

## ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОПЛА НА ТЯГОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕПРЕРЫВНО-ДЕТОНАЦИОННОЙ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ\*

А. В. Дубровский<sup>1</sup>, В. С. Иванов<sup>2</sup>, С. М. Фролов<sup>3</sup>

**Аннотация:** Проведено параметрическое численное исследование влияния сопла на тяговые характеристики экспериментальной кольцевой непрерывно-детонационной камеры сгорания (НДКС) внешнего диаметра 406 мм с кольцевым зазором 25 мм и с коническим центральным телом (полуугол при вершине 23°), работающей на водороде и воздухе. В расчетах изменяли длину обечайки, ограничивающей скорость расширения потока, при фиксированной форме центрального тела сопла (конус) и длине камеры, а также изменяли форму центрального тела (конус или усеченный конус) и геометрию сопряжения выхлопной струи с окружающей средой, позволяя струе выходить либо в полупространство, либо в полное пространство. Показано, что максимальная тяга (7,7 кН) достигается при длине камеры 395 мм, близкой к ее внешнему диаметру, и при использовании конического центрального тела в отсутствие обечайки. Уменьшение длины камеры, установка обечайки и использование центрального тела в форме усеченного конуса, а также расширение выхлопной струи в полное пространство приводят к уменьшению тяги.

**Ключевые слова:** непрерывно-детонационная камера сгорания; водород; воздух; тяговые характеристики; сопло; численные расчеты

### Введение

В настоящее время для создания энергоэффективных камер сгорания для реактивных двигателей летательных аппаратов, в частности камер сгорания нового типа,

---

\* Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Минобрнауки России по государственному контракту № 14.609.21.0002 (идентификатор контракта RFMEFI60914X0002) «Разработка технологий использования сжиженного природного газа (метан, пропан, бутан) в качестве топлива для ракетно-космической техники нового поколения и создание стендового демонстрационного образца ракетного двигателя» в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы», а также Российской академии наук по Программе № 26 «Горение и взрыв» и РФФИ (проект № 15-08-00782).

<sup>1</sup> Центр импульсно-детонационного горения; Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», dubrovskii.alex@gmail.com

<sup>2</sup> Центр импульсно-детонационного горения; Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, ivanov.vls@gmail.com

<sup>3</sup> Центр импульсно-детонационного горения; Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», smfrol@chph.ras.ru

работающих на непрерывно-детонационном горении [1], активно используются новейшие технологии цифрового проектирования, в основе которых — двумерное или трехмерное численное моделирование всех физико-химических и газодинамических процессов, протекающих в камере сгорания как в установившихся, так и в переходных режимах работы. Применительно к НДКС в литературе в основном используются модели невязких сжимаемых реагирующих течений [2–7]. В таких моделях не учитывается один из ключевых сопутствующих процессов — турбулентно-молекулярное смешение топливных компонентов друг с другом и с продуктами горения, определяющий протекание рабочего процесса. В отличие от [2–7] в работах авторов [8–10] используется модель трехмерного турбулентного сжимаемого реагирующего течения, учитывающая турбулентно-молекулярное смешение компонентов смеси и продуктов горения, конечную скорость химических превращений и влияние турбулентных пульсаций на среднюю скорость химических реакций. Эта модель применялась авторами для проектирования крупноразмерной НДКС [10–12] с измеренной тягой до 7,50 кН и показала высокие прогностические возможности. Поскольку в конструкцию НДКС интегрировано реактивное сопло, характеристики сопла существенно влияют не только на рабочий процесс в НДКС, но и на его энергоэффективность.

Цель данной работы — параметрическое численное исследование влияния сопла на тяговые характеристики НДКС, работающей на водороде и воздухе.

## Постановка задачи

Непрерывно-детонационная камера сгорания (рис. 1) — кольцевая камера с внешним диаметром 406 мм, длиной  $H$  и кольцевым зазором шириной 25 мм. К одному концу камеры сгорания присоединен воздушный коллектор, из которого воздух подается в камеру сгорания через кольцевое отверстие шириной 5 мм между диском с заостренным краем и внешней стенкой. Водород поступает в камеру сгорания из водородного коллектора через 240 радиальных отверстий диаметром 1 мм, равномерно распределенных по окружности внешней стенки на

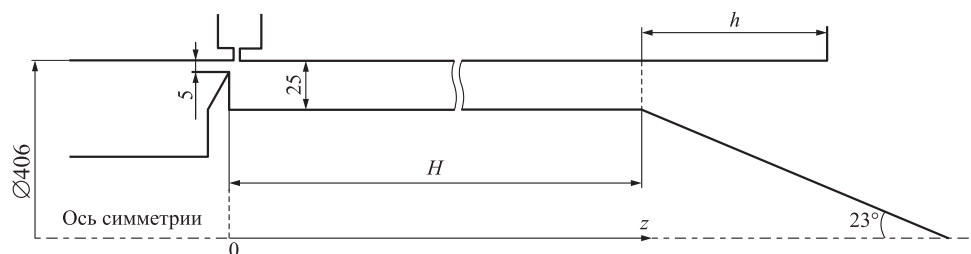
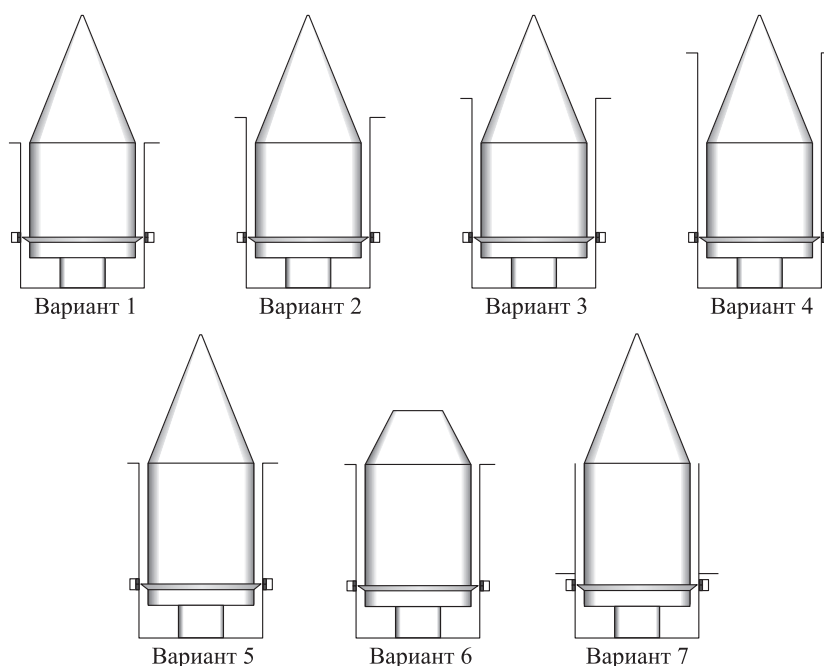


Рис. 1 Схема НДКС. Размеры указаны в миллиметрах



**Рис. 2** Расчетные варианты конструкции НДКС с соплом

расстоянии 0,5 мм над воздушным зазором. Другой конец НДКС сообщается с окружающей средой через выходное сопло с центральным телом в виде конуса или усеченного конуса с полууглом при вершине  $23^\circ$  и с обечайкой длиной  $h$ , ограничивающей скорость расширения потока. Все основные размеры НДКС (внешний диаметр, ширина кольцевого зазора и кольцевое отверстие) — такие же, как в экспериментальной камере [10–12].

Объект исследования в данной работе — выходное сопло. На рис. 2 схематически показаны расчетные варианты конструкции НДКС с соплом. В вариантах 1–4 изменяется длина обечайки  $h$  при фиксированной форме центрального тела (конус) и длине камеры  $H = 310$  мм, в вариантах 5 и 6 изменяется форма центрального тела (конус или усеченный конус длиной 180 мм) при фиксированных значениях  $h = 0$  и  $H = 395$  мм, а в вариантах 5 и 7 изменяется геометрия сопряжения выхлопной струи с окружающей средой (в варианте 5 струя выходит в полупространство, а в варианте 7 — в полное пространство). Во всех вариантах расходы воздуха и водорода были одинаковыми и равными 6,4 и 0,26 кг/с соответственно, а давление окружающей среды — нормальное атмосферное.

Все указанные варианты расчетов перечислены в таблице. Там же указаны расчетное количество детонационных волн, одновременно вращающихся в кольцевом зазоре НДКС, и соответствующие расчетные значения тяги.

Варианты и результаты расчетов

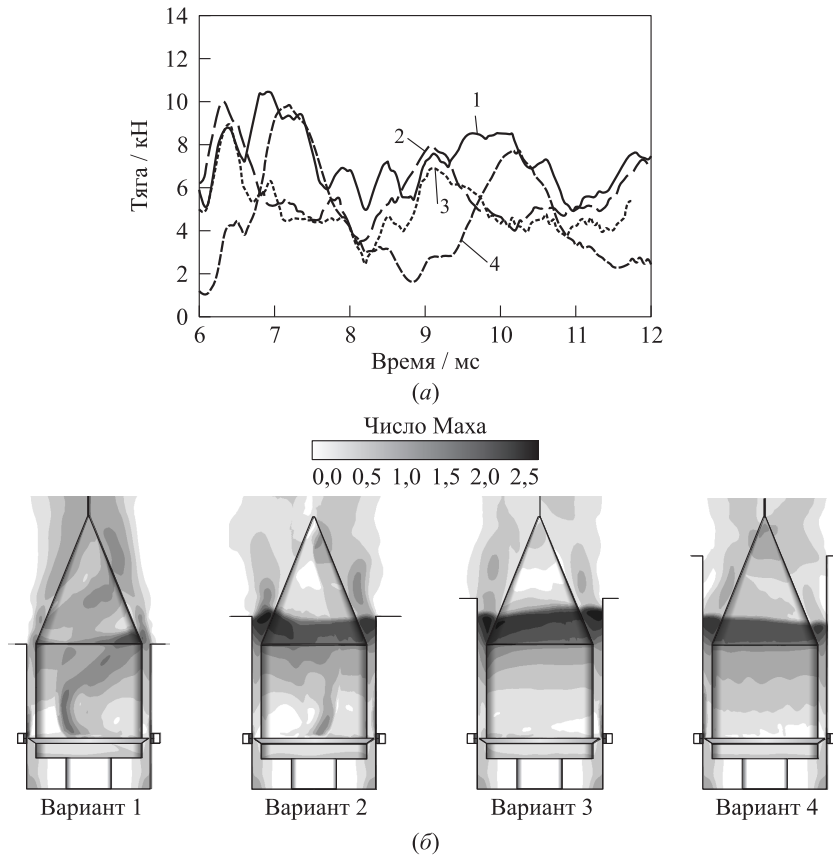
№ расчета	$H$ , мм	$h$ , мм	Срез конуса	Сопряжение с пространством	Количество волн	Тяга, кН
1	310	0	–	–	2	7,4
2	310	94,5	–	–	1	5,9
3	310	152	–	–	1	5,1
4	310	294	–	–	1	4,8
5	395	0	–	–	2	7,7
6	395	0	+	–	1	6,6
7	395	0	–	+	1	7,1

Для описания физико-химических процессов в НДКС использовали математическую модель, подробно описанную в [8–10]. Численное решение определяющих уравнений задачи проводилось с использованием сопряженного алгоритма «метод SIMPLE (semiimplicit method for pressure linked equations) — метод Монте Карло». Химические источниковые члены рассчитывались по неявной схеме с внутренним шагом интегрирования по времени. Для моделирования окисления водорода применялась одноступенчатая схема реакции с аррениусовской зависимостью скорости от температуры, включающей предэкспоненциальный множитель, зависящий от давления, и энергию активации, зависящую от коэффициента избытка горючего. Указанные зависимости получены аппроксимацией значений периода индукции, рассчитанных с помощью проверенного детального кинетического механизма окисления водорода в широком диапазоне температур, давлений и составов смеси, и представлены в виде электронных таблиц. Поскольку одноступенчатая схема не учитывает диссоциацию воды при высоких температурах, теплоту реакции изменили так, чтобы расчетная скорость детонации Чепмена–Жуге для стехиометрической водородно-воздушной смеси соответствовала ее термодинамическому значению ( $\approx 1970$  м/с).

Расчеты проводили на структурированных объемных сетках с минимальным пространственным размером ячейки 0,7 мм и полным количеством ячеек около 3 млн шт., используя высокопроизводительный вычислительный кластер.

## Результаты расчетов

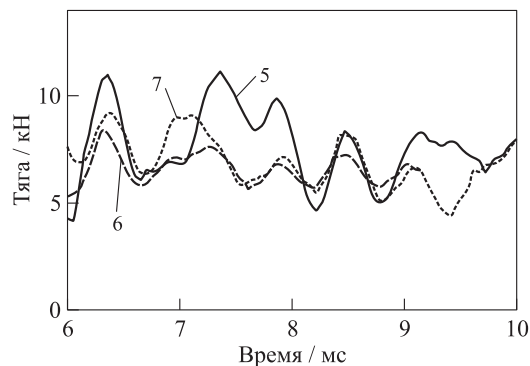
Основным показателем эффективности НДКС с соплом считали развиваемую силу тяги, которую определяли на каждом временном шаге как интеграл от сил давления и вязкого трения по всем твердым поверхностям НДКС и сопла. На рис. 3, *a* приведено сравнение кривых мгновенной тяги для вариантов 1–4 по прошествии начального переходного периода работы НДКС и установления режима с тем или иным количеством детонационных волн. Максимальная средняя тяга 7,4 кН (получена осреднением мгновенной тяги по времени на рис. 3, *a*) до-



**Рис. 3** Расчетные зависимости мгновенной тяги НДКС от времени (а) и расчетные поля местного числа Маха в срединном сечении НДКС через 10 мс после зажигания (б) для вариантов 1–4 (см. таблицу)

стигается в варианте 1, т. е. в отсутствие обечайки. С увеличением длины обечайки тяга НДКС уменьшается, достигая значений 5,9, 5,1 и 4,8 кН в вариантах 2, 3 и 4 соответственно. Причина снижения тяги при переходе от варианта 1 к вариантам 2–4 — образование диска Маха на срезе обечайки (вариант 2) и внутри нее (варианты 3 и 4), приводящего к торможению выхлопной струи (рис. 3, б). В отличие от вариантов 2–4, в которых наблюдался режим с одной детонационной волной, в варианте 1 наблюдался устойчивый рабочий процесс с двумя детонационными волнами, одновременно вращающимися в кольцевом зазоре в одном направлении.

На рис. 4 приведено сравнение кривых мгновенной тяги для вариантов 5–7. Варианты 5–7 отличаются от вариантов 1–4, прежде всего, увеличенной на 27%



**Рис. 4** Расчетные зависимости мгновенной тяги НДКС от времени для вариантов 5–7 (см. таблицу)

длиной камеры сгорания. По сравнению с вариантом 1 в аналогичном варианте 5 такое увеличение длины камеры привело к увеличению тяги от 7,4 до 7,7 кН, т. е. на 4%. Таким образом, в варианте 5 получено максимальное значение тяги. Замена конуса в варианте 5 на усеченный конус (вариант 6) привело к снижению тяги до 6,6 кН, т. е. на 14%. Переход к другой геометрии сопряжения выхлопной струи с окружающей средой (вариант 7), которая ближе к реальной, также привел к снижению тяги по сравнению с вариантом 5 (на 8%). Интересно, что в варианте 5 с максимальной тягой, как и в варианте 1, наблюдался режим с двумя детонационными волнами, а в вариантах 6–7 — режим с одной детонационной волной.

## Заключение

Проведено параметрическое численное исследование влияния сопла на тяговые характеристики экспериментальной кольцевой НДКС внешнего диаметра 406 мм с кольцевым зазором 25 мм и с коническим центральным телом (полуугол при вершине 23°), работающей на водороде и воздухе. В расчетах изменяли длину обечайки, ограничивающей скорость расширения потока, при фиксированной форме центрального тела сопла (конус) и длине камеры, а также изменяли форму центрального тела (конус или усеченный конус) и изменяли геометрию сопряжения выхлопной струи с окружающей средой, позволяя струе выходить либо в полупространство, либо в полное пространство. Показано, что максимальная тяга (7,7 кН) достигается при длине камеры 395 мм, близкой к ее внешнему диаметру, при использовании конического центрального тела в отсутствие обечайки. Уменьшение длины камеры, установка обечайки и использование центрального тела в форме усеченного конуса, а также расширение выхлопной струи в полное пространство приводят к уменьшению тяги.

В дальнейшем планируются параметрические численные исследования влияния формы камеры и центрального тела сопла на тяговые характеристики экспериментальной НДКС.

## Литература

1. Быковский Ф. А., Ждан С. А. Непрерывная спиновая детонация. — Изд-во СО РАН, 2013. 423 с.
2. Ждан С. А., Быковский Ф. А., Ведерников Е. Ф. Математическое моделирование вращающейся волны детонации в водородно-кислородной смеси // ФГВ, 2007. Т. 43. № 4. С. 90–101.
3. Wolanski P. Detonative propulsion // Proc. Combust. Inst., 2013. Vol. 34. P. 125–158.
4. Uemura Yu., Hayashi A. K., Asahara A., Tsuboi N., Yamada E. Transverse wave generation mechanism in rotating detonation // Proc. Combust. Inst., 2013. Vol. 34. No. 2. P. 1981–1989.
5. Kailasanath K., Schwer D. A. Numerical simulations of a rotating-detonation-wave engine concept // Transient combustion and detonation phenomena: Fundamentals and applications / Eds. G. D. Roy, S. M. Frolov. — Moscow: TORUS PRESS, 2014. P. 436–441.
6. Eude Yo., Davidenko D. Use of the adaptive mesh refinement for continuous detonation simulation // Transient combustion and detonation phenomena: Fundamentals and applications / Eds. G. D. Roy, S. M. Frolov. — Moscow: TORUS PRESS, 2014. P. 454–463.
7. Wu D., Liu Y., Liu Y., Wang J. Numerical investigations of the restabilization of hydrogen–air rotating detonation engines // Int. J. Hydrogen Energy, 2014. Vol. 39. No. 28. P. 15803–15809.
8. Фролов С. М., Дубровский А. В., Иванов В. С. Трехмерное численное моделирование рабочего процесса в камере сгорания с непрерывной детонацией при отдельной подаче горючего и окислителя // Хим. физика, 2013. Т. 32. № 2. С. 56–65.
9. Дубровский А. В., Иванов В. С., Фролов С. М. Трехмерное численное моделирование рабочего процесса в непрерывно-детонационной камере сгорания с отдельной подачей водорода и воздуха // Хим. физика, 2015. Т. 34. № 2. С. 1.
10. Фролов С. М., Аксенов В. С., Дубровский А. В., Иванов В. С., Шамшин И. О. Энергоэффективность непрерывно-детонационных камер сгорания // ФГВ, 2015. Т. 51. № 2.
11. Аксенов В. С., Гусев П. А., Иванов В. С., Медведев С. Н., Фролов С. М., Шамшин И. О. Экспериментальные исследования непрерывного детонационного горения водорода в кольцевой камере сгорания // Горение и взрыв, 2014. Вып. 7. С. 121–128.
12. Frolov S. M., Aksenov V. S., Ivanov V. S., Shamshin I. O. Large-scale hydrogen–air continuous detonation combustor // Int. J. Hydrogen Energy, 2015. Vol. 40. Iss. 3. P. 1616–1623.

Поступила в редакцию 01.11.14

## PARAMETRIC STUDY OF THE INFLUENCE OF NOZZLE ON THRUST PERFORMANCE OF CONTINUOUS-DETONATION COMBUSTION CHAMBER

A. V. Dubrovskii<sup>1,2,3</sup>, V. S. Ivanov<sup>1,2</sup>, and S. M. Frolov<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Noncommercial Partnership Center of Pulse Detonation Combustion, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation

<sup>2</sup>N. N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation

<sup>3</sup>National Research Nuclear University MPhI, 31 Kashirskoe Sh., Moscow 115409, Russian Federation; smfrol@chph.ras.ru

**Abstract:** A parametric numerical study of the influence of nozzle on thrust performance of the experimental annular continuous-detonation combustion chamber 406 mm in outer diameter with an annular gap of 25 mm and a tapered central body (semiapex angle 23°), operating on hydrogen and air has been performed. Varied in the calculations were the length of the extension limiting the rate of flow expansion, the length of the combustion chamber, the shape of the central body (cone or truncated cone), and the way the exhaust jet enters the environment, allowing the jet to enter a half-space or a full space. It is shown that the maximum thrust (7.7 kN) is reached when the chamber length (395 mm) is close to chamber outside diameter, when a full conical central body is used and in the absence of the extension. Reduction in the length of the chamber, the use of the central body in the shape of truncated cone, and expansion of the exhaust jet into the full space lead to reduction in thrust.

**Keywords:** continuous-detonation combustion chamber; hydrogen; air; thrust performance; nozzle; numerical simulation

### Acknowledgments

The work was supported by the Russian Ministry of Education and Science under the State Contract No. 14.609.21.0002 (Contract ID RFMEFI60914X0002) “Development of technologies for the use of liquefied natural gas (methane, propane, butane) as fuel for rocket and space technology and the creation of a new generation of stand demonstrator rocket engine” under the Federal Target Program “Research and development in priority areas of scientific and technological complex of Russia for 2014–2020,” as well as the Russian Academy of Sciences (Program No. 26 “Combustion and Explosion”) and Russian Foundation for Basic Research (project No. 15-08-00782).



## References

1. Bykovskii, F. A., and S. A. Zhdan. 2013. *Nepřeryvnaya spinovaya detonatsiya* [Continuous spin detonation]. Izd-vo SB RAS. 423 p.
2. Zhdan, S. A., F. A. Bykovskii, and E. F. Vedernikov. 2007. Mathematical modeling of rotating detonation wave in a hydrogen–oxygen mixture. *Combust. Explo. Shock Waves* 43(4):449–459.
3. Wolanski, P. 2013. Detonative propulsion. *Proc. Combust. Inst.* 34:125–158.
4. Uemuraa, Yu., A. K. Hayashi, A. Asahara, N. Tsuboi, and E. Yamada. 2013. Transverse wave generation mechanism in rotating detonation. *Proc. Combust. Inst.* 34(2):1981–1989.
5. Kailasanath, K., D. A. Schwer. 2014. Numerical simulations of a rotating-detonation-wave engine concept. *Transient combustion and detonation phenomena: Fundamentals and applications*. Eds. G. D. Roy and S. M. Frolov. Moscow: TORUS PRESS. 436–441.
6. Eude, Yo., and D. Davidenko. 2014. Use of the adaptive mesh refinement for continuous detonation simulation. *Transient combustion and detonation phenomena: Fundamentals and applications*. Eds. G. D. Roy and S. M. Frolov. Moscow: TORUS PRESS. 454–463.
7. Wu, D., Y. Liu, Y. Liu, and J. Wang. 2014. Numerical investigations of the restabilization of hydrogen–air rotating detonation engines. *Int. J. Hydrogen Energy* 39(28):15803–15809.
8. Frolov, S. M., A. V. Dubrovskii, and V. S. Ivanov. 2013. Three-dimensional numerical simulation of the operation of a rotating-detonation chamber with separate supply of fuel and oxidizer. *Russ. J. Phys. Chem. B* 7(1):35–43.
9. Dubrovskii, A. V., V. S. Ivanov, and S. M. Frolov. 2015. Trekhmernoe chislennoe modelirovanie rabocheho protsessa v nepreryvno-detonatsionnoy kamere sgoraniya s razdel'noy podachey vodoroda i vozdukha [Three-dimensional numerical simulation of the working process in continuous-detonation combustion chamber with separate supply of hydrogen and air]. *Khim. Fiz.* 34(2):1.
10. Frolov, S. M., V. S. Aksenov, A. V. Dubrovskii, V. S. Ivanov, and I. O. Shamshin. 2015 (in press). Energoeffektivnost' nepreryvno-detonatsionnykh kamer sgoraniya [Energy efficiency of continuous-detonation combustors]. *Fiz. Goreniya Vzryva* 51(2).
11. Aksenov, V. S., P. A. Gusev, V. S. Ivanov, S. N. Medvedev, S. M. Frolov, and I. O. Shamshin. 2014. Eksperimental'nye issledovaniya nepreryvnogo detonatsionnogo goreniya vodoroda v kol'tsevoy kamere sgoraniya [Experimental studies of continuous detonation combustion of hydrogen in an annular combustor]. *Goren. Vzryv (Mosk.) — Combustion and Explosion* 7:121–128.
12. Frolov, S. M., V. S. Aksenov, V. S. Ivanov, and I. O. Shamshin. 2015. Large-scale hydrogen–air continuous detonation combustor. *Int. J. Hydrogen Energy* 40(3):1616–1623.

Received November 1, 2014

## Contributors

**Dubrovskii Alexey V.** (b. 1989) — research engineer, N. N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; specialist, Noncommercial Partnership Center of Pulse Detonation Combustion, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; Ph.D. student, National Research

Nuclear University MEPhI, 31 Kashirskoe Sh., Moscow 115409, Russian Federation; dubrovskii.alex@gmail.com

**Ivanov Vladislav S.** (b. 1986) — Candidate of Science in physics and mathematics, senior research scientist, N. N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; engineer, Noncommercial Partnership Center of Pulse Detonation Combustion, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; ivanov.vls@gmail.com

**Frolov Sergey M.** (b. 1959) — Doctor of Science in physics and mathematics, head of department, N. N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; scientific head, Noncommercial Partnership Center of Pulse Detonation Combustion, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; professor, National Research Nuclear University MEPhI, 31 Kashirskoe Sh., Moscow 115409, Russian Federation; smfrol@chph.ras.ru