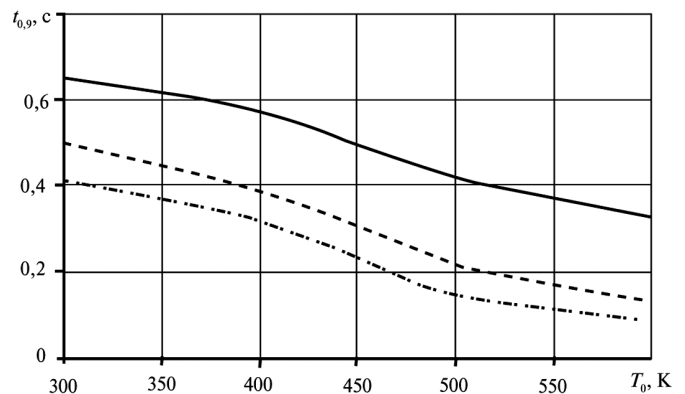


Рис. 4. Зависимость времени запуска МГГ от температуры  $N_2O$  на входе:

— — вариант № 1; - - - - вариант № 2;  
- · - · - вариант № 3

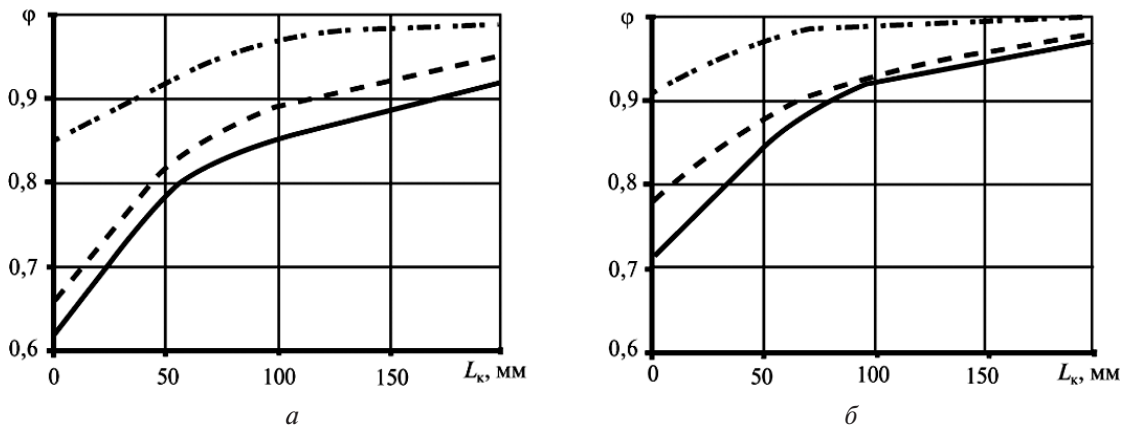


Рис. 5. Зависимость  $\phi$  от  $L_k$  для  $T_0 = 300$  К (а) и  $T_0 = 600$  К (б):

— — вариант № 1; - - - вариант № 2; - · - · - вариант № 3

Показателем эффективности работы РГС в качестве устройства запуска МГГ является время выхода на рабочий режим, которое определяется интервалом времени  $t_{0,9}$ , отсчитываемым с момента подачи  $N_2O$  до момента, когда степень разложения в выходном сечении МГГ достигнет значения  $\phi = 0,9$ .

Зависимости  $t_{0,9}$  от температуры  $T_0$  для различных вариантов РГС представлены на рис. 4. Как видно на рисунке, РГС, выполненная в соответствии с вариантом № 3, позволяет снизить  $t_{0,9}$  более чем на 35% (относительно базового варианта № 1). Повышение  $T_0$  положительно сказывается на динамике запуска МГГ. В частности, для варианта РГС № 3 увеличение значения  $T_0$  с 300 до 600 К позволяет снизить  $t_{0,9}$  в 4 раза (с 0,4 с до 0,1 с).

Установлено, что при стационарной работе МГГ применение каталитических элементов позволяет повысить  $\phi$  на 10...20% относительно базового варианта № 1. Зависимость  $\phi$  от  $L_k$  МГГ для различных уровней  $T_0$  приведена на рис. 5. Как следует из полученных данных, увеличение температуры на входе до значения  $T_0 = 600$  К позволяет повысить полноту разложения и снизить до 40% необходимую протяженность камеры МГГ.

### Выводы

1. Проведенное исследование методов интенсификации процесса разложения оксида азота показало, что выполнение торцевой поверхности резонатора из каталитического мате-

риала является наиболее эффективным средством снижения времени выхода МГГ на рабочий режим.

2. Установка предкамерного каталитического блока позволяет дополнительно ускорить выход на режим и существенно увеличить полноту разложения  $N_2O$  в камере на рабочем режиме.

3. Повышение температуры оксида азота на входе положительно влияет на эффективность МГГ, способствует снижению  $t_{0,9}$  и росту  $\phi$

4. Указанные методы технологичны, работоспособны и могут быть применены в МГГ различного назначения.

### Литература

1. Zakirov V.A., Lawrence T.J., Sellers J.J., Sweeting M.N. Nitrous Oxide as a Rocket Propellant, Proceedings of the 51-st International Astronautical Congress, Rio de Janeiro, Brazil, 2–6 October 2000, also published in Acta Astronautica, Vol. (issue): 48 (5–12), 2001. P. 353–362.
2. Спицын В.И., Мартыненко Л.И. Неорганическая химия. В 2 т. Т. 1. М.: Изд-во МГУ, 1991. 480 с.
3. Угрюмов Е.А. Газодинамические процессы в генераторе Гартмана // Вестн. Ленинград. ун-та. 1986. № 4. С. 30–37.
4. Антонов А.Н., Купцов В.М., Комаров В.В. Пульсации давления при струйных и отрывных течениях. М.: Машиностроение, 1990. 272 с.
5. Семенов В.В., Сергиенко А.А. Газодинамический воспламенитель // Известия вузов. Авиационная техника. 2000. № 2. С. 45–54.
6. Иванов Э.И., Крюков И.А. Пульсационные режимы течения в газодинамическом воспламенителе // Математическое моделирование. 1999. Т. 11. № 2. С. 45–54.
7. Воронцовский А.В., Сучков С.А., Филимонов Л.А. Особенности течения сверхзвуковых двухфазных потоков продуктов сгорания в каналах со специально формируемой системой скачков уплотнения // Теплофизика и аэромеханика. 2007. Т. 14. № 2. С. 209–218.
8. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика М.: Наука, 1991. 600 с.

9. Фрик П.Г. Турбулентность: подходы и модели. М.: «РХД», 2010. 332 с.

10. Годунов С.К., Забродин А.В., Иванов М.Я., Крайко А.Н., Прокопов Г.П. Численное решение многомерных задач газовой динамики. М.: Наука, 1976. 400 с.

11. Пирумов У.Г. Численные методы. М.: Издательство МАИ, 1998. 188 с.

12. Бажвалов Н.С. Численные методы. М.: Наука, 1975. 632 с.

13. Поляев В.М., Майоров В.А., Васильев Л.Л. Гидродинамика и теплообмен в пористых элементах конструкций летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1988. 168 с.

14. Зельдович Я.Б., Баренблатт Г.И., Либрович В.Б., Махвиладзе Г.М. Математическая теория горения и взрыва. М.: Наука, 1980. 478 с.

15. Gaidey T.P., Kokorin A.I., Pillet N., Srukova M.E., Sadov V.N., Haustova E.S., Shmurak G.G., Yaroshenko N.T. Perspective catalysts for N<sub>2</sub>O decomposition // 3-rd Int. Conf. on Green Propellant for Space Propulsion, 2006. P. 87–92.

16. Бореков Г.К. Катализ. Вопросы теории и практики. Новосибирск: Наука, 1987. 536 с.

17. Михайлов Л.Г. Краевая задача типа задачи Римана для систем дифференциальных уравнений первого порядка эллиптического типа и некоторые интегральные уравнения // Ученые записки Тадж. госуниверситета. Сталинабад, 1957. С. 32–78.

18. Arefyev K.J., Berlov I.V., Zakharov V.S., Ilchenko M.A. Numerical and experimental investigation of the resonant system model sample gasdynamic ignition high-temperature flow generator // International Conference on the Methods of Aerophysical Research, abstracts, part II, Kazan, Russia, 2012. С. 21–22.

## References

1. Zakirov V.A., Lawrence T.J., Sellers J.J., Sweeting M.N. Nitrous Oxide as a Rocket Propellant, Proceedings of the 51-st International Astronautical Congress, Rio de Janeiro, Brazil, 2–6 October 2000, also published in Acta Astronautica, vol. 48 (5–12), 2001, pp. 353–362.

2. Spitsyn V.I., Martynenko L.I. *Neorganicheskaya khimiya* [Inorganic chemistry]. Vol. 1. Moscow, Moscow University publ., 1991. 480 p.

3. Ugriumov E.A. Gazodinamicheskie protsessy v generatore Gartmana [Gasdynamic processes in the generator Hartmann]. *Vestnik LGU* [Herald LGU]. 1986, no. 4, pp. 30–37.

4. Antonov A.N., Kuptsov V.M., Komarov V.V. *Pul'satsii davleniya pri struinykh i otryvnykh techeniyakh* [Pulsation in inkjet and separated flows]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1990, 272 p.

5. Semenov V.V., Sergienko A.A. *Gazodinamicheskii vosplamenitel'* [Gasdynamic Igniter]. *Izv. VUZ. Aviatzionnaya Tekhnika* [Russian Aeronautics]. 2000, no. 2, pp. 45–54.

6. Ivanov E.I., Kriukov I.A. *Pul'satsionnye rezhimy techeniya v gazodinamicheskom vosplamenitele* [Pulsating flow in a

gas-dynamic igniter]. *Matematicheskoe Modelirovanie* [Mathematical Models and Computer Simulations]. 1999, vol. 11, no. 2, pp. 45–54.

7. Voronetskiy A.V., Suchkov S.A., Filimonov L.A. Osobnosti techeniya sverkhzvukovykh dvukhfaznykh potokov produktov sgoraniya v kanalakh so spetsial'no formiruemoi sistemoi skachkov uplotneniya [Peculiarities of high-temperature two-phase flow of combustion products in channels with an intentionally structured system of shock-waves]. *Teplofizika i aeromekhanika* [Thermophysics and Aeromechanics]. 2007, vol. 14, no. 2, pp. 209–218.

8. Abramovich G.N. *Prikladnaya gazovaya dinamika* [Applied Gas Dynamics]. Moscow, Nauka publ., 1991. 600 p.

9. Frik P.G. *Turbulentnost': podkhody i modeli* [Turbulence: approaches and models]. Moscow, RKhD publ., 2010. 332 p.

10. Godunov S.K., Zabrodin A.B., Ivanov M.Ia., Kraiko A.N., Prokopov G.P. *Chislennoe reshenie mnogomernykh zadach gazovoy dinamiki* [The numerical solution of multi-dimensional gas dynamics]. Moscow, Nauka publ., 1976. 400 p.

11. Pirumov U.G. *Chislennyye metody* [Numerical Methods]. Moscow, MAI publ., 1998. 188 p.

12. Bakhvalov H.C. *Chislennyye metody*. Moscow. Nauka publ., 1975, 632 p.

13. Poliaev V.M., Maiorov V.A., Vasil'ev L.L. *Gidrodinamika i teploobmen v poristykh elementakh konstruksii letatel'nykh apparatov* [Fluid dynamics and heat transfer in porous structural elements of aircraft]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1988. 168 p.

14. Zel'dovich Ia.B., Barenblatt G.I., Librovich V.B., Makhviladze G.M. *Matematicheskaya teoriya goreniya i vzryva* [The mathematical theory of combustion and explosion]. Moscow, Nauka publ., 1980. 478 p.

15. Gaidey T.P., Kokorin A.I., Pillet N., Srukova M.E., Sadov V.N., Haustova E.S., Shmurak G.G., Yaroshenko N.T. *Perspective catalysts for N<sub>2</sub>O decomposition*. 3rd Int. Conf. on Green Propellant for Space Propulsion, 2006, pp. 87–92.

16. Borekov G.K. *Kataliz. Voprosy teorii i praktiki* [Catalysis. Theory and Practice]. Novosibirsk, Nauka publ., 1987. 536 p.

17. Mikhailov L.G. *Kraevaya zadacha tipa zadachi Rimana dlia sistem differentsial'nykh uravnenii pervogo poriadka ellipticheskogo tipa i nekotorye integral'nye uravneniya* [Boundary problem of the Riemann problem for systems of differential equations of the first order elliptic and some integral equations]. *Uchenye zapiski Tadjikskogo gosudarstvennogo universiteta* [Proceedings of the Tajik State University]. Stalinabad, 1957, pp. 32–78.

18. Arefyev K.J., Berlov I.V., Zakharov V.S., Ilchenko M.A. *Numerical and experimental investigation of the resonant system model sample gasdynamic ignition high-temperature flow generator*. International Conference on the Methods of Aerophysical Research. Abstracts, part II, Kazan, Russia, 2012, pp. 21–22.

Статья поступила в редакцию 09.04.2013

## Информация об авторе

**АРЕФЬЕВ Константин Юрьевич** (Москва) — аспирант кафедры «Ракетные двигатели». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: arefyev@rambler.ru).

## Information about the author

**AREFYEV Konstantin Yurievich** (Moscow) — Post-Graduate of «Rocket Engines» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: arefyev@rambler.ru).