

ГОРЕНИЕ ТОПЛИВНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В ОБЪЕМЕ НАД СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ ВОДЫ*

С. М. Фролов¹, С. В. Платонов², К. А. Авдеев³, В. С. Аксёнов⁴, В. С. Иванов⁵,
И. А. Садыков⁶, Р. Р. Тухватуллина⁷, Ф. С. Фролов⁸, И. О. Шамшин⁹

Аннотация: Разработаны физико-математическая модель и вычислительная программа для трехмерного расчета горения подготовленной горючей смеси в объеме над свободной поверхностью воды. Для проверки предсказательной способности модели спроектирована и изготовлена лабораторная установка, включающая прозрачную цилиндрическую трубу с одним закрытым концом, бассейн с оптически прозрачным окном, а также системы питания, зажигания, управления и измерений. На установке проведена серия экспериментов по горению стехиометрической пропановоздушной смеси в объеме над свободной поверхностью воды. Проведено прямое сравнение результатов расчетов с экспериментом: по форме и положению фронта пламени и границы раздела сред «газ–вода» в разные моменты времени; по динамике изменения давления в объеме над свободной поверхностью воды и силы, действующей на закрытый конец трубы, а также по перемещению границы раздела сред и по зависимости видимой скорости пламени от времени. Получено удовлетворительное качественное и количественное согласие результатов расчетов и измерений. Разработанную физико-математическую модель в дальнейшем планируется адаптировать к задачам проектирования газовой каверны с горением под днищем катера.

Ключевые слова: горение газа над свободной поверхностью воды; топливно-воздушная смесь; полужамкнутый объем; математическая модель; эксперимент; выталкивающая сила; перемещение границы раздела сред; газовая каверна с горением под днищем катера

DOI: 10.30826/CE19120307

1 Введение

Газовые каверны, формируемые под днищем катера за счет продольной и поперечной профилировки его обводов, могут существенно (на 20%–30%) уменьшить гидродинамическое сопротивление катера благодаря снижению составляющих сопротив-

ления трения и остаточного сопротивления. Одна из задач, решаемых при создании таких катеров, — организация устойчивой работы газовой каверны при минимальном расходе воздуха.

В [1, 2] предложено в дополнение к подаче воздуха подавать в каверну горючее и организовать в ней стационарное непрерывное или пульсиру-

* Работа выполнена за счет субсидии, выделенной ФИЦ ХФ РАН на выполнение государственного задания по теме 0082-2016-0011 «Фундаментальные исследования процессов превращения энергоемких материалов и разработка научных основ управления этими процессами», номер государственной регистрации АААА-А17-117040610346-5, и субсидии, выделенной ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН (выполнение фундаментальных научных исследований ГП 14) по теме № 0065-2019-0005 «Математическое моделирование динамических процессов в деформируемых и реагирующих средах с использованием многопроцессорных вычислительных систем» (номер государственной регистрации АААА-А19-119011590092-6). Работа также выполнена при поддержке РФФИ (проект 16-29-01065офи-м).

¹ Федеральное исследовательское учреждение Российской академии наук; Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ; Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук, smfrol@chph.ras.ru

² АО «ЦМКБ «Алмаз», Санкт-Петербург, platsv@yandex.ru

³ Федеральное исследовательское учреждение Российской академии наук, kaavdeev@mail.ru

⁴ Федеральное исследовательское учреждение Российской академии наук; Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, v.aksenov@mail.ru

⁵ Федеральное исследовательское учреждение Российской академии наук; Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук, ivanov.vls@gmail.com

⁶ Федеральное исследовательское учреждение Российской академии наук, churus1314@rambler.ru

⁷ Федеральное исследовательское учреждение Российской академии наук, tukhvatullinarr@gmail.com

⁸ Федеральное исследовательское учреждение Российской академии наук; Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук, f.frolov@chph.ru

⁹ Федеральное исследовательское учреждение Российской академии наук; Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук, igor_shamshin@mail.ru

ющее горение топливно-воздушной смеси (ТВС) с обеспечением стационарности объема, размеров и формы каверны, а также создания силы, действующей в продольном направлении, достаточной для движения катера. Ожидается, что при правильной организации процесса горения ТВС в газовой каверне тепловое расширение продуктов горения может обеспечить создание дополнительной подъемной/выталкивающей силы, снижающей гидродинамическое сопротивление судна, а также движущей/толкающей силы, возникающей в результате истечения струи продуктов горения — реактивной составляющей. При этом следует иметь в виду, что в отличие от горения ТВС в замкнутом объеме горение в объеме над свободной поверхностью воды может сопровождаться движением и возмущениями границы раздела сред «газ—вода», фазовыми переходами, межфазным теплообменом и другими двухфазными процессами, которые могут оказывать сильное влияние на распространение пламени.

Результаты расчетных и экспериментальных исследований по этой теме опубликованы в [3–5]. В [4] теоретически и экспериментально исследуется выталкивающая сила, создаваемая искусственной газовой каверной сложной формы под днищем катера за счет продувки атмосферным воздухом (без горения). Показано, что предложенная модель двухфазного течения удовлетворительно описывает эксперимент. В [3, 5] проведены эксперименты с горением газовой ТВС в полузамкнутых камерах сгорания простой формы с открытым концом, затопленным в воду. Так, в [3] измерена выталкивающая сила, действующая на стенки цилиндрических камер сгорания при горении стехиометрической пропанокислородной смеси над свободной поверхностью воды. В [5] в той же постановке эксперимента исследуется горение в камерах сгорания разной формы (цилиндр, конус, полусфера, кольцо).

Каких-либо сведений о наличии проверенной расчетной модели/методики, позволяющей адекватно описывать протекание физико-химических процессов в объеме/каверне сложной геометрии с учетом влияния свободной поверхности воды и масштабного фактора, а также предсказывать с приемлемой точностью их характеристики (максимальное давление, скорость нарастания давления, продолжительность пика давления, выталкивающую силу, толкающую силу и др.), на сегодняшний день в литературе нет.

Цель нашей работы — создание и экспериментальная проверка базовой физико-математической модели реагирующего течения в объеме над свободной поверхностью воды. Подразумевается, что разработанная модель может быть адаптирована к за-

дачам проектирования газовой каверны с горением под днищем катера.

2 Физико-математическая модель

Базовая физико-математическая модель турбулентного реагирующего течения в полузамкнутом объеме над свободной поверхностью воды основана на следующих упрощающих допущениях.

1. Горючее находится в газовой фазе.
2. Газовая смесь «горючее—окислитель» предварительно подготовлена.
3. Газовая фаза включает пять компонентов: горючее $C_n H_m$, O_2 , N_2 , CO_2 и H_2O .
4. Газовая фаза подчиняется уравнению состояния идеального газа.
5. Вода — несжимаемая жидкость.
6. Компоненты двухфазной среды «газ—вода» — взаимодействующие взаимопроникающие континуумы, имеющие свои значения скорости, давления, температуры и характеристик турбулентности [6].
7. Межфазный обмен веществом пренебрежимо мал.
8. Межфазный обмен количеством движения и энергией определяется свойствами воды как несущей среды.
9. Давления фаз одинаковы.
10. Горение газовой смеси «горючее—окислитель» в двухфазной среде прекращается, когда объемное содержание воды превышает некоторое пороговое значение.

Допущения 1 и 2 приняты, чтобы исключить из рассмотрения горение струй жидкого горючего. Допущения 3–6 общеприняты. Допущение 7 означает, что характерное время горения настолько мало, что испарение воды под действием теплового потока из газа не успевает оказать существенного влияния на процесс. Допущения 8 и 9 оправданы: включение в рассмотрение внутрифазных диссипативных процессов при одинаковом давлении фаз дает корректную краевую задачу [7]. Эвристическое допущение 10 основано на экспериментальных наблюдениях гашения пламени в плотных водяных завесах [8].

С учетом упрощающих допущений система уравнений сохранения массы, количества движения и энергии для двухфазной среды «газ—вода» с объемными долями фаз α_1 и α_2 соответственно имеет следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \alpha_f \rho_f}{\partial t} + \nabla_k \alpha_f \rho_f \nu_f^k &= 0; \\ \frac{\partial \alpha_1 \rho_1 Y_{fu}}{\partial t} + \nabla_k \alpha_1 Y_{fu} \rho_1 \nu_1^k - \nabla_k \alpha_1 \psi_{fu}^k &= \\ &= \alpha_1 (\dot{\omega}_{fu} + \dot{\omega}_{ign}); \\ \frac{\partial \alpha_1 \rho_1 Y_{fub}}{\partial t} + \nabla_k \alpha_1 Y_{fub} \rho_1 \nu_1^k - \nabla_k \alpha_1 \psi_{fub}^k &= 0; \\ \frac{\partial \alpha_f \rho_f \nu_f^j}{\partial t} + \nabla_k (\alpha_f \rho_f \nu_f^k \nu_f^j + \alpha_f p) - \\ - p \nabla_k \alpha_f - \nabla_k \alpha_f (\tau_f^{jk} + \tau_{t,f}^{jk}) &= M_f^j + \alpha_f \rho_f g^j; \\ \frac{\partial \alpha_f \rho_f h_f}{\partial t} + \nabla_k \alpha_f h_f \rho_f \nu_f^k + \\ + \nabla_k \alpha_f (q_f^k + q_{t,f}^k) - \nabla_k \alpha_f (\tau_f^{jk} + \tau_{t,f}^{jk}) \nu_{j,f} - \\ - \alpha_f \frac{\partial p}{\partial t} &= \alpha_f (\dot{Q} + \dot{Q}_{ign}) + H_f + \alpha_f \rho_f g^j \nu_{j,f}, \end{aligned} \right\} (1)$$

причем объемные доли фаз связаны соотношением:

$$\alpha_2 = 1 - \alpha_1.$$

В уравнениях системы (1) индекс f обозначает газ ($f = 1$) или воду ($f = 2$); α_f , ρ_f и h_f — объемная доля, плотность и полная энтальпия фазы f соответственно; p — давление; g — сила тяжести; Y_{fu} — массовая концентрация несгоревшего горючего; Y_{fub} — суммарная массовая концентрация сгоревшего и несгоревшего горючего; $\mathbf{v}_f = \nu_f^k e_k = \nu_{f,k} e^k$ — скорость фазы f , где e_k и e^k — ковариантный и контравариантный базисы евклидова пространства; τ_f^{jk} — тензор вязких напряжений:

$$\tau_f^{jk} = \left[(\nabla_k \nu_f^j + \nabla_j \nu_f^k) - \frac{2}{3} \nabla_k \nu_f^k \right];$$

τ_f^{jk} — тензор турбулентных напряжений:

$$\tau_f^{jk} = \mu_{t,f} \left[(\nabla_k \nu_f^j + \nabla_j \nu_f^k) - \frac{2}{3} \nabla_k \nu_f^k \right] - \frac{2}{3} \rho_f k_f \delta^{jk},$$

где $\mu_{t,f} = \rho_f C_\mu k_f^2 / \varepsilon_f$ — турбулентная вязкость, k_f и ε_f — турбулентная кинетическая энергия и ее диссипация; $q_f^k = -(\kappa_f / c_{p,f}) \nabla_k h_f$ — тепловой поток, где κ_f — коэффициент теплопроводности, $c_{p,f}$ — теплоемкость при постоянном давлении; $q_{t,f}^k = (\mu_f^t / \sigma_T) \nabla_k h_f$ — турбулентный тепловой поток; $\psi_l^k = D_l \nabla_k Y_l$ — массовый поток, где D_l — коэффициент диффузии ($l = fu, fub$).

Слагаемые $M_1 = -M_2$ и $H_1 - H_2$ в системе (1) описывают межфазный обмен количеством движения и энергией соответственно; \dot{Q} и $\dot{\omega}_{fu}$ — тепловыделение в результате химических реакций и скорость химических превращений соответственно; \dot{Q}_{ign} и $\dot{\omega}_{ign}$ — тепловыделение в результате химических реакций и скорость химических превращений при зажигании соответственно.

Система уравнений (1) дополняется уравнениями состояния для газа и воды:

$$p = \frac{\rho_1 R T_1}{M}; \quad \rho_2 = const,$$

где $M = 1 / \sum_l Y_l / M_l$ — средняя молекулярная масса газа ($L = 5$).

Полная энтальпия фаз h_f определяется из калорического уравнения состояния:

$$h_f = h_{f,0} + \int_{T_{f0}}^{T_f} c_{p,f} dT + \frac{1}{2} \nu_f^2,$$

где T_f — температура фазы, а индекс 0 относится к начальному состоянию.

Соотношения для межфазного обмена количеством движения и энергией определяются так:

$$M_1 = C_D \frac{A \rho_2 |\mathbf{v}_{12}| \mathbf{v}_{12}}{8}; \quad H_1 = Nu_2 \frac{\kappa_2 A (T_1 - T_2)}{d},$$

где C_D — коэффициент межфазного гидродинамического сопротивления; A — удельная межфазная поверхность; Nu_2 — число Нуссельта, определенное по характерному размеру d ; κ_2 — коэффициент теплопроводности воды.

Для моделирования турбулентности используется стандартная $k-\varepsilon$ -модель:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \alpha_f \rho_f k_f}{\partial t} + \nabla_j \alpha_f k_f \rho_f \nu_f^j - \\ - \nabla_k \alpha_f \left(\mu_f + \frac{\mu_{t,f}}{\sigma_K} \right) \nabla_j k_f - \alpha_f P_f &= K_f; \\ \frac{\partial \alpha_f \rho_f \varepsilon_f}{\partial t} + \nabla_j \alpha_f \varepsilon_f \nu_f^j - \\ - \nabla_k \left(\alpha_f \left(\mu_f + \frac{\mu_{t,f}}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla_j \varepsilon_f \right) &= \\ = \alpha_f P_f C_1 \frac{\varepsilon_f}{k_f} - \alpha_f C_2 \rho_f \frac{\varepsilon_f^2}{k_f} + \alpha_f C_4 \rho_f \varepsilon_f \nabla_k \nu_f^k + E_f, \end{aligned}$$

где $P_f = \tau_{t,f}^{jk} \nabla_k \nu_f^j$, а замыкающие коэффициенты модели турбулентности имеют известные значения [9]: $C_\mu = 0,09$; $\sigma_T = 0,9$; $\sigma_K = 1$; $\sigma_\varepsilon = 1,3$; $C_1 = 1,44$; $C_2 = 1,92$; $C_4 = -0,373$.

Для моделирования химического энерговыделения используется модель явного выделения фронта пламени (ЯВП) [10]. В этой модели при заданной начальной сферической форме очага горения поверхность, отделяющая свежую смесь от продуктов горения, представляется в виде набора элементарных площадок ламинарного или турбулентного

пламени. Внутри очага зажигания пламя распространяется с видимой скоростью $U = \sigma u_n$ (σ — коэффициент расширения; u_n — скорость ламинарного пламени), а затем, по достижении границы очага, — со скоростью, определяемой параметрами течения перед фронтом пламени. Каждая площадка фронта пламени в турбулентном потоке движется со скоростью, равной сумме нормальной скорости горения и местной скорости течения. Нормальная скорость горения определяется по одной из известных моделей турбулентного пламени и зависит от местной скорости ламинарного пламени и местных параметров турбулентности. Местные значения скорости течения и параметров турбулентности определяются из решения системы осредненных уравнений течения методом контрольных объемов с использованием специальной процедуры интерполяции. Вследствие того что поле течения нестационарное и неоднородное, очаг горения деформируется. Предполагается, что толщина элемента фронта пламени бесконечно мала по сравнению с характерным размером расчетной ячейки и все химические превращения сосредоточены во фронте, который отделяет продукты горения от свежей смеси. При движении фронта скорость ламинарного пламени считывается из таблиц базы данных, заранее составленных на основе методов, изложенных в [11–14]. В базе данных скорость пламени зависит от начальной температуры, давления и состава смеси, которые определяются по местным параметрам течения перед элементом фронта пламени.

Турбулентные пульсации искривляют фронт пламени. Искривление фронта приводит к увеличению нормальной (турбулентной) скорости распространения фронта горения. В методе ЯВП искривленная поверхность пламени представляется элементами усредненного фронта. Скорость перемещения каждого элемента усредненного фронта пламени складывается из нормальной скорости турбулентного горения u_T и местной средней скорости потока. В литературе существует множество полуэмпирических формул для расчета скорости турбулентного пламени. Классический пример — формула Щёлкина:

$$u_T \approx u_n \sqrt{1 + \frac{u'^2}{u_n^2}}, \quad (2)$$

где u' — локальная интенсивность турбулентности.

В модели ЯВП величины \dot{Q} и $\dot{\omega}$, входящие в систему (1), определяются по изменению объема ТВС, охваченного пламенем за шаг интегрирования по времени [10].

Таким образом, при рассмотрении турбулентного горения вместо скорости ламинарного пламени u_n используется величина u_T . Применение формул типа (2) дает асимптотический переход от турбулентного к ламинарному режиму горения в отсутствие турбулентности ($u' \rightarrow 0$, $u_T \rightarrow u_n$). Это одно из преимуществ модели, которое допускает ее использование для расчета как начальной стадии распространения фронта пламени (когда пламя ламинарное), так и стадии последующего ускорения пламени, когда пламя искривляется за счет конвективного переноса и турбулентности. Следуя допущению 10, горение прекращается ($u_n = 0$), если $\alpha_2 \geq 0,1$.

3 Экспериментальные исследования

Для проверки предсказательной способности модели нами спроектирована и изготовлена лабораторная установка для исследования горения подготовленной ТВС в объеме над свободной поверхностью воды. На рис. 1 показана принципиальная схема лабораторной установки. Основные элементы установки: прозрачная труба (1); бассейн (3), оснащенный оптически прозрачным окном (4); система зажигания; система регистрации параметров процесса (давление, выталкивающая сила, свечение пламени и др.); система управления.

Труба 1 с внутренним диаметром 80 мм и длиной 158 мм выполнена из плексигласа. С одного конца трубы 1 установлена головка 2, выполненная из нержавеющей стали, в которой размещены штуцер напуска предварительно подготовленной ТВС 9, свеча зажигания 10 и датчик давления 11. Бассейн 3 выполнен из листовой нержавеющей стали толщиной 2,5 мм и имеет размеры 1,25 × 1,25 м. Система зажигания включает модуль зажигания 13 с высоковольтным проводом 12.

В состав системы регистрации параметров эксперимента входят: датчик давления Kistler 211B3 11 с собственной частотой 500 кГц, тензодатчик усилия Тензо-М С2Н-2.0-С3 7 с собственной частотой около 10 кГц, усилитель-преобразователь сигналов датчика давления и тензодатчика 14, регистрирующий модуль с аналого-цифровым преобразователем (АЦП) 15, компьютер 17 и скоростная видеокамера 18. Система измерения выталкивающей силы включает неподвижную опору 5, к которой крепится штанга тензодатчика 6 с тензодатчиком 7 и кронштейном (8), к которому подвешена труба (1). Система управления 16 включает блок управления модулем зажигания 13 и обеспечива-

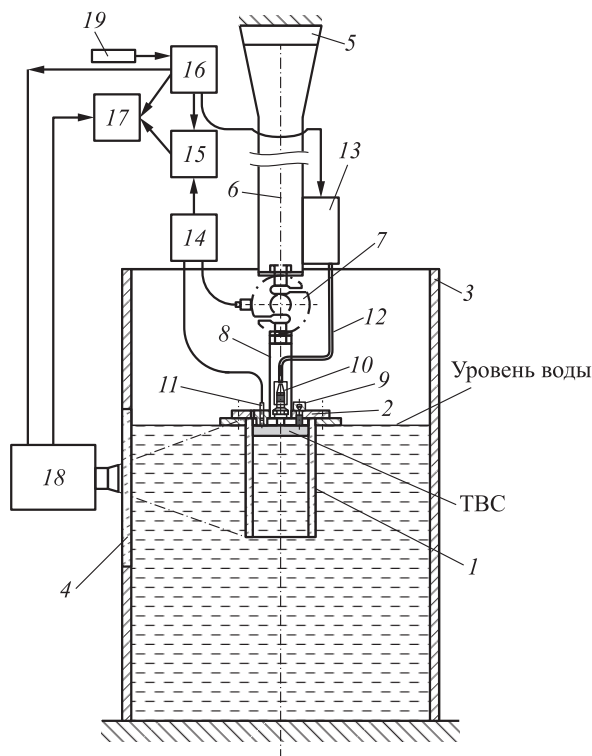


Рис. 1 Принципиальная схема лабораторной установки: 1 — труба; 2 — головка трубы; 3 — бассейн; 4 — оптически прозрачное окно; 5 — опора; 6 — штанга тензодатчика; 7 — тензорезистивный датчик; 8 — кронштейн тензодатчика; 9 — штуцер напуска ТВС; 10 — свеча зажигания; 11 — датчик давления; 12 — высоковольтный провод; 13 — модуль зажигания; 14 — усилитель-преобразователь сигналов датчика давления и тензодатчика; 15 — регистрирующий модуль с АЦП; 16 — система управления; 17 — компьютер; 18 — скоростная видеокамера; 19 — пусковое устройство

ет синхронизацию видеозаписи с моментом начала процесса в трубе 1.

Эксперимент проводится следующим образом. Бассейн 3 заполняется водой до уровня, когда вода касается нижней поверхности головки 2. Затем труба 1 заполняется стехиометрической пропановоздушной смесью объемом 60 ± 1 мл через штуцер напуска 9. До проведения эксперимента ТВС выдерживается не менее суток в баллоне объемом 10 л. После заполнения трубы 1 смесью выдерживается пауза, которая необходима для затухания возмущений водной поверхности, вызванных напуском смеси. Затем на систему управления 16 с помощью пускового устройства 19 подается команда на запуск. При получении этой команды система управления 16 запускает блок зажигания, регистрирующий модуль с АЦП и видеорегистрацию процесса

в трубе 1. Процесс горения ТВС в трубе 1 инициируется искровым разрядом свечи зажигания 10.

В экспериментах проводится видеорегистрация распространения пламени и движения границы раздела сред. По кадрам видеорегистрации определяются форма и положение фронта пламени и границы раздела сред, а также зависимости перемещения границы раздела сред и видимой скорости пламени от времени. Кроме того, в экспериментах измеряются давление в объеме над свободной поверхностью воды и выталкивающая сила, действующая на головку 2. Ниже проведено сравнение расчетов по модели, описанной выше, с полученными экспериментальными данными.

4 Сравнение расчетов с экспериментом

Система определяющих уравнений базовой физико-математической модели решается численно по методике [7], основанной на сегрегированном алгоритме типа SIMPLE [15] (semiimplicit method for pressure linked equations). Конвективный перенос в законах сохранения массы и количества движения фаз аппроксимируется центральной разностью, а для остальных уравнений используется стандартная схема UPWIND первого порядка точности. Градиенты, отнесенные к центру расчетной ячейки, аппроксимируются методом наименьших квадратов [16]. Для вычисления производной по времени используется метод Эйлера первого порядка точности.

На рис. 2 показана трехмерная расчетная область, соответствующая эксперименту. Для упрощения задачи расчет проводится лишь для «половины» трубы. В начальный момент времени во всей расчетной области задаются нормальные условия с учетом гидростатического давления в столбе

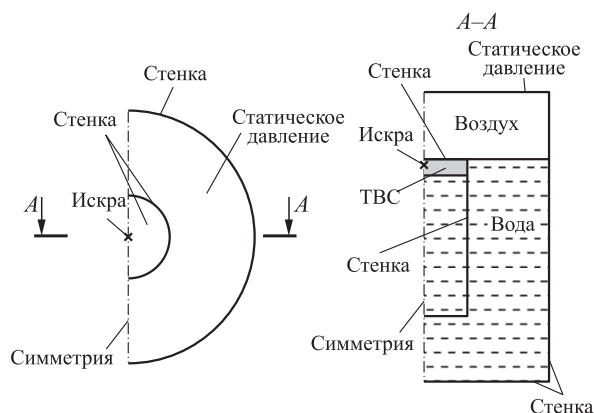


Рис. 2 Схема расчетной области

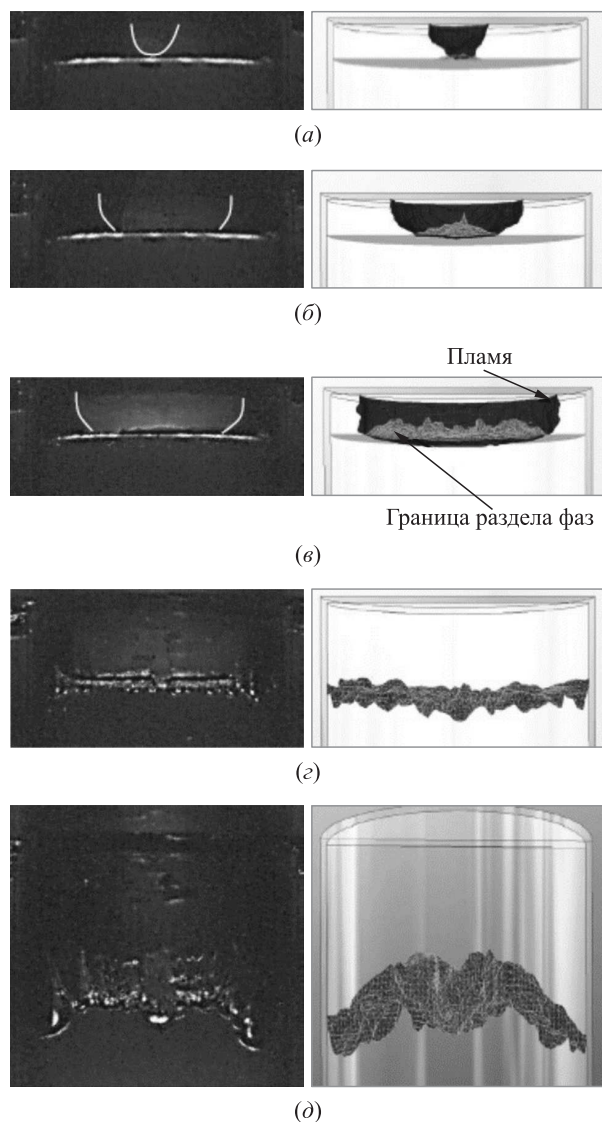


Рис. 3 Сравнение экспериментальных (слева) и расчетных (справа) изображений фронта пламени и границы раздела фаз: (а) $t = 3$ мс; (б) 7; (в) 12; (г) 22; (д) $t = 32$ мс. Для экспериментальных изображений: кривые белого цвета — внешний контур пламени. Для расчетных изображений: поверхность черного цвета — фронт пламени; поверхность серого цвета — граница раздела сред

воды. Объем над свободной поверхностью воды заполнен покоящейся стехиометрической пропановоздушной смесью. На границах расчетной области задаются граничные условия типа «стенка», «статическое давление» или «симметрия» в соответствии со схемой, показанной на рис. 2. Центр очага зажигания располагается в точке, соответствующей положению межэлектродного зазора свечи зажигания в эксперименте (строго по центру верхней

стенки трубы). Очаг зажигания в расчете имеет диаметр 3 мм. Расчетная сетка неравномерная и содержит 260 000 ячеек. Ячейки с минимальным размером (0,75 мм) сосредоточены в окрестности очага зажигания. Расчеты по определению сеточной чувствительности результатов показали, что дальнейшее измельчение расчетной сетки почти не влияет на получаемые результаты.

На рис. 3 приведено сравнение расчетных и экспериментальных изображений фронта пламени и границы раздела сред. В расчете за границу раздела сред принимается изоповерхность, соответствующая объемному содержанию воды $\alpha_2 = 0,5$. Видно, что в целом расчет хорошо воспроизводит положение фронта пламени, а также положение и форму границы раздела сред. Некоторые отличия в форме фронта пламени наблюдаются лишь на начальных этапах его распространения (см. рис. 3, а и 3, б). В расчете, как и в эксперименте, вследствие неравномерности течения за фронтом пламени на границе раздела сред появляются возмущения (см. рис. 3, в). Вследствие догорания значительного объема ТВС у стенок трубы в периферийных областях трубы наблюдается «выдавливание» газовых пузырей (см. рис. 3, г и 3, д). Расширение продуктов горения от фронта пламени к оси трубы приводит к «выдавливанию» пузыря в центре трубы (см. рис. 3, д). Интересно, что в процессе всего расчета интенсивность турбулентности в рассматриваемом газовом объеме над свободной поверхностью воды мала, а расчетная местная скорость пламени u_T близка к местной скорости ламинарного пламени u_n . Это обстоятельство, очевидно, зависит от величины газового объема над свободной поверхностью воды.

На рис. 4 приведено сравнение экспериментальных (представлены 5 экспериментов, проведенных при одинаковых начальных условиях) и расчетных зависимостей давления на головке трубы (рис. 4, а) и выталкивающей силы, действующей на головку трубы (рис. 4, б), от времени. Отметим, что датчики давления и силы имеют существенно разные собственные частоты, что отражается на характере экспериментальных кривых (на рис. 4, б острые пики отсутствуют). Видно, что экспериментальные и расчетные кривые в целом удовлетворительно согласуются друг с другом как на рис. 4, а, так и на рис. 4, б. Расчет хорошо воспроизводит длительность и амплитуду первого («положительного») импульса давления и силы, вызванного сгоранием ТВС, а также длительность и амплитуду первого «отрицательного» импульса давления и силы, вызванного расширением газового объема вследствие движения границы раздела сред. Инерционное перерасширение газового объема приво-

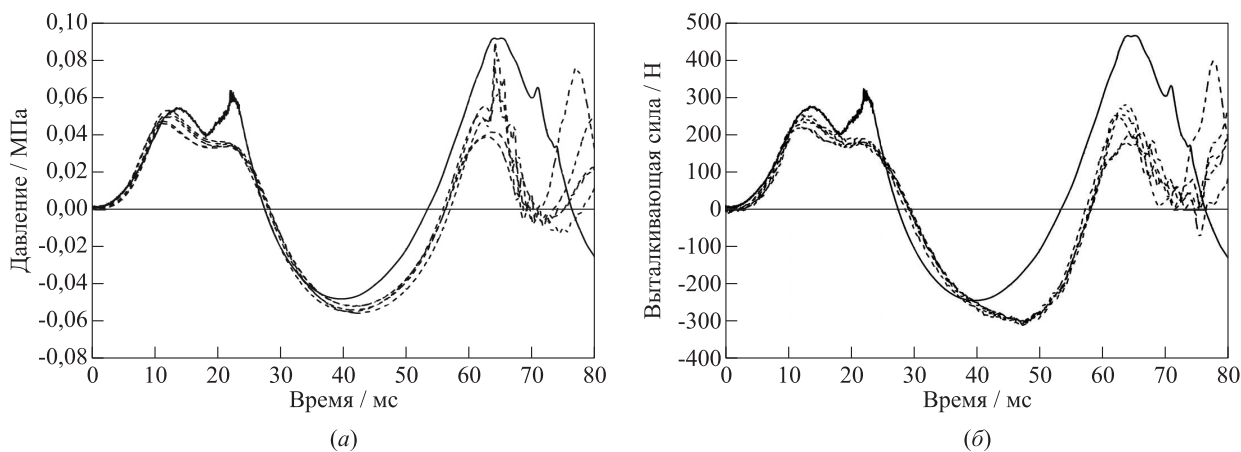


Рис. 4 Сравнение экспериментальных (штриховые кривые, 5 экспериментов в одинаковых условиях) и расчетных (сплошные кривые) зависимостей давления на головке трубы (а) и выталкивающей силы, действующей на головку трубы (б), от времени

дит к обратному движению границы раздела сред («схлопыванию» газового объема) и появлению второго «положительного» импульса давления и силы. Дальнейшая расчетная динамика давления в объеме начинает заметно отличаться от измеренной. Наблюдаемые отличия, по-видимому, связаны с выходом газовых пузырей из погруженной части трубы наружу, через ее края, — эффекта, который не моделируется в рамках концепции взаимопроникающих континуумов.

Интересно, что первый положительный импульс давления и силы как в расчете, так и в эксперименте имеет два максимума. Первый максимум давления и силы, возникающий в момент времени $t = 14$ мс, связан с конкуренцией процессов тепловыделения в пламени, с одной стороны, и расширением объема, с другой стороны. В промежутке

времени $t = 14–18$ мс фронт пламени вплотную приближается к боковой стенке трубы. Второй максимум давления и силы возникает в момент времени $t = 22$ мс и также обусловлен конкуренцией процессов тепловыделения на конечной стадии сгорания большого пристеночного объема газа и активным выдавливанием границы раздела сред на периферии трубы.

На рис. 5 показано сравнение расчетных и экспериментальных зависимостей перемещения границы раздела сред (рис. 5, а) и видимой скорости фронта пламени (рис. 5, б) от времени. Серые линии на рис. 5, б соответствуют расчетной видимой скорости пламени, рассчитанной вдоль трех различных лучей, идущих из точки зажигания к стенке трубы. Черная сплошная кривая на рис. 5, б соответствует усредненной видимой скорости фронта

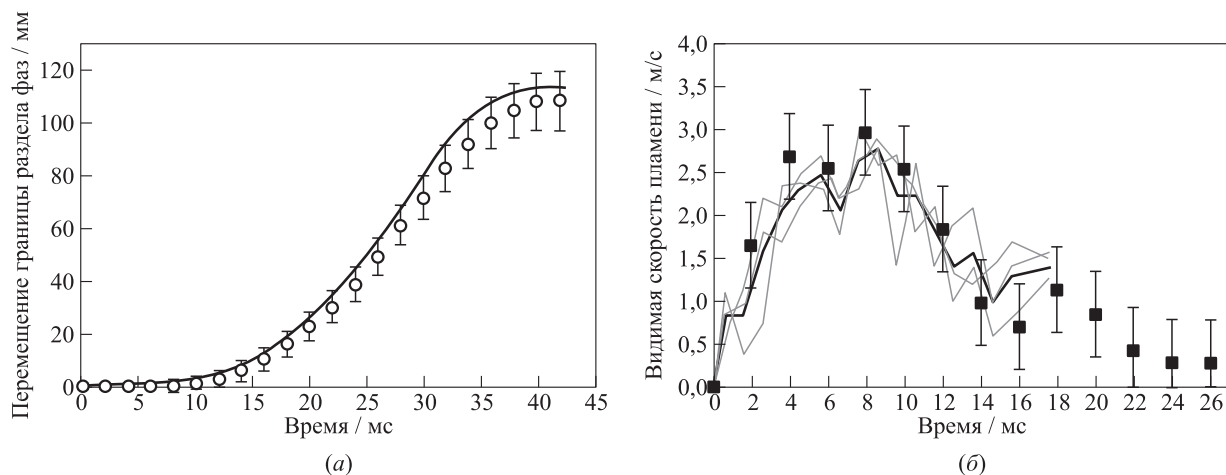


Рис. 5 Сравнение расчетных (кривые) и измеренных (значки с указанием ошибки измерений) зависимостей перемещений границы раздела сред (а) и видимой скорости фронта пламени (б) от времени

пламени. Из рис. 5 следует, что предложенная базовая физико-математическая модель удовлетворительно (качественно и количественно) описывает процесс горения в объеме над свободной поверхностью воды.

5 Заключение

Таким образом, нами разработана базовая физико-математическая модель и вычислительная программа для трехмерного расчета горения подготовленной горючей смеси в объеме над свободной поверхностью воды. Чтобы проверить предсказательную способность модели, нами спроектирована и изготовлена лабораторная установка, включающая прозрачную цилиндрическую трубу с одним закрытым концом, бассейн с оптически прозрачным окном, а также системы питания, зажигания, управления и регистрации параметров процесса. На лабораторной установке проведена серия экспериментов по горению стехиометрической пропановоздушной смеси в объеме над свободной поверхностью воды. Условия экспериментов полностью воспроизведены в расчетах. Проведено прямое сравнение результатов расчетов с экспериментом: по форме и положению фронта пламени и границы раздела сред в разные моменты времени, по изменению давления в объеме над свободной поверхностью воды, по динамике перемещения границы раздела сред и по зависимости видимой скорости пламени от времени. Во всех случаях получено удовлетворительное качественное и количественное согласие расчетов с измерениями. В дальнейшем разработанную физико-математическую модель планируется адаптировать к задачам проектирования газовой каверны с горением под днищем катера. В таких задачах потребуется дополнительно рассматривать направленное движение воды с учетом обводов днища катера и формы газовой каверны.

Литература

1. Фролов С. М., Платонов С. В., Авдеев К. А., Аксёнов В. С., Иванов В. С., Зангиев А. Э., Коваль А. С., Фролов Ф. С. Горение топливно-воздушной смеси в газовой каверне под днищем скоростного судна // Горение и взрыв, 2016. Т. 9. № 4. С. 12–21.
2. Фролов С. М., Платонов С. В. Способ снижения гидродинамического сопротивления движению судна. Патент РФ 2653664, 11.05.2018.
3. Medvedev R. N., Drozhzhin A. P., Teslenko V. S. Thrust generation by pulse combustion of gas in a submerged chamber // Int. J. Multiphas. Flow, 2016. Vol. 83. P. 232–238.
4. Фролов С. М., Платонов С. В., Авдеев К. А., Аксёнов В. С., Зангиев А. Э., Садыков И. А., Шамшин И. О. Численное и экспериментальное исследование подъемной силы, создаваемой искусственной газовой каверной под днищем катера // Горение и взрыв, 2018. Т. 11. № 3. С. 60–73. doi: 10.30826/CE18110308.
5. Тесленко В. С., Дрожжин А. П., Медведев Р. Н. 2017. Сжигание газов в воде для генерации тяги // Теплофизика и аэромеханика, 2017. Т. 24. № 4. С. 599–608.
6. Нугматулин Р. И. Динамика многофазных сред. Ч. I. — М.: Наука, 1987. 464 с.
7. Frolov S. M., Avdeev K. A., Aksenov V. S., Borisov A. A., Frolov F. S., Shamshin I. O., Tukhvatullina R. R., Basara B., Edelbauer W., Pachler K. Experimental and computational studies of shock wave-to-bubbly water momentum transfer // Int. J. Multiphas. Flow, 2017. Vol. 92. P. 20–38. doi: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2017.01.016.
8. Sapko M. J., Furmo A. L., Kuchita J. M. Quenching methane-air ignitions with water sprays. U.S. Bureau of Mines, 1977. Investigation Report 8214.
9. Launder B. E., Spalding D. B. The numerical computation of turbulent flows // Comput. Method. Appl. M., 1974. Vol. 3. No. 2. P. 269–289. doi: 10.1016/0045-7825(74)90029-2.
10. Frolov S. M., Ivanov V. S., Basara B., Suffa M. Numerical simulation of flame propagation and localized preflame autoignition in enclosures // J. Loss Prevent. Proc., 2013. Vol. 26. P. 302–309. doi: 10.1016/j.jlp.2011.09.007.
11. Беляев А. А., Басевич В. Я., Фролов Ф. С., Фролов С. М., Басара Б., Суффа М. База данных для характеристик ламинарного горения н-гептана // Горение и взрыв, 2010. Т. 3. С. 30–37.
12. Иванов В. С., Фролов С. М. Математическое моделирование распространения пламени в гладких трубах и трубах с регулярными препятствиями // Пожаровзрывобезопасность, 2010. Т. 19. № 1. С. 14–19.
13. Беляев А. А., Басевич В. Я., Фролов С. М., Фролов Ф. С. База данных для характеристик ламинарного горения воздушных смесей метана и водорода в присутствии паров воды // Горение и взрыв, 2012. Т. 5. С. 3–10.
14. Беляев А. А., Басевич В. Я., Фролов С. М. База данных для расчета ламинарного и турбулентного горения воздушных смесей авиационного керосина // Горение и взрыв, 2015. Т. 8. Вып. 1. С. 29–36.
15. Patankar S. V., Spalding D. B. A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows // Int. J. Heat Mass Tran., 1972. Vol. 15. No. 1. P. 1510–1520.
16. Barth T. J. Aspects of unstructured grids and finite-volume solvers for the Euler and Navier–Stokes equations // Special course on unstructured grid methods for advection dominated flows. — AGARD, 1992. 61 p.

Поступила в редакцию 28.10.19

COMBUSTION OF THE FUEL–AIR MIXTURE IN THE VOLUME OVER THE FREE WATER SURFACE

S. M. Frolov^{1,2,3}, S. V. Platonov⁴, K. A. Avdeev¹, V. S. Aksenov^{1,2}, V. S. Ivanov^{1,3}, I. A. Sadykov¹, R. R. Tikhvatullina¹, F. S. Frolov^{1,3}, and I. O. Shamshin^{1,3}

¹N. N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation

²National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), 31 Kashirskoe Sh., Moscow 115409, Russian Federation

³Scientific Research Institute for System Analysis, Russian Academy of Sciences, 36-1 Nakhimovskii Prosp., Moscow 117218, Russian Federation

⁴“Almaz” Central Marine Design Bureau, 50 Warshavskaya Str., St. Petersburg 196128, Russian Federation

Abstract: A physical and mathematical model and a computer program has been developed for three-dimensional calculation of premixed combustion of gaseous fuel–air mixture in a volume above the free surface of water. To test the predictive capability of the model, a laboratory setup was designed and manufactured, including a transparent cylindrical tube with one closed end, a water pool with an optical access, as well as power, ignition, control, and data acquisition systems. A series of experiments on combustion of a stoichiometric propane–air mixture in a volume above a free surface of water is carried out at the setup. The experimental conditions are reproduced in the calculations. The calculation results are compared with the experiment in terms of the shape and position of the flame front and the interphase boundary at different time instants, time histories of pressure in the volume above the free surface of water and the propulsive force acting on the closed end of the tube, the dynamics of displacement of the interphase boundary, and the dependence of the apparent flame velocity on time. In all cases, satisfactory qualitative and quantitative agreement has been obtained between calculations and measurements. The model is further planned to be adapted to the tasks of designing a gas cavity with combustion under the bottom of the boat.

Keywords: gas combustion above a free surface of water; fuel–air mixture; semiconfined volume; mathematical model; experiment; buoyancy force; motion of the phase boundary; gas cavity with combustion under the bottom of the boat

DOI: 10.30826/CE19120307

Acknowledgments

This work was supported by the subsidy given to the N. N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences to implement the state assignment on the topic No.0082-2016-0011 “Fundamental studies of conversion processes of energetic materials and development of scientific grounds of controlling these processes” (Registration No. AAAA-A17-117040610346-5) and to the Scientific Research Institute for System Analysis to implement the state assignment on the topic No.0065-2019-0005 “Mathematical modeling of dynamic processes in deformed and reactive media using multiprocessor computational systems” (Registration No. AAAA-A19-119011590092-6). The work was also supported by the Russian Foundation for Basic Research (project 16-29-01065ofi-m).

References

1. Frolov, S. M., S. V. Platonov, K. A. Avdeev, V. S. Aksenov, V. S. Ivanov, A. E. Zangiev, A. S. Koval', and F. S. Frolov. 2016. Gorenje toplivno-vozdushnoy smesi v gazovoy kaverne pod dnishchem skorostnogo sudna [Combustion of fuel–air mixture in gas cavity under the bottom of the high-speed vessel]. *Goren. Vzryv (Mosk.) — Combustion and Explosion* 9(4):12–21.
2. Frolov, S. M., and S. V. Platonov. 11.05.2018. Sposob snizheniya gidrodinamicheskogo soprotivleniya dvizheniyu sudna [Method of hydrodynamic vessel movement resistance reduction and the device for its implementation]. Patent of Russian Federation RU 2653664.
3. Medvedev, R. N., A. P. Drozhzhin, and V. S. Teslenko. 2016. Thrust generation by pulse combustion of gas in a submerged chamber. *Int. J. Multiphas. Flow* 83:232–238.
4. Frolov, S. M., S. V. Platonov, K. A. Avdeev, V. S. Aksenov, A. E. Zangiev, I. A. Sadykov, and I. O. Shamshin. 2018. Chislennoe i experimental'noe issledovanie pod'emnoy sily, sozdavaemoy iskusstvennoy gazovoy kavernoy pod dnishchem katera [Numerical and experimental investigation of the lift force created by an artificial gas cavity under the bottom of the boat]. *Goren. Vzryv*

- (Mosk.) — *Combustion and Explosion* 11(3):60–73. doi: 10.30826/CE18110308.
5. Teslenko, V. S., A. P. Drozhzhin, and R. N. Medvedev. 2017. In-water gas combustion for thrust production. *Thermophys. Aeromech.* 24:583–591. doi: 10.1134/S0869864317040102.
 6. Nigmatulin, R. I. 1990. *Dynamics of multiphase media*. New York, NY: Hemisphere. Vol. 1. 532 p.
 7. Frolov, S. M., K. A. Avdeev, V. S. Aksenov, A. A. Borisov, F. S. Frolov, I. O. Shamshin, R. R. Tukhvatullina, B. Basara, W. Edelbauer, and K. Pachler. 2017. Experimental and computational studies of shock wave-to-bubbly water momentum transfer. *Int. J. Multiphase Flow* 92:20–38. doi: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2017.01.016.
 8. Sapko, M. J., A. L. Furmo, and J. M. Kuchita. 1977. Quenching methane–air ignitions with water sprays. U.S. Bureau of Mines. Investigation Report 8214.
 9. Launder, B. E., and D. B. Spalding. 1974. The numerical computation of turbulent flows. *Comput. Method. Appl. M.* 3(2):269–289. doi: 10.1016/0045-7825(74)90029-2.
 10. Frolov, S. M., V. S. Ivanov, B. Basara, and M. Suffa. 2013. Numerical simulation of flame propagation and localized preflame autoignition in enclosures. *J. Loss Prevent. Proc.* 26:302–309. doi: 10.1016/j.jlp.2011.09.007.
 11. Belyaev, A. A., V. Ya. Basevich, F. S. Frolov, S. M. Frolov, B. Basara, and M. Suffa. 2010. Baza dannykh dlya kharakteristik laminarnogo goreniya n-heptana [Database for the characteristics of laminar combustion of n-heptane]. *Goren. Vzryv (Mosk.) — Combustion and Explosion* 3:30–37.
 12. Ivanov, V. S., and S. M. Frolov. 2010. Matematicheskoe modelirovanie rasprostraneniya plameni v gladkikh trubakh i trubakh s reguljarnymi prepyatstviyami [Mathematical modeling of flame spread in plain tubes and in tubes with regular hindrances]. *Pozharovzryvbezopasnost' [Fire and Explosion Safety]* 19(1):14–19.
 13. Belyaev, A. A., V. Ya. Basevich, S. M. Frolov, and F. S. Frolov. 2012. Baza dannykh dlya kharakteristik laminarnogo goreniya vozdushnykh smesey metana i vodoroda v prisutstvii parov vody [Database for characteristics of laminar combustion of methane– and hydrogen–air mixtures in presence of steam]. *Goren. Vzryv (Mosk.) — Combustion and Explosion* 5:3–10.
 14. Belyaev, A. A., V. Ya. Basevich, and S. M. Frolov. 2015. Baza dannykh dlya rascheta laminarnogo i turbulentnogo goreniya vozdushnykh smesey aviatsionnogo kerosina [Database for calculating laminar and turbulent combustion of aviation kerosene–air mixtures]. *Goren. Vzryv (Mosk.) — Combustion and Explosion* 8(1):29–36.
 15. Patankar, S. V., and D. B. Spalding. 1972. A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows. *Int. J. Heat Mass Tran.* 15(1):1510–1520.
 16. Barth, T. J. 1992. Aspects of unstructured grids and finite-volume solvers for the Euler and Navier–Stokes equations. *Special course on unstructured grid methods for advection dominated flows*. AGARD. 61 p.

Received October 28, 2019

Contributors

Frolov Sergey M. (b. 1959) — Doctor of Science in physics and mathematics, head of department, head of laboratory, N. N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; professor, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), 31 Kashirskoe Sh., Moscow 115409, Russian Federation; senior research scientist, Scientific Research Institute for System Analysis, Russian Academy of Sciences, 36-1 Nakhimovskii Prosp., Moscow 117218, Russian Federation; smfrol@chph.ras.ru

Platonov Sergey V. (b. 1971) — Candidate of Science in technology, chief designer, “Almaz” Central Marine Design Bureau, 50 Warshavskaya Str., St. Petersburg 196128, Russian Federation; platsv@yandex.ru

Avdeev Konstantin A. (b. 1971) — Candidate of Science in technology, leading research scientist, N. N. Semenov Federal Research Center for 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 Federal Research Center for Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, 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) — Doctor of Science in physics and mathematics, senior research scientist, N. N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; research scientist, Scientific Research Institute for System Analysis, Russian Academy of Sciences, 36-1 Nakhimovskii Prosp., Moscow 117218, Russian Federation; ivanov.vls@gmail.com

Sadykov Ilyas A. (b. 1993) — junior research scientist, N. N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; churus1314@rambler.ru

Tukhvatullina Ruzana R. (b. 1988) — Candidate of Science in physics and mathematics, research scientist, N. N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; tukhvatullinarr@gmail.com

Frolov Fedor S. (b. 1981) — Candidate of Science in physics and mathematics, senior research scientist, N. N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; research scientist, Scientific Research Institute for System Studies, Russian Academy of Sciences, 36-1 Nakhimovskii Prosp., Moscow 117218, Russian Federation; f.frolov@chph.ru

Shamshin Igor O. (b. 1975) — Candidate of Science in physics and mathematics, senior research scientist, N. N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; research scientist, Scientific Research Institute for System Analysis, Russian Academy of Sciences, 36-1 Nakhimovskii Prosp., Moscow 117218, Russian Federation; igor_shamshin@mail.ru