

## ГОРЕНИЕ ТОПЛИВНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В ГАЗОВОЙ КАВЕРНЕ ПОД ДНИЩЕМ СКОРОСТНОГО СУДНА

С. М. Фролов<sup>1</sup>, С. В. Платонов<sup>2</sup>, К. А. Авдеев<sup>3</sup>, В. С. Аксёнов<sup>4</sup>, В. С. Иванов<sup>5</sup>,  
А. Э. Зангиев<sup>6</sup>, А. С. Коваль<sup>7</sup>, Ф. С. Фролов<sup>8</sup>

**Аннотация:** Проведено численное исследование возможностей снижения гидродинамического сопротивления и создания дополнительного тягового усилия для судна с искусственной газовой каверной под днищем за счет организации в ней стационарного горения топливно-воздушной смеси. Показано, что подача в каверну топливной смеси и ее последующее сжигание под днищем судна позволяют существенно повысить эффективность каверны по отношению к возникающим горизонтальным и вертикальным составляющим сил, действующих на судно со стороны газов. Результаты работы дают основание полагать, что при соответствующей доработке продольной профилировки днищевых обводов, например создания каскада поперечных реданов, возможно увеличение импульса горизонтальной силы до значений, способных обеспечить движение судна с расчетной скоростью, и отказаться, в перспективе от использования традиционного движителя.

**Ключевые слова:** скоростное судно; искусственная газовая каверна; гидродинамическое сопротивление; горение; импульс горизонтальной силы

### Введение

В литературе имеется множество работ по уменьшению гидродинамического сопротивления движению судов за счет организации под днищем искусственных газовых каверн, частично изолирующих днище от прямого контакта (трения) с водой и обеспечивающих «газовую смазку» с помощью принудительной подачи атмосферного воздуха или выхлопных газов из основной двигательной установки (см., например, [1]). Такие газовые каверны, формируемые под днищем судна за счет продольной и поперечной профилировки его обводов, образующих так называемую камеру воздушной каверны, существенно (на 20%–30%) снижают

\* Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект офи-м № 16-29-01065).

<sup>1</sup>Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, smfrol@chph.ras.ru

<sup>2</sup>Нижний Новгород, platsv@yandex.ru

<sup>3</sup>Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, kaavdeev@mail.ru

<sup>4</sup>Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, v.aksenov@mail.ru

<sup>5</sup>Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, ivanov.vls@gmail.com

<sup>6</sup>Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, sydra777@gmail.com

<sup>7</sup>Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, ASKoval@mephi.ru

<sup>8</sup>Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, f.frolov@chph.ru

гидродинамическое сопротивление судна при малых затратах мощности на подачу газа (не более 3% от мощности главной энергетической установки судна). Снижение полного гидродинамического сопротивления движению судна происходит за счет снижения составляющей сопротивления трения, поскольку уменьшается площадь днища, находящаяся в контакте с водой, а также за счет снижения составляющей остаточного сопротивления, поскольку у судов с каверной кривизна водной поверхности, вытесняемой судном, намного меньше, чем у классических глассеров. При создании современных судов с воздушной каверной на днище одной из основных задач является формирование под днищем судна устойчивой стационарной искусственной газовой каверны заданных размеров, имеющей минимальный расход газа.

В открытой литературе нет упоминаний о работах по организации горения в искусственных газовых кавернах под днищем скоростного судна. Между тем можно ожидать, что при правильной организации стационарного или пульсирующего горения топливной смеси в камере газовой каверны эффект расширения продуктов горения в дополнение к снижению гидродинамического сопротивления приведет к созданию дополнительной движущей/толкающей силы, возникающей в результате истечения струи продуктов горения — реактивной составляющей.

Цель данной работы — численное исследование возможностей снижения гидродинамического сопротивления и создания дополнительного тягового усилия для судна с искусственной газовой каверной под днищем за счет организации в ней стационарного горения топливно-воздушной смеси.

## Постановка задачи

Для простоты рассматривается плоская днищевая выемка треугольного профиля (в диаметральной плоскости судна, рис. 1), ограниченная со стороны носа и бортов кромками днищевых реданов и бортовых скегов (на рис. 1 не показаны). Полная длина зареданной выемки — 1550 мм, а максимальная глубина сразу за реданом — 47 мм. Минимальная высота выемки на кормовом срезе днищевых сводов равна 0. Высота кормового транца равна 109 мм. Начальное положение свободной поверхности воды (при давлении газа в каверне 0,1 МПа) таково, что вода смачивает всю часть днища перед реданом, а кормовой срез зареданного днищевых сводов замыт. Атмосферный воздух или предварительно подготовленная стехиометрическая пропановоздушная смесь подаются в зареданную выемку под избыточным давлением 10, 20 или 40 кПа через щель длиной 33 мм в днищевом своде, образуя искусственную газовую каверну, ограниченную снизу свободной поверхностью воды. Для рассеивания газовой струи, поступающей через щель, внутри выемки параллельно днищевому своду установлена отбойная пластина длиной 48 мм. Зажигание топливно-воздушной смеси производится под рассеивающей пластиной с помощью горячего очага (температура 2000 К, диаметр 3 мм). Для определенности глубина воды в расчетах принималась равной 370 мм, а скорость движения воды

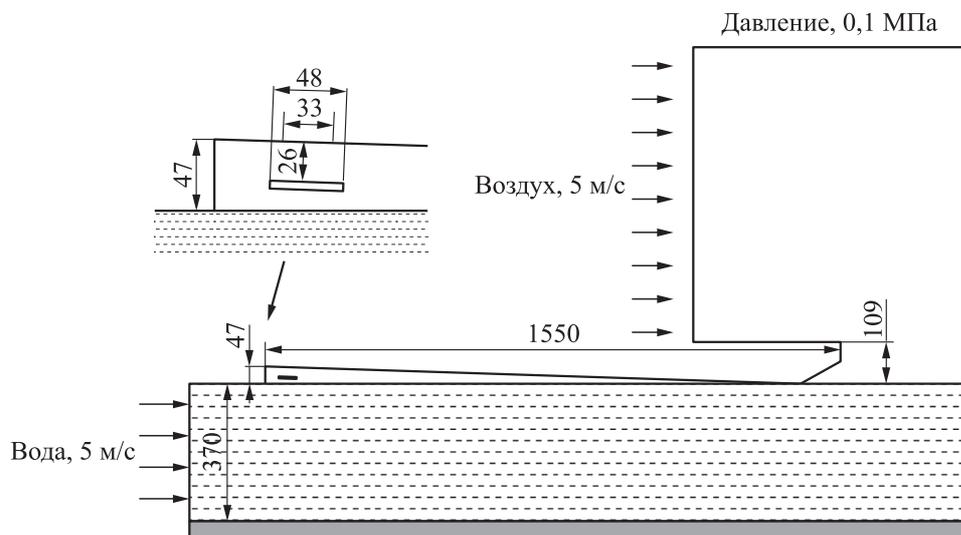


Рис. 1 Геометрия газовой каверны под днищем судна. Размеры указаны в миллиметрах

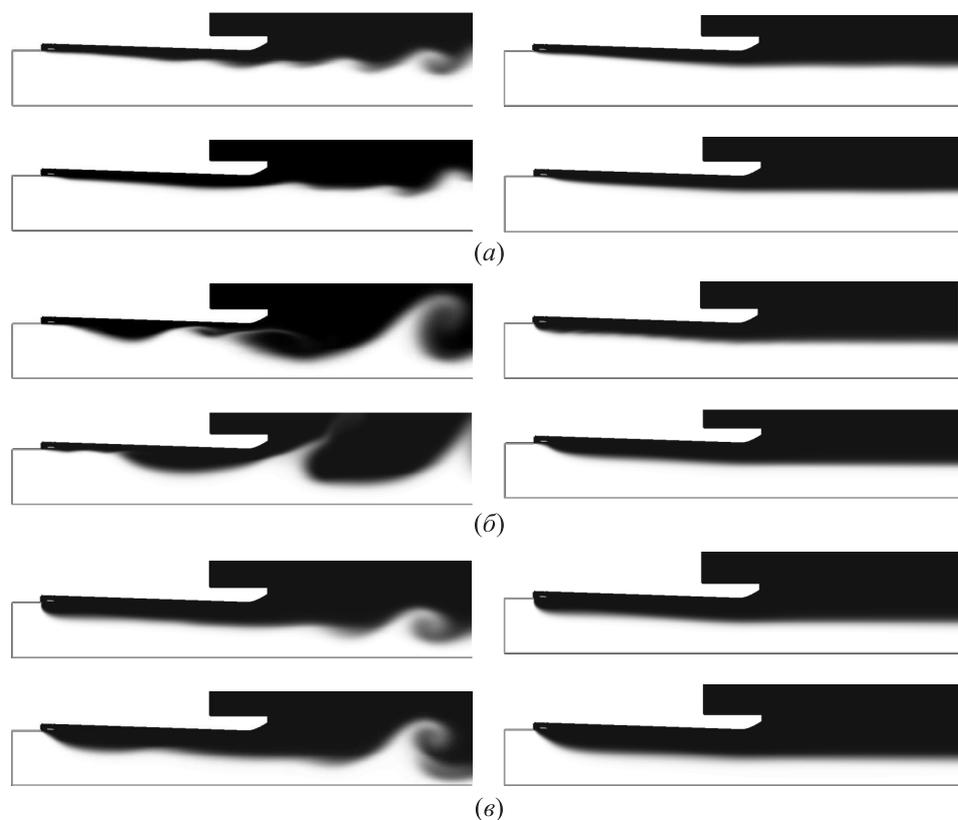
и атмосферного воздуха относительно судна — равной 5 м/с (скорость хода судна равна 5 м/с). Угол атаки постоянный и равен 0. Давление воздуха на внешних границах расчетной области равно 0,1 МПа.

В расчетах определялись установившиеся расходы воздуха и топливной смеси, а также силы, действующие на судно в вертикальном и горизонтальном направлении. В дальнейшем расчеты с подачей в каверну атмосферного воздуха будем называть «холодной» продувкой, а расчеты с подачей в каверну топливной смеси с ее зажиганием и горением будем называть «горячей» продувкой.

Расчеты проводились в двумерном приближении на основе системы дифференциальных уравнений сохранения массы, количества движения и энергии двухфазного вязкого турбулентного реагирующего течения, использованных в работах авторов [2–4]. В отличие от работ [2–4], в которых рассматривались дисперсные течения воды с газовыми пузырьками, в данной работе рассматривались расслоенные течения газовой и конденсированной фаз со свободной поверхностью. Для выделения свободной поверхности использовали численный метод объема жидкости [5]. Для моделирования турбулентности использовали стандартную  $k-\varepsilon$  модель, а горение описывали простейшей моделью распада вихрей [6].

## Результаты расчетов

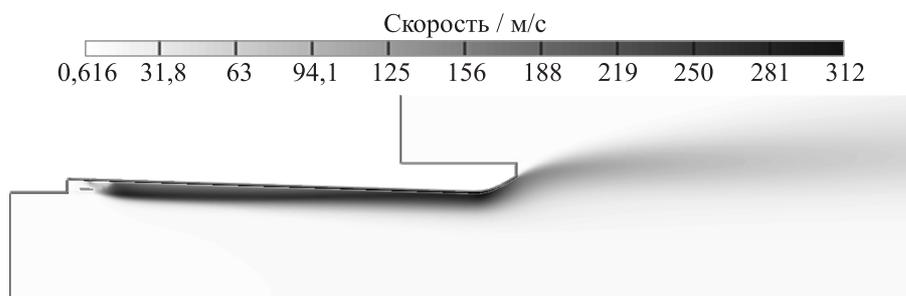
На рис. 2 показаны расчетные распределения массовой доли газа (черный цвет) и воды (белый цвет) через 0,5 и 2 с после начала холодной и горячей продувок



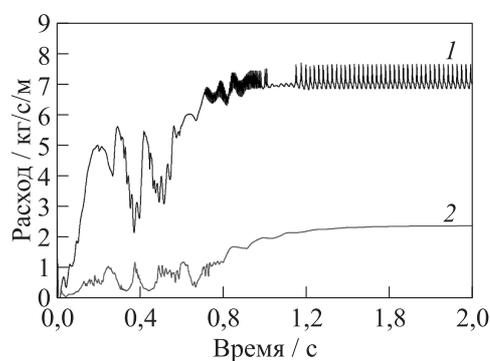
**Рис. 2** Расчетные распределения массовой доли газа (черный цвет) и воды (белый цвет) через 0,5 (левый столбец) и 2 с (правый столбец) после начала холодной (верхние кадры) и горячей (нижние кадры) продувки каверны при разных избыточных давлениях: (а) 10 кПа; (б) 20; (в) 40 кПа

газовой каверны при разных избыточных давлениях. Как и следовало ожидать, с ростом избыточного давления подачи газа в каверну толщина газовой каверны возрастает, причем при горячей продувке она больше, чем при холодной. К моменту времени 0,5 с свободная поверхность воды еще возмущена как внутри выемки, так и за кормой судна, а к моменту времени 2 с свободная поверхность воды внутри выемки и в окрестности кормы становится в обоих случаях практически невозмущенной, а кормовой срез днищевого свода несмоченным, т. е. газ вытекает из каверны с большой скоростью.

На рис. 3 приведен пример расчета скорости газа при горячей продувке каверны с избыточным давлением подачи топливной смеси под днище судна, рав-



**Рис. 3** Расчетное поле скорости газа при горячей продувке каверны под днищем судна с избыточным давлением подачи топливной смеси, равным 20 кПа

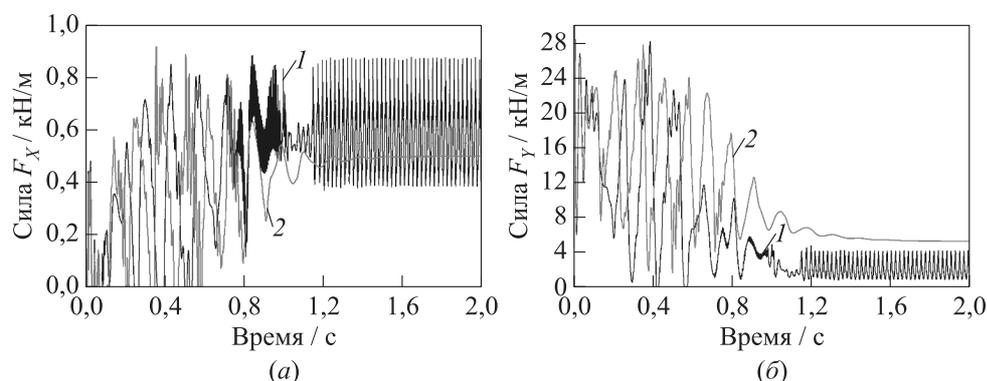


**Рис. 4** Расчетные расходы воздуха/топливной смеси при их подаче в каверну с избыточным давлением 20 кПа: 1 — без горения; 2 — с горением

ным 20 кПа. Скорость истечения продуктов горения через зазор между кормовым срезом днищевого свода и свободной поверхностью воды достигает 300 м/с.

На рис. 4 проведено сравнение расчетных зависимостей расхода газа от времени при холодной (1) и горячей продувке (2) при одинаковом давлении подачи газов, равном 20 кПа. Видно, что в этих условиях установившийся расход топливной смеси приблизительно в 3 раза меньше, чем расход атмосферного воздуха, причем картины течения в обоих случаях почти одинаковы (см. рис. 2, б). Другими словами, горение газа в каверне значительно снижает требования к расходным характеристикам рабочего тела. Кроме того, подача в каверну топливной смеси и ее сжигание под днищем судна приводят к более устойчивому течению в каверне: высокочастотные колебания расхода, вызванные акустическими явлениями, отсутствуют.

На рис. 5 проведено сравнение расчетных зависимостей горизонтальной  $F_X$  (а) и вертикальной  $F_Y$  (б) составляющих сил, действующих на судно со стороны газа



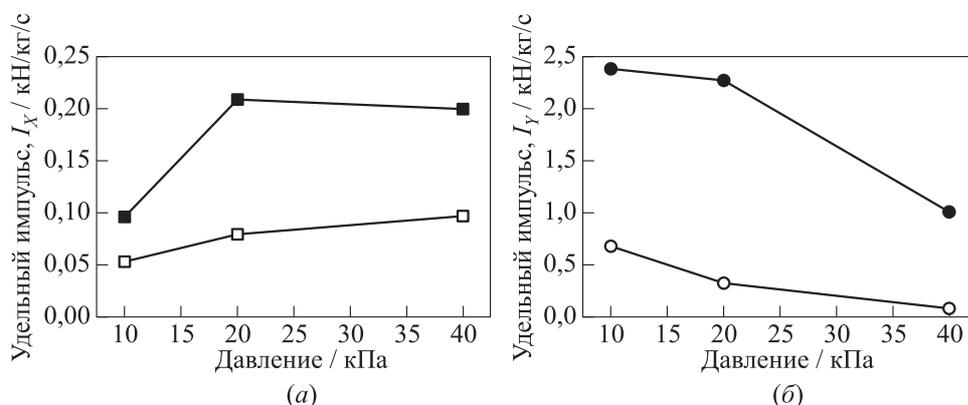
**Рис. 5** Силы, действующие на каверну в горизонтальном (а) и вертикальном направлениях (б) при избыточном давлении подачи воздуха/топливной смеси 20 кПа: 1 — без горения; 2 — с горением

в каверне, при холодной (1) и горячей продувке (2) при избыточном давлении подачи газов, равном 20 кПа. Если горизонтальные составляющие сил оказались приблизительно равны, то вертикальная сила при горячей продувке каверны оказалась приблизительно в 2,5 раза выше, чем при ее холодной продувке. Следует отметить, что подача воздуха в каверну сопровождается ярко выраженными колебаниями сил, вызванными акустическими явлениями.

В таблице приведены итоговые результаты расчетов с разным избыточным давлением подачи воздуха/топливной смеси. Кроме значений расходов и сил, действующих на судно со стороны газа в каверне, в таблице указаны значения удельных импульсов этих сил  $I_x$  и  $I_y$ , равных отношению сил к секунднему расходу рабочего тела — воздуха или топливной смеси. Удельный импульс силы определяет энергоэффективность процесса. Видно, что удельный импульс горизонтальной

Результаты расчетов

Режим		Расход, кг/с/м	Сила, кН/м		Удельный импульс, кН/кг/с	
Избыточное давление, кПа	Продувка		$F_x$	$F_y$	$I_x$	$I_y$
10	холодная	4,32	0,23	2,88	0,053	0,67
	горячая	1,97	0,19	4,71	0,096	2,39
20	холодная	7,08	0,56	2,24	0,079	0,32
	горячая	2,38	0,5	5,42	0,21	2,28
40	холодная	12,1	1,17	0,87	0,097	0,072
	горячая	5,05	0,99	5,04	0,20	1,0



**Рис. 6** Зависимости удельных импульсов сил, действующих на судно со стороны газа в каверне, от избыточного давления подачи газа в каверну без горения (светлые значки) и с горением (черные значки): (а) горизонтальная составляющая; (б) вертикальная составляющая

силы при горячей продувке приблизительно в 2 раза превосходит соответствующее значение при холодной продувке, а удельный импульс вертикальной силы при горячей продувке превосходит соответствующее значение при холодной продувке в 4–14 раз (!) в зависимости от избыточного давления подачи газов в каверну.

Результаты, представленные в таблице, можно представить в виде зависимостей удельных импульсов сил, действующих на судно со стороны газа в каверне, от избыточного давления подачи смеси (рис. 6). Из рис. 6 видно, что горение газа в каверне существенно увеличивает эффективность процесса как по отношению к горизонтальной, так и по отношению к вертикальной силе (ср. черные и светлые значки).

## Заключение

В работе проведено численное исследование возможностей снижения гидродинамического сопротивления и создания дополнительного тягового усилия для судна с искусственной газовой каверной под днищем за счет организации в ней стационарного горения топливно-воздушной смеси. Показано, что подача в каверну топливной смеси и ее последующее сжигание под днищем судна позволяют существенно повысить эффективность каверны по отношению к возникающим горизонтальным и вертикальным составляющим сил, действующих на судно со стороны газов. Полученные результаты дают основание полагать, что при соответствующей доработке продольной профилировки днищевых обводов, например при создании каскада поперечных реданов, возможно увеличение импульса горизонтальной силы до значений, способных обеспечить движение судна с расчетной

скоростью, и отказаться, в перспективе, от использования традиционного двигателя. Учитывая вышеизложенное, а также тот факт, что в последние годы актуальность создания транспортных средств, использующих в качестве основного топлива природный газ (или другое альтернативное горючее), авторы считают необходимым продолжение начатых работ с целью создания скоростного судна, в котором в качестве двигателя вместо гребного винта или в дополнение к гребному винту будет применяться реактивная струя продуктов стационарного горения топливно-воздушной смеси в профилированной искусственной газовой каверне под днищем.

### Литература

1. Бутузов А. А. О предельных параметрах искусственной каверны, образуемой на нижней поверхности горизонтальной стенки // Известия АН СССР, Механика жидкости и газа, 1966. № 2. С. 167–170.
2. Авдеев К. А., Аксёнов В. С., Борисов А. А., Тухватуллина Р. Р., Фролов С. М., Фролов Ф. С. Численное моделирование передачи импульса от ударной волны к пузырьковой среде // Горение и взрыв, 2015. Т. 8. № 2. С. 57–67.
3. Авдеев К. А., Аксёнов В. С., Борисов А. А., Тухватуллина Р. Р., Фролов С. М., Фролов Ф. С. Численное моделирование передачи импульса от ударной волны к пузырьковой среде // Хим. физика, 2015. Т. 34. № 5. С. 34–46.
4. Авдеев К. А., Аксёнов В. С., Борисов А. А., Фролов С. М., Фролов Ф. С., Шамишин И. О. Исследование передачи количества движения от ударной волны к пузырьковой жидкости // Хим. физика, 2015. Т. 34. № 11. С. 27–32.
5. Hirt C. W., Nichols B. D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries // J. Comput. Phys., 1981. Vol. 39. No. 1. P. 201–225.
6. Magnussen B. F., Hjertager B. H. On mathematical modeling of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion // 16th Symposium (International) on Combustion Proceedings. Pittsburg, PA, USA: The Combustion Institute, 1976. P. 719–729.

Поступила в редакцию 15.11.16

---

## COMBUSTION OF FUEL–AIR MIXTURE IN GAS CAVITY UNDER THE BOTTOM OF THE HIGH-SPEED VESSEL

S. M. Frolov<sup>1</sup>, S. V. Platonov<sup>2</sup>, K. A. Avdeev<sup>1</sup>, V. S. Aksenov<sup>1</sup>, V. S. Ivanov<sup>1</sup>,  
A. E. Zangiev<sup>1</sup>, A. S. Koval<sup>1</sup>, and F. S. Frolov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>N. N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation

<sup>2</sup>Nizhniy Novgorod, Russian Federation

**Abstract:** A numerical study of the possibilities to reduce drag and to create additional thrust for the vessel with an artificial gas cavity under the bottom by means of organizing stationary combustion of fuel–air mixture in the cavity has been performed. It is

shown that feeding the fuel mixture in the cavity and its subsequent burning under the bottom of the vessel can significantly increase the efficiency of the cavity with respect to the horizontal and vertical components of forces acting on the vessel by the gases in cavity. The results suggest that appropriate revision of the longitudinal profiling of bottom contours, for example, creating a cascade of transverse redans, may increase the horizontal force to the values, capable of ensuring the vessel to move with the target speed, and refuse in the future from the use of traditional screw propellers.

**Keywords:** high-speed vessel; artificial gas cavity; hydrodynamic drag; combustion; impulse of horizontal force

## Acknowledgments

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project ofi-m 16-29-01065).

## References

1. Butuzov, A. A. 1966. O predel'nykh parametrakh iskusstvennoy kaverny, obrazuemoy na nizhney poverkhnosti gorizontally'noy stenki [On limiting parameters of artificial cavity formed at the lower surface of horizontal plate]. *Izvestiya AN SSSR, Mekhanika Zhidkosti i Gaza* 2:167–170.
2. Avdeev, K. A., V. S. Aksenov, A. A. Borisov, R. R. Tukhvatullina, S. M. Frolov, and F. S. Frolov. 2015. Chislennoe modelirovanie peredachi impul'sa ot udarnoy volny k puzyr'kovoy srede [Numerical modeling of momentum transfer from a shock wave to bubbly medium]. *Goren. Vzryv (Mosk.) — Combustion and Explosion* 8(2):57–67.
3. Avdeev, K. A., V. S. Aksenov, A. A. Borisov, R. R. Tukhvatullina, S. M. Frolov, and F. S. Frolov. 2015. Numerical simulation of momentum transfer from a shock wave to a bubbly medium. *Russ. J. Phys. Chem. B* 9(3):363–374.
4. Avdeev, K. A., V. S. Aksenov, A. A. Borisov, S. M. Frolov, F. S. Frolov, and I. O. Shamshin. Momentum transfer from a shock wave to a bubbly liquid. *Russ. J. Phys. Chem. B* 9(6):895–900.
5. Hirt, C. W., and B. D. Nichols. 1981. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *J. Comput. Phys.* 39(1):201–225.
6. Magnussen, B. F., and B. H. Hjertager. 1976. On mathematical modeling of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion. *16th Symposium (International) on Combustion Proceedings*. Pittsburg, PA: The Combustion Institute. 719–729.

Received November 15, 2016

## Contributors

**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 (Moscow

Engineering Physics Institute), 31 Kashirskoe Sh., Moscow 115409, Russian Federation; smfrol@chph.ras.ru

**Platonov Sergey V.** (b. 1971) — Candidate of Science in technology, Nizhniy Novgorod, Russian Federation; platsv@yandex.ru

**Avdeev Konstantin A.** (b. 1971) — Candidate of Science in technology, specialist, Non-commercial Partnership Center of Pulse Detonation Combustion, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; senior research scientist, N. N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; kaavdeev@mail.ru

**Aksenov Victor S.** (b. 1952) — 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; designer, Noncommercial Partnership Center of Pulse Detonation Combustion, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; associate professor, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), 31 Kashirskoe Sh., Moscow 115409, Russian Federation; v.aksenov@mail.ru

**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; ivanov.vls@gmail.com

**Zangiev Alan E.** (b. 1989) — research engineer, N. N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; sydra777@gmail.com

**Koval' Alexey S.** (b. 1985) — research engineer, N. N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; designer, Noncommercial Partnership Center of Pulse Detonation Combustion, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; senior lectures, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), 31 Kashirskoe Sh., Moscow 115409, Russian Federation; ASKoval@mephi.ru

**Frolov Fedor S.** (b. 1981) — 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; senior specialist, Noncommercial Partnership Center of Pulse Detonation Combustion, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; f.frolov@chph.ru