

## РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КАТАЛИТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ РАЗЛОЖЕНИЯ ОКСИДА АЗОТА ДЛЯ МАЛОГАБАРИТНЫХ ГАЗОГЕНЕРАТОРОВ

А.В. Воронетский<sup>1</sup>, К.Ю. Арефьев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация  
e-mail: voron@mx.bmstu.ru

<sup>2</sup>ФГУП ЦИАМ им. П.И. Баранова, Москва, Российская Федерация  
e-mail: arefyev@rambler.ru

*Приведены результаты расчетно-экспериментального исследования работы каталитической системы разложения оксида азота в составе малогабаритного газогенератора. Получены данные об интенсивности процесса разложения оксида азота в каталитическом блоке и камере сгорания при условиях, соответствующих режимам работы малогабаритных газогенераторов, а также проанализированы пути повышения эффективности применения каталитической системы разложения. 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:** каталитическое разложение, оксид азота, математическое моделирование, экспериментальное исследование.

## COMPUTATIONAL-EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE CATALYTIC SYSTEM OF NITROGEN OXIDE DECOMPOSITION FOR SMALL-SIZE GAS GENERATORS

A.V. Voronetski<sup>1</sup>, K.Yu. Aref'yev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation  
e-mail: voron@mx.bmstu.ru

<sup>1,2</sup>Baranov Central Institute of Aviation Motor Development, Moscow,  
Russian Federation  
e-mail: arefyev@rambler.ru

*The results of computational-experimental investigation of the work of the catalytic system for nitrogen monoxide decomposition included in a small-size gas generator are given. The data are obtained concerning the intensity of nitrogen monoxide decomposition in the catalytic unit and in the combustion chamber under conditions corresponding to operating modes of small-size gas generators; and the ways for increasing the efficiency of application of the catalytic decomposition system are also analyzed. The investigation results may be used in developing advanced specimens of the power-generating and energetic facilities including microrocket engines, technological plants for spraying coatings, for abrasive cutting of materials, etc.*

**Keywords:** catalytic decomposition, nitrogen monoxide, mathematical simulation, experimental investigation.

Повышение эффективности функционирования является одним из главных требований к современным энергетическим и силовым установкам. В работе [1] показано, что для малогабаритных газогенераторов (МГГ) поставленную задачу можно решить благодаря применению оксида азота ( $N_2O$ ) в качестве компонента топлива.

Следует отметить, что разработка неэлектрических систем много-разового запуска является одной из ключевых задач повышения надежности МГГ. В настоящее время в камерах сгорания (КС) различных устройств широкое распространение нашли системы зажигания с искровыми и лазерными свечами, с использованием прямого розжига или газоразрядной плазмы [2, 3]. Однако для их работы необходимо наличие дополнительного источника электрической энергии, что не всегда может быть реализовано в условиях функционирования МГГ. Известные схемы зажигания с применением самовоспламеняющихся компонентов [4, 5] требуют ввиду токсичности последних высокого уровня экологической защиты на всех стадиях эксплуатации. Таким образом, можно сделать вывод о целесообразности создания неэлектрических систем воспламенения на нетоксичных компонентах топлива, которые позволят повысить надежность запуска МГГ без нанесения вреда окружающей среде.

Одним из возможных устройств инициирования рабочего процесса в МГГ на оксиде азота является каталитическая система разложения (КСР), которая состоит из предварительного подогревателя закиси азота и каталитического блока, установленного непосредственно перед КС.

При использовании КСР в качестве устройства запуска МГГ инициатором рабочего процесса являются высокотемпературные продукты разложения оксида азота [6, 7]. Каталитическая система разложения оксида азота может быть использована для воспламенения газообразных и жидких горючих, таких как водород, метан, керосин, этанол и др. В статье представлен анализ возможности воспламенения с помощью КСР топливной смеси этанол/ $N_2O$ , которая имеет широкий спектр применения в МГГ технологических и энергосиловых установок. Температура воспламенения этанола в окислительной среде продуктов разложения  $N_2O$  составляет  $\sim 700$  К, однако, для стабильного запуска при высокой расходонапряженности проточного тракта большинства МГГ требуется температура продуктов разложения закиси азота более 1200 К. Схема МГГ с КСР приведена на рис. 1.

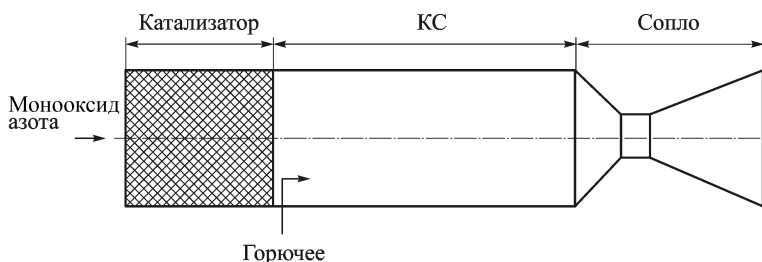


Рис. 1. Расчетная схема МГГ с КСР

В задачи работы входит проведение расчетно-экспериментальных исследований, направленных на определение условий инициирования термокаталитического разложения оксида азота, изучение влияния на этот процесс различных режимных параметров и анализ возможности последующего воспламенения горючего в продуктах разложения окислителя.

Расчет процесса разложения оксида азота в каталитическом блоке и КС МГГ основан на одномерном численном моделировании изменения химического состава рабочего тела. Для этого используется кинетическая модель протекания химических реакций (ХР).

Скорость ХР с участием  $N$  реагентов определяется уравнением

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

где  $A_i$  — концентрация  $i$ -го компонента;  $t$  — время;  $k$  — коэффициент скорости ХР;  $\sum_{i=1}^N n_i$  — порядок ХР.

Коэффициент  $k_a$  скорости ХР определяется в соответствии с уравнением Аррениуса:  $k_a = A_\gamma \frac{T^\beta}{850 \text{ К}} e^{-\frac{E_A}{RT}}$ , где  $A_\gamma$  — предэкспоненциальный множитель;  $\beta$  — температурный показатель;  $E_A$  — энергия активации.

Константы скорости для каталитического (в случае применения платина–рутений–родиевого катализатора) и термического разложения приведены в таблице.

**Константы скоростей ХР**

Химическая реакция	Прямая ХР			Обратная ХР		
	$\lg A_\gamma$	$\beta$	$-\frac{E_A}{R}$	$\lg A_\gamma$	$\beta$	$-\frac{E_A}{R}$
$\text{N}_2\text{O} + \text{K} = \text{N}_2 + \text{O} + \text{M} + \text{K}$	11,11	0,75	59620	8,25	0,12	-785
$\text{N}_2\text{O} = \text{N}_2 + \text{O} + \text{M}$	9,78	0,12	78952	7,11	0,13	
$\text{N}_2\text{O} + \text{O} + \text{K} = \text{N}_2 + \text{O}_2 + \text{K}$	12,14	1,13	10830	10,25	0,65	10545
$\text{N}_2\text{O} + \text{O} = \text{N}_2 + \text{O}_2$	10,02	0,85	21785	8,51	0,77	
$\text{N}_2\text{O} + \text{O} + \text{K} = \text{NO} + \text{NO} + \text{K}$	13,46	0,22	23150	9,14	-0,22	25084
$\text{N}_2\text{O} + \text{O} = \text{NO} + \text{NO}$	7,17	0,07	27859	8,17	-0,27	

Моделирование скорости ХР в пористом катализаторе  $k_a^{\text{ПК}}$  требует учета режима течения в нем рабочего компонента [8]. В связи с этим

вводится поправка для констант скоростей реакций

$$k_a^{\text{ПК}} = \frac{17,2 (1 + \text{Re}^{0,62}) \lg \left( \text{П} \frac{P}{F} \right)}{2,75 - Na} k_a,$$

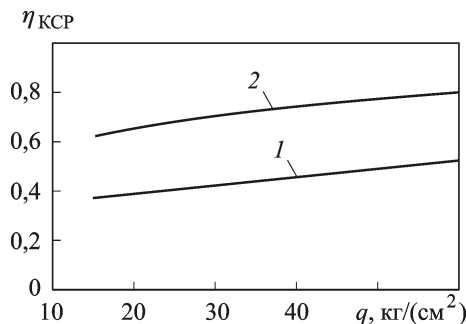
где  $\text{Re}$  – критерий Рейнольдса для течения в пористом элементе;  $\text{П}$  – коэффициент пористости материала;  $P$  – периметр омываемой поверхности катализатора в проходном сечении;  $F$  – площадь проходного сечения;  $Y$  – критерий химической чистоты поверхности каталитического блока. Для прямых реакций показатель  $Na = 1$ , для обратных  $Na = -1$ .

Моделирование проведено для начальной температуры оксида азота  $T_0 = 700 \dots 900$  К при длинах каталитического блока  $L_k = 20$  мм и  $L_k = 40$  мм. Рассмотрены режимы работы МГГ с расходонапряженностью потока в каталитическом блоке  $q = m/F_k = 15 \dots 60$  кг/(с·м<sup>2</sup>). Здесь  $m$  – массовый расход рабочего тела;  $F_k$  – площадь проходного сечения каталитического блока. Расчеты проведены для теплоизолированной КС без учета потерь теплоты в окружающую среду.

Показано, что разложение  $\text{N}_2\text{O}$  протекает как в каталитическом блоке, так и в КС. Для определения эффективности работы КСР введен следующий критерий относительной степени разложения  $\text{N}_2\text{O}$  в каталитическом блоке:  $\eta_{\text{КСР}} = \frac{1 - A_{\text{КСР}}}{1 - A_k}$ , где  $A_{\text{КСР}}$  – концентрация  $\text{N}_2\text{O}$  в потоке непосредственно после каталитического блока,  $A_k$  – концентрация  $\text{N}_2\text{O}$  в конце КС.

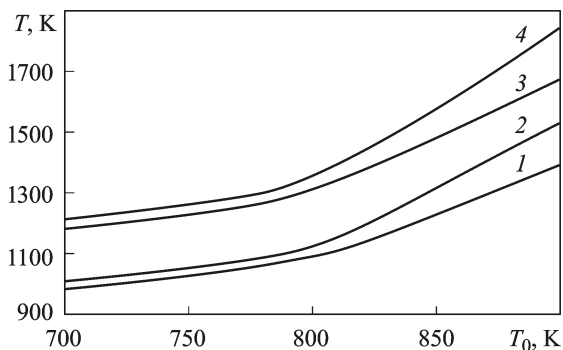
Получено, что при  $L_k = 20$  мм  $\eta_{\text{КСР}} = 0,3 \dots 0,5$  (рис. 2). При двукратном увеличении протяженности каталитического блока ( $L_k = 40$  мм) эффективность работы КСР повышается и степень разложения окислителя достигает значений  $\eta_{\text{КСР}} = 0,6 \dots 0,9$ .

Расчеты показали, что на форсированных режимах работы (с увеличенной расходонапряженностью) имеет место более высокая полнота разложения  $\text{N}_2\text{O}$ . В частности, двукратное увеличение расходонапряженности позволяет повысить на 30...40% полноту разложения. Данный эффект объясняется ростом степени турбулизации потока и,



**Рис. 2. Зависимость относительной степени разложения  $\text{N}_2\text{O}$  в каталитическом блоке от расходонапряженности:**

1 –  $L_k = 20$  мм, 2 –  $L_k = 40$  мм



**Рис. 3. Зависимость температуры в КС от температуры подогрева  $N_2O$ :**  
 1 –  $L_k = 20$  мм,  $q = 30$  кг/(с·м<sup>2</sup>); 2 –  $L_k = 20$  мм,  $q = 60$  кг/(с·м<sup>2</sup>); 3 –  $L_k = 40$  мм,  $q = 30$  кг/(с·м<sup>2</sup>); 4 –  $L_k = 40$  мм,  $q = 60$  кг/(с·м<sup>2</sup>)

как следствие, интенсификацией протекания ХР на поверхности катализатора.

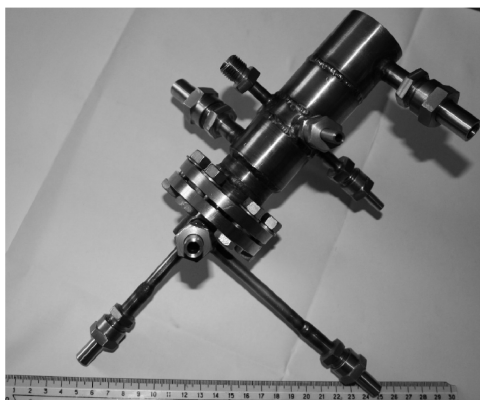
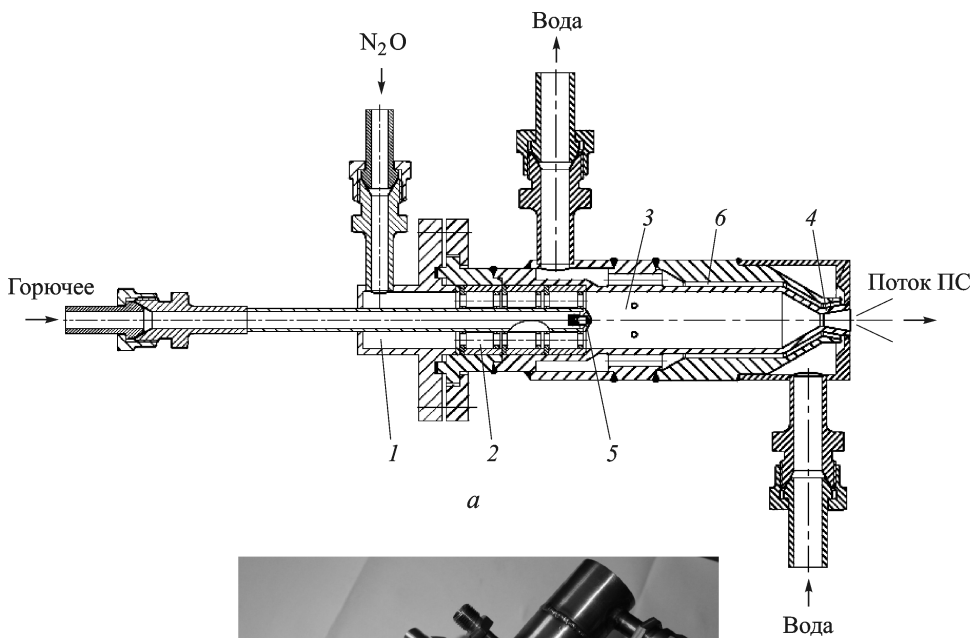
Зависимость температуры продуктов разложения оксида азота в КС от температуры первоначального подогрева для различных значений режимного параметра и протяженности каталитического блока приведена на рис. 3.

Увеличение начальной температуры  $N_2O$  экспоненциально влияет на процесс разложения оксида азота и температуру продуктов в КС. Максимальная температура в КС составляет 1820 К, что соответствует степени разложения оксида азота 0,75. Данные результаты получены при следующих значениях основных параметров:  $T_0 = 900$  К,  $q = 60$  кг/(с·м<sup>2</sup>) и  $L_k = 40$  мм.

Расчетные данные показывают, что воспламенение топливной смеси этанол/ $N_2O$  в КС с использованием КСР может быть реализовано при первоначальном подогреве  $N_2O$  до температур  $T_0 = 850 \dots 870$  К для  $L_k = 20$  мм и  $T_0 = 750 \dots 800$  К для  $L_k = 40$  мм.

Для экспериментального исследования КСР использован стендовый образец МГГ (рис. 4), который состоит из головки 1, каталитического блока 2, КС 3 и сверхзвукового сопла 4 с геометрической степенью расширения, равной трем. Распыл горючего проводится с помощью форсунки 5. Для обеспечения требуемого теплового режима стенок КС, она снабжена системой 6 проточного охлаждения. Соотношение диаметров поперечного сечения проточного тракта в КС и критическом сечении соответствует формуле  $d_k/d_{кр} = 4,5$ .

Каталитический блок стендового образца МГГ включает в себя три катушки из сплава ХН60ВТ с намотанными на них каталитическими сетками на основе платина–рутений–родиевого сплава ПлПдРдРу 15-3,5-0,5 [9]. Каталитический блок имеет следующие характеристики: объем равен  $14 \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup>, длина – 0,020 м, коэффициент пористости по объему  $\Pi = 0,5$ . Объем КС составляет  $40 \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup>.



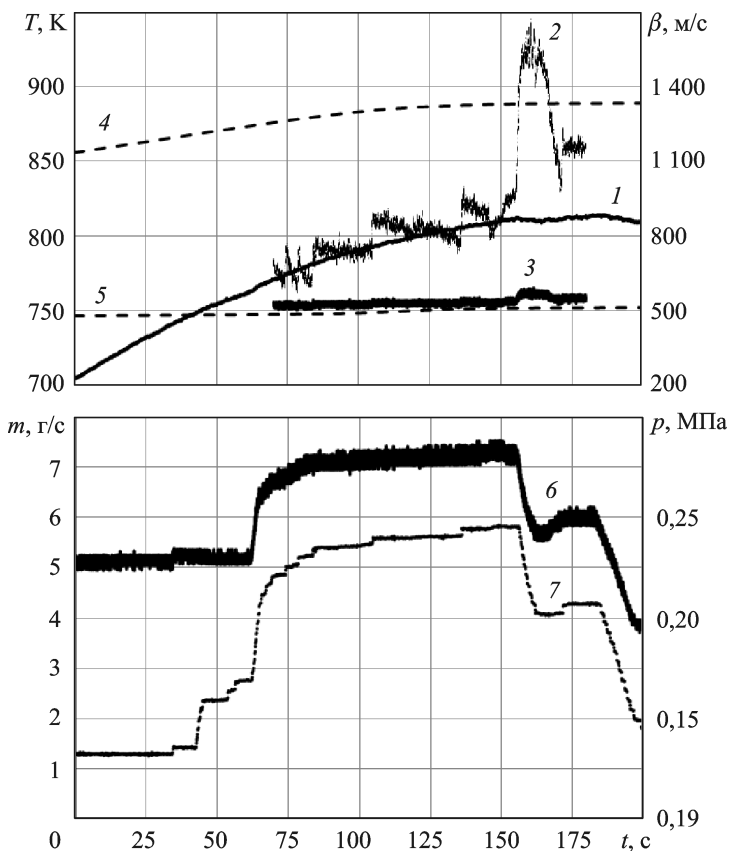
б

Рис. 4. Конструктивная схема (а) и внешний вид (б) стендового образца МГТ с КСР

Принцип функционирования стендового образца МГТ основан на подаче подогретого оксида азота через головку в каталитический блок, где происходит разложение  $N_2O$  с выделением тепловой энергии (82 кДж/моль). Образовавшаяся высокотемпературная смесь поступает в КС, где должно происходить смешение ее с горючим и его воспламенение. Отметим, что в данной серии экспериментов подача горючего в МГТ не осуществлялась.

Для подогрева оксида азота в стендовых условиях использовался электрический подогреватель омического типа с эффективной тепловой мощностью 5...7 кВт и максимальной допустимой температурой подогрева 1000 К.

На данном этапе работы проведены экспериментальные исследования стендового образца МГТ, направленные на выявление условий, обеспечивающих требуемый уровень разложения оксида азота. Сте-



**Рис. 5 (начало). Результаты испытаний при  $q=15 \dots 25$  (а) и  $30 \dots 60$  кг/(с·м<sup>2</sup>) (б):**  
 кривая 1 –  $T_0$ ; 2 –  $T_K$ ; 3 –  $\beta_3$ ; 4 –  $\beta_2$ ; 5 –  $\beta_1$ ; 6 –  $m$ ; 7 –  $p_K$

пень подогрева  $N_2O$  ( $T_0$ ) определялась мощностью электрического подогревателя.

На рис. 5 приведены зависимости от времени ( $t$ ) массового расхода и температуры подогрева закиси азота ( $m$  и  $T_0$ ), давления и температуры рабочего тела в КС ( $p_K$  и  $T_K$ ), а также расходного комплекса  $\beta_3 = F_{кр} p_K / m$ .

Кроме указанных параметров, на диаграммы также нанесены значения расходных комплексов, которые соответствуют замороженному ( $\beta_1$ ) и равновесному ( $\beta_2$ ) процессам при течении  $N_2O$ .

Теоретическое значение расходного комплекса для замороженного химического состава рабочего тела определяется по зависимости

$$\beta_1 = \frac{\sqrt{RT_{II}}}{\sqrt{k} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}}},$$

где  $R$ ,  $k$  – газовая постоянная и показатель адиабаты оксида азота.

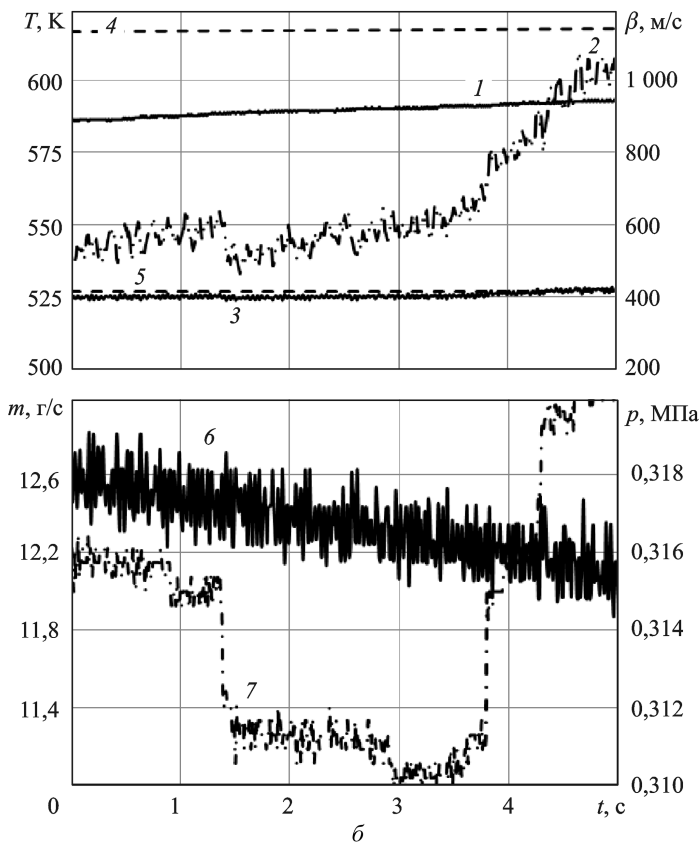


Рис. 5 (окончание)

Значения  $\beta_2$  получены на основе результатов моделирования равновесного термодинамического состояния. Расчеты проведены с учетом уровня первоначального подогрева оксида азота.

В качестве показателя эффективности разложения  $N_2O$  принят коэффициент расходного комплекса  $\psi_\beta$ , вычисляемый с помощью следующего уравнения:

$$\psi_\beta = \frac{\beta_3 - \beta_1}{\beta_2 - \beta_1}.$$

Отрицательные значения  $\psi_\beta$  соответствуют превышению уровня теплоотвода от рабочего тела над уровнем тепловыделения за счет разложения. Положительные значения  $\psi_\beta$  реализуются при большей полноте разложения  $N_2O$  и превышении тепловыделения над теплоотводом.

Полученные в ходе исследования результаты показывают, что при температурах  $T_0 = 740 \dots 760$  К ( $q = 15 \dots 25$  кг/(с·м<sup>2</sup>)) происходит нестабильное разложение оксида азота с низким показателем  $\psi_\beta = 0,05 \dots 0,06$  (рис. 5, а). При  $T_0 = 760 \dots 820$  К интенсивность



разложения  $N_2O$  повышается в 2–3 раза и составляет  $\psi_\beta = 0,1 \dots 0,2$ . Максимальная полученная температура в КС составляет 950 К при реализации первоначального подогрева на уровне 810 К.

С увеличением расходонапряженности до  $q = 30 \dots 50 \text{ кг}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$  наблюдалось понижение температуры  $N_2O$  до  $T_0 = 570 \dots 580 \text{ К}$  (рис. 5, б), что имело место из-за ограниченной мощности нагревателя. В этом случае процесс разложения  $N_2O$  не наблюдался, а температура в КС оказалась меньше, чем  $T_0$  из-за теплоотвода в систему проточного водяного охлаждения. При этом  $\beta_3 = 404 \dots 410 \text{ м}/\text{с}$ ,  $\psi_\beta = -0,02 \dots -0,05$ .

Показано, что точкой начала разложения  $N_2O$  в КСР рассматриваемого МГГ является  $T_0 = 590 \text{ К}$ . При этом наблюдается повышение  $T_K$  и  $\beta_3$ .

Несмотря на ограниченную мощность электроподогревателя, выявлена четкая зависимость  $\psi_\beta$  от  $T_0$  (рис. 6). Показано, что для повышения критерия  $\psi_\beta$  требуется увеличение температуры оксида азота на входе в каталитический блок.

Сравнение расчетных и экспериментальных данных показало, что в процессе испытаний МГГ температура продуктов разложения в КС на 10...15% отличается в меньшую сторону от расчетных значений. Данный эффект связан с отводом теплоты в проточную водяную систему охлаждения. Учитывая уровень теплоотвода можно прогнозировать, что для организации надежного запуска стендового образца МГГ указанной конструкции требуется первоначальный подогрев  $N_2O$  до температуры  $T_0 > 900 \text{ К}$ .

На основе полученных результатов можно сделать следующие выводы. Двукратное увеличение расходонапряженности потока в каталитическом блоке позволяет повысить на 30...40% полноту разложения оксида азота. При этом начальная температура  $N_2O$  экспоненциально влияет на процесс разложения оксида азота и температуру продуктов в

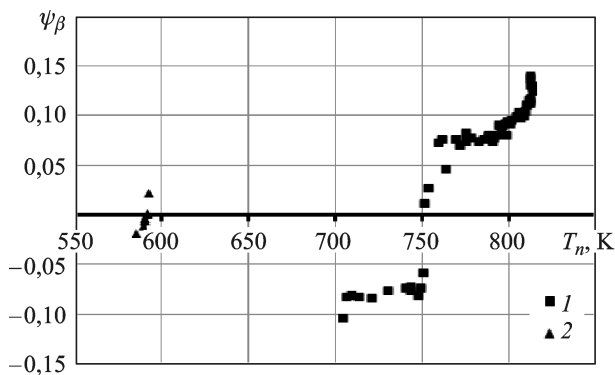


Рис. 6. Зависимость  $\psi_\beta$  от  $T_0$ :

■ —  $q = 15 \dots 25 \text{ кг}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$ ; ▲ —  $q = 30 \dots 60 \text{ кг}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$

КС. Показано, что степень разложения  $N_2O$  может достигать 75 % при  $T_0 = 900$  К,  $q = 60$  кг/(с·м<sup>2</sup>) и  $L_k = 40$  мм. Для случая теплоизолированной КС воспламенение топливной смеси этанол/ $N_2O$  может быть реализовано при первоначальном подогреве оксида азота до температур  $T_0 = 800 \dots 850$  К. При использовании КС с наружной проточной системой охлаждения необходимо повышение температуры первоначального подогрева до  $T_0 > 900$  К.

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

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Воронецкий А.В., Арефьев К.Ю.* Анализ области эффективного применения закиси азота в качестве компонента топлива для двигательных установок малых космических аппаратов. [Электронный ресурс] // Электронное научное издание “Наука и образование” (<http://technomag.edu.ru/doc/450400.html>). 10.7463/0912.0450400. Проверено 04.09.2012.
2. *Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова 75 лет творческой научно-практической деятельности ЦИАМ в авиадвигателестроении / под редакцией В.А. Скибина и др.* М.: Издательский дом “Авиамир”. 2005. С. 560–562.
3. *Добровольский М.В.* Жидкостные ракетные двигатели. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005.
4. *Мержанов А.Г., Аверсон А.Э.* Современное состояние тепловой теории зажигания, М., 1970.
5. *Вилонов В. Н.* Теория зажигания конденсированных веществ. Новосибирск, Наука, 1984.
6. *Zakirov V.A., T.J. Lawrence, J.J. Sellers, and M.N. Sweeting.* Nitrous Oxide as a Rocket Propellant. Proceedings of the 51st International Astronautical Congress, Rio de Janeiro, Brazil, 2–6 October 2000, also published in Acta Astronautica, Volume (issue): 48 (5–12). 2001. P. 353–362.
7. *Wan Ke, Li Luming, Vadim Zakirov, Huo Xueliang.* Experimental investigation on catalytic ignition of  $N_2O$  hybrid rocket motor // Journal of Propulsion Technology (Tuijin Jishu). 2007. Vol. 28. No. 1. P. 1–3, 85. ISSN 1001-4055, CN 11-1813/V.
8. *Бересков Г.К.* Катализ. Вопросы теории и практики, Новосибирск: Наука, 1987.
9. ГОСТ 3193–74 Сетки катализаторные из платиновых сплавов. Технические условия.

## REFERENCES

1. *Voronetskiy A.V., Aref'ev K.Yu.* Analysis of the effective use of nitrous oxide as a fuel component for propulsion systems of small spacecrafts. *Nauka Obraz. MGТУ im. N.E. Bauman. Elektron. Zh.* [Sci. Educ. Bauman Moscow State Tech. Univ. Electron. J.]. Available at: <http://technomag.edu.ru/doc/450400.html> (Accessed 4 September 2012).
2. *Skibin V.A.* Tsentral'nyy institut aviatsionnogo motorostroeniya im. P.I. Baranova. 75 let tvorcheskoy nauchno-prakticheskoy deyatel'nosti TsIAM v aviadvigatelestroenii [Central Institute of Aviation Motors n.a. P.I. Baranov. 75 years of TsIAM creative scientific activity in aircraft engine design]. Moscow, Aviamir Publ., 2005, pp. 560–562.
3. *Dobrovolskiy M.V.* Zhidkostnye raketnye dvigateli [Liquid propellant rocket engines]. Moscow, MGТУ im. N.E. Bauman Publ., 2005. 486 p.

4. *Merzhanov A.G., Averson A.E.* Sovremennoe sostoyanie teplovoj teorii zazhiganiya [The current state of the thermal ignition theory], Moscow, 1970.
5. *Vilyunov V.N.* Teoriya zazhiganiya kondensirovannykh veshchestv [Theory of ignition condensed substances], Novosibirsk, 1984.
6. *Zakirov V.A., Lawrence T.J., Sellers J.J., Sweeting M.N.* Nitrous oxide as a rocket propellant. *Astronaut. Acta*, 2001, vol. 48, pp. 353–362.
7. *Wan Ke, Li Luming, Vadim Zakirov, Huo Xueliang.* Experimental investigation on catalytic ignition of  $N_2O$  hybrid rocket motor. *J. Propul. Technol.*, 2007, vol. 28, no. 1, pp. 63–85.
8. *Bereskov G.K.* Kataliz. Voprosy teorii i praktiki [Theory and practice of catalysis], Moscow, Nauka Publ., 1987.
9. *GOST 3193–74.* Setki katalizatornye iz platinovykh splavov. Tekhnicheskie usloviya [State Standard 3193–74. Catalyst meshes made of platinum alloys. Specifications]. Moscow Standardinform Publ., 1976.

Статья поступила в редакцию 4.02.2013

Андрей Владимирович Воронетский — 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.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

A.V. Voronetskii — Dr. Sci. (Eng.), professor, Honorary Science Worker of the RF, head of department of Research Institute for Power Machine Building of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 100 publications in the field of heat-mass exchange in two-phase flows and the conversion application of low-thrust rocket engines. Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul., 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Константин Юрьевич Арефьев — инженер-конструктор отдела “Аэрокосмические двигатели” ФГУП ЦИАМ им. П.И. Баранова, аспирант кафедры “Ракетные двигатели” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Специализируется в области моделирования рабочего процесса в энергетических установках.

ФГУП ЦИАМ им. П.И. Баранова, Российская Федерация, 111116, Москва, ул. Авиамоторная, д. 2.

K.Yu. Aref'yev — design engineer of “Aerospace Engines” department of the Baranov Central Institute of Aviation Motor Development, post-graduate of “Rocket Engines” department of the Bauman Moscow State Technical University. Specializes in the field of simulation of working process in power generating plants.

Baranov Central Institute of Aviation Motor Development, Moscow, 111116 Russian Federation.