

## ГОРЕНИЕ ТОПЛИВНОЙ СМЕСИ В ДНИЩЕВОЙ КАВЕРНЕ СУДНА: ЭКСПЕРИМЕНТ И РАСЧЕТ\*

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>, И. А. Садыков<sup>7</sup>, Р. Р. Тухватулина<sup>8</sup>, Ф. С. Фролов<sup>9</sup>, И. О. Шамшин<sup>10</sup>

**Аннотация:** Проведены экспериментальные исследования процессов пульсирующего горения пропано-воздушной смеси в модельной днищевой каверне судна (без обводов судна), погруженной в бассейн с покоящейся водой. В экспериментах регистрировались расходы воздуха и горючего, распространение пламени, а также выталкивающая и толкающая силы, действующие на модельную каверну. Результаты экспериментов сравниваются с результатами трехмерных расчетов, основанных на физико-математической модели горения подготовленной горючей смеси в полузамкнутом объеме над свободной поверхностью воды, разработанной ранее: по форме и положению фронта пламени и границы раздела сред «газ–вода» в разные моменты времени и по динамике изменения сил, действующих на днище и на редан каверны. Получено удовлетворительное качественное и количественное согласие результатов расчетов и измерений.

**Ключевые слова:** судно с газовой каверной; топливно-воздушная смесь; горение в каверне; эксперимент; математическая модель; распространение пламени; толкающая сила; выталкивающая сила

**DOI:** 10.30826/CE19120408

### Введение

Газовая каверна, формируемая под днищем судна за счет профилировки его обводов, может существенно уменьшить его гидродинамическое сопротивление за счет снижения составляющих сопротивления трения. В [1, 2] впервые предложено организовать в газовой каверне стационарное или пульсирующее горение топливно-воздушной

смеси (ТВС) с обеспечением стационарности объема, размеров и формы газовой каверны.

При правильной организации процесса горения ТВС в газовой каверне тепловое расширение продуктов горения может обеспечить создание дополнительной вертикальной (выталкивающей) силы, снижающей площадь контакта днища судна с водой, а также горизонтальной (толкающей) силы, возникающей в результате истечения струи продук-

\* 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).

<sup>1</sup> Федеральное исследовательское учреждение «Центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук»; Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ; Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук; Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»; Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А. Г. Мержанова, smfrol@chph.ras.ru

<sup>2</sup> АО «ЦМКБ «Алмаз», Санкт-Петербург, platsv@yandex.ru

<sup>3</sup> Федеральное исследовательское учреждение «Центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, kaavdeev@mail.ru

<sup>4</sup> Федеральное исследовательское учреждение «Центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук»; Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, v.aksenov@mail.ru

<sup>5</sup> Федеральное исследовательское учреждение «Центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук»; Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук, ivanov.vls@gmail.com

<sup>6</sup> Федеральное исследовательское учреждение «Центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, sydra777@gmail.com

<sup>7</sup> Федеральное исследовательское учреждение «Центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, churus1314@rambler.ru

<sup>8</sup> Федеральное исследовательское учреждение «Центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, tukhvatullinarr@gmail.com

<sup>9</sup> Федеральное исследовательское учреждение «Центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук»; Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук, f.frolov@chph.ru

<sup>10</sup> Федеральное исследовательское учреждение «Центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук»; Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук, igor\_shamshin@mail.ru

тов горения — реактивной составляющей и, частично, в результате воздействия (давления) на плоские вертикальные участки днища судна, ограничивающие камеру каверны в носовой части судна.

В [3] разработана физико-математическая модель обтекания буксируемой модели судна с газовой каверной под днищем. Модель основана на нестационарных трехмерных уравнениях течения односкоростной двухфазной сплошной среды, представляющей собой механическую смесь двух фаз (жидкость и газ) с явным выделением поверхности раздела фаз. Модель проверена на экспериментальных данных:

- (1) по продувке модельной газовой каверны (без обводов судна) воздухом в неподвижной воде;
- (2) по гидродинамическому сопротивлению буксируемой модели судна с газовой каверной в движущейся воде.

Сравнение результатов численных расчетов с экспериментальными данными и наблюдениями показало их хорошее качественное и количественное согласие по динамике заполнения каверны газовым пузырем, по достигнутому уровню выталкивающей силы, по частотному спектру колебаний выталкивающей силы, а также по значению гидродинамического сопротивления буксируемой модели судна с газовой каверной при разных скоростях набегающего потока воды.

В [4, 5] разработана расширенная физико-математическая модель обтекания буксируемой модели судна с газовой каверной под днищем, основанная на концепции двух взаимно проникающих континуумов (ТВС и воды), имеющих свои значения скорости, давления, температуры и характеристик турбулентности. Для моделирования химического энерговыделения используется модель явного выделения фронта пламени, причем предполагается, что горение газовой ТВС в двухфазной среде прекращается, когда объемное содержание воды превышает некоторое пороговое значение. 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

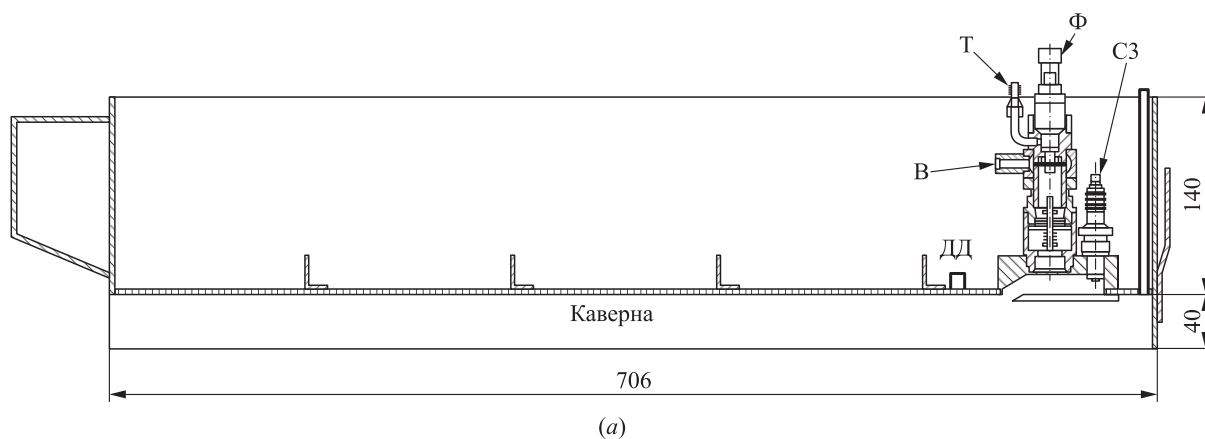
и выталкивающей силы, действующей на закрытый конец трубы, а также по перемещению границы раздела сред и по зависимости видимой скорости пламени от времени. Получено удовлетворительное качественное и количественное согласие результатов расчетов и измерений.

Цель данной работы — экспериментальные и расчетные исследования пульсирующего горения пропановоздушной смеси в модельной газовой каверне (без обводов судна), погруженной в бассейн с покоящейся водой. Эксперименты проводятся для проверки применимости расчетной модели [4, 5]: если модель опишет эксперимент с удовлетворительной точностью, ее можно будет использовать для проектирования обводов буксируемой модели судна с газовой каверной.

## Эксперимент

На рис. 1 показаны схема и фотография модельной каверны. Модельная каверна повторяет основные размеры днищевой каверны в буксируемой модели судна [1] в масштабе 1 : 2 и предназначена для экспериментального исследования процессов, протекающих в ней при ее периодическом наполнении горючей смесью и последующем горении смеси над свободной поверхностью воды. Экспериментальный стенд подробно описан в [3]. Как и в [3], эксперимент проводится только с каверной, т. е. обводы судна отсутствуют (они будут добавлены на последующих этапах исследований). Каверна оборудована горелкой, имеющей смесительную головку с циклически управляемой подачей воздуха и горючего (пропана) в камеру сгорания с форкамерой, оборудованной стандартной автомобильной свечой зажигания. Каверна устанавливается на подвижную измерительную раму крепления экспериментального стенда, включающего бассейн размером  $1,25 \times 1,2 \times 2,5$  м, а также системы подачи воздуха и горючего и систему измерений.

В ходе эксперимента регистрируются вертикальная (выталкивающая) и горизонтальная (толкающая) силы, действующие на модельную каверну, давление в каверне, а также расходы воздуха и топлива. Кроме того, в эксперименте проводится видеорегистрация распространения пламени и движения границы раздела сред. Расход воздуха регистрируется с помощью расходомера дифференциального типа, выполненного в виде измерительной секции — прямолинейного участка трубы внутренним диаметром 30 мм и длиной 1050 мм, за которым располагается узел с расходной диафрагмой (диаметр проходного отверстия 8,5 мм), и следующего за ней прямолинейного участка трубы длиной 240 мм. Перед диафрагмой на расстоянии 110 мм уста-



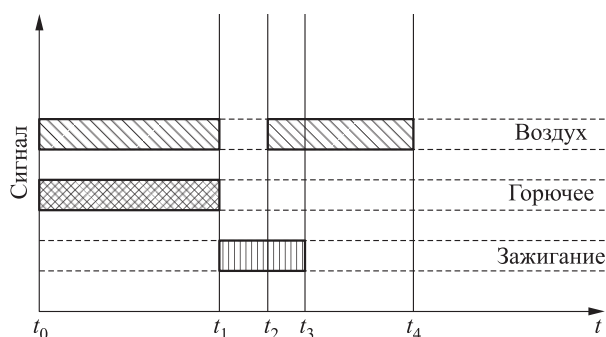
(б)

**Рис. 1** Схема (а) и фотография (б) модельной каверны с горелкой для исследования пульсирующего горения над свободной поверхностью воды: ДД — посадочное место под датчик давления; В — воздушный патрубок; Т — топливный патрубок; Ф — форсунка; СЗ — свеча зажигания. Размеры указаны в миллиметрах

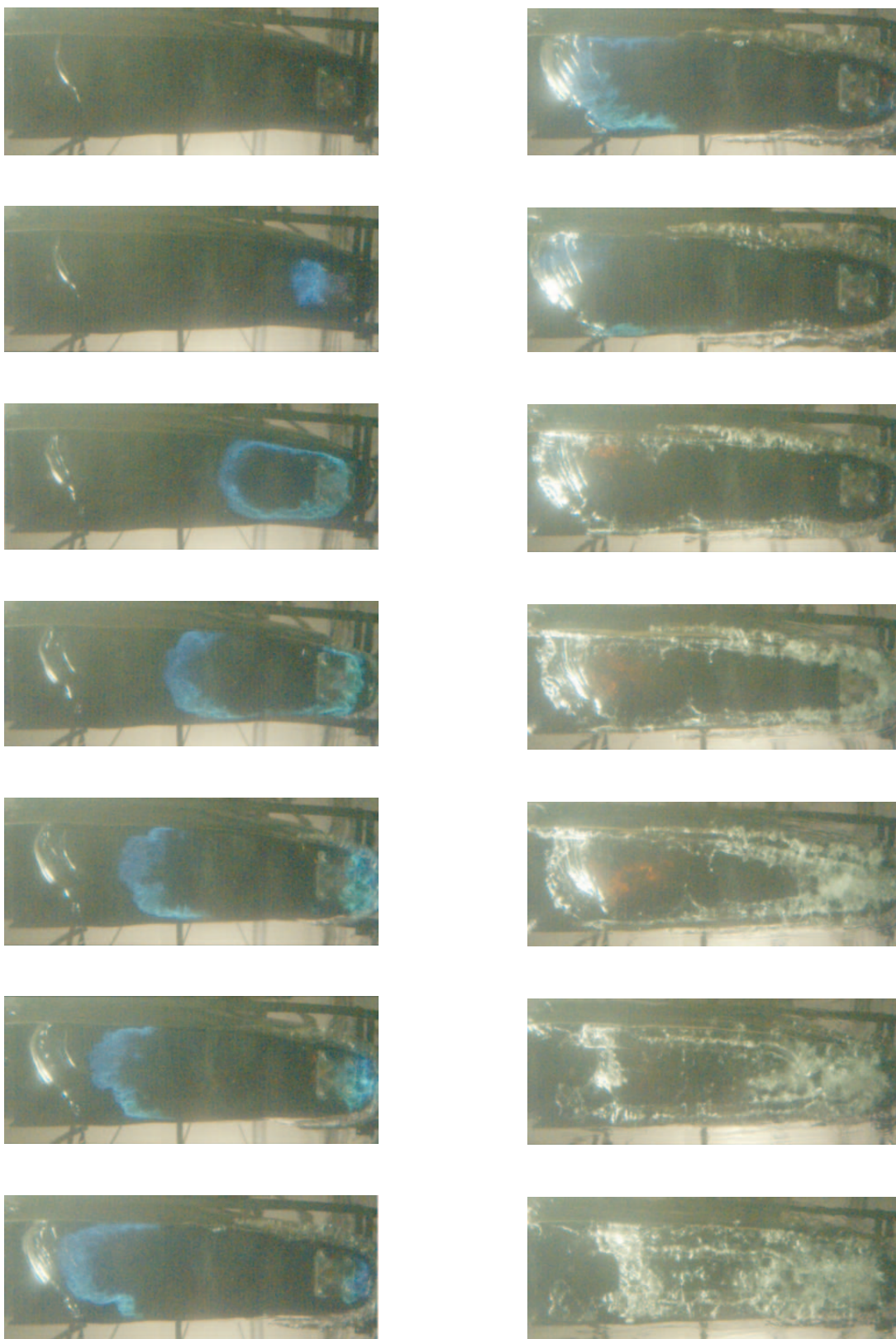
новлен датчик статического давления — датчик абсолютного давления КУРАНТ-ДА на 600 кПа. Перепад давления на диафрагме измеряется дифференциальным датчиком давления КУРАНТ-ДД (модель 2420, серийный номер 134027) с диапазоном измерения 5 кПа. По кадрам видеорегистрации определяются форма и положение фронта пламени и границы раздела сред, а также зависимости перемещения границы раздела сред и видимой скорости пламени от времени.

Расход горючего также регистрируется с помощью расходомера дифференциального типа, выполненного в виде измерительной секции — прямолинейного участка трубы внутренним диаметром 20 мм и длиной 580 мм, за которым располагается узел с расходной диафрагмой (диаметр проходного отверстия 2 мм), и следующего за ней прямолинейного участка трубы длиной 320 мм. Перед диафрагмой на расстоянии 86 мм установлен датчик статического давления — датчик абсолютного

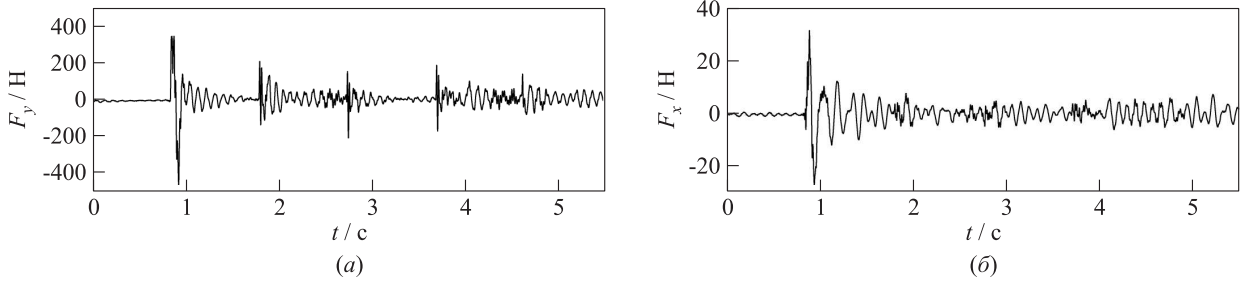
давления КУРАНТ-ДА на 600 кПа. Перепад давления на диафрагме измеряется дифференциальным датчиком давления КУРАНТ-ДД (модель 2440, серийный номер 134113) с диапазоном измерения 25 кПа. Давление воздуха в каверне в процессе ее продувки регистрируется с помощью датчика



**Рис. 2** Циклограмма испытаний каверны с пульсирующим горением ТВС



**Рис. 3** Кадры видеосъемки развития процесса горения в камере, полученные при съемке со дна бассейна: левая колонка — 825, 840, 850, 860, 870, 880, 890 мс, правая — 900, 920, 940, 955, 970, 1020, 1070 мс. Первый кадр слева соответствует моменту зажигания



**Рис. 4** Осциллограмма выталкивающей  $F_y$  (а) и толкающей  $F_x$  (б) сил в опыте с частотой пульсаций 1 Гц

абсолютного давления КУРАНТ-ДА 400 кПа, установленного в позиции ДД (см. рис. 1). Сигналы с датчиков давления поступают через станцию датчиков давления на аналого-цифровой преобразователь и регистрируются с помощью программы PowerGraph, установленной в компьютере.

Опыты с пульсирующим горением ТВС в каверне проводятся по циклограмме, показанной на рис. 2. На рис. 2 период времени  $t_0-t_1$  соответствует времени заполнения каверны горючей смесью  $\tau_m$ . Периоды времени  $t_1-t_2$  и  $t_2-t_3$  соответствуют зажиганию. Период времени  $t_2-t_4$  соответствует времени продувки каверны воздухом  $\tau_p$ . Полное время цикла равно интервалу времени  $t_0-t_4$ . Частота циклов  $\nu$  регулируется изменением периодов  $\tau_p$  и  $\tau_m$ .

Средний расход ТВС регулируется изменением мгновенного расхода ТВС  $Q_m$ :

$$Q_m = Q_{air} + Q_{fuel}$$

или коэффициента заполнения  $D$ :

$$D = \nu\tau_m,$$

где  $Q_{air}$  и  $Q_{fuel}$  — мгновенные расходы воздуха и горючего соответственно. Средний расход ТВС  $Q_{m,a}$  вычисляется двумя способами:

$$Q_{m,a(1)} = Q_m\nu\tau_m = Q_mD$$

(учитывается только совместная подача компонентов ТВС — воздуха и пропана) и

$$Q_{m,a(2)} = (Q_{air}\tau_p + Q_m\tau_m)\nu$$

(учитываются как подача ТВС, так и подача продувочного воздуха). Поскольку суммарное время подачи воздуха составляет до 80%–90% полного времени всего цикла, а расход горючего мал по сравнению с расходом воздуха, значения среднего расхода  $Q_{m,a(2)}$  близки к мгновенному расходу воздуха  $Q_{air}$  и составляют от 6,8 до 7,5 г/с при мгновенном расходе воздуха  $\sim 7,7$  г/с.

На рис. 3 показаны кадры скоростной видеосъемки развития процесса горения в каверне, полученные при съемке со дна бассейна. Стадия

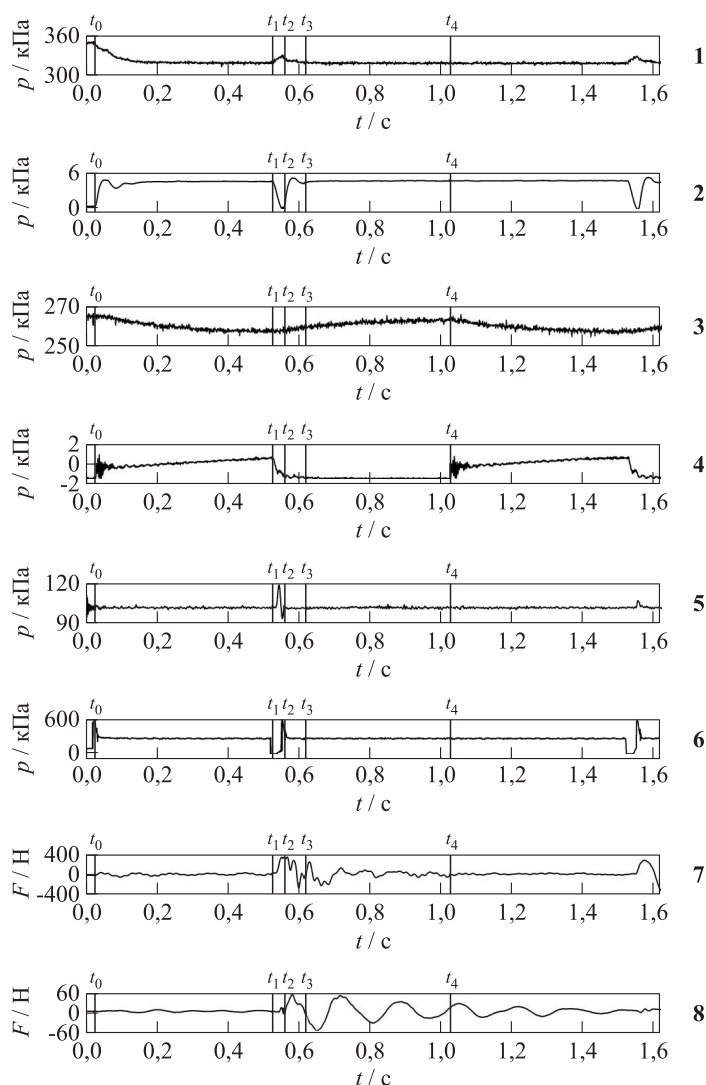
наполнения каверны топливной смесью не показана. Первый кадр соответствует моменту зажигания. Слева видна искривленная поверхность газового пузыря. На следующих кадрах видны этапы распространения пламени и схлопывания газового пузыря.

На рис. 4 приведены осциллограммы сил, действующих на каверну в вертикальном и горизонтальном направлениях в опыте, представленном на рис. 3.

Колебания сил на осциллограммах связаны с механическими свойствами системы модельная каверна — измерительная рама. Максимальное значение выталкивающей силы в первом цикле превышает 360 Н (датчик полностью разгружен, т. е. сила превышает вес каверны с системой подвеса) и наблюдается в момент времени 851 мс. Это значение почти на порядок выше, чем при продувке каверны воздухом [3]. Толкающая сила превышает 31 Н в момент времени 891 мс и тоже значительно выше значений, зарегистрированных в опытах с продувкой каверны воздухом [3]. Средние значения толкающей силы, измеренные при разных дифферентах, как правило, на порядок меньше средних значений выталкивающей силы. Интересно, что сигналы выталкивающей и толкающей сил несколько смещены по фазе: толкающая сила немного отстает от выталкивающей.

На рис. 5 показан пример первичных записей параметров рабочего процесса при пульсирующем горении ТВС стехиометрического состава в каверне. Записи 1, 2 и 3, 4 используются для расчета расходов воздуха и горючего соответственно, записи 5 и 6 показывают давление воздуха за электромагнитным клапаном и давление в каверне соответственно, а записи 7 и 8 показывают выталкивающую и толкающую силы соответственно. Вертикальные линии на рис. 5 соответствуют моментам времени на циклограмме (см. рис. 2 и таблицу).

Эксперименты проведены при разных дифферентах каверны (от  $-1,6^\circ$  до  $2,4^\circ$ ), с разными расходами стехиометрической пропановоздушной сме-



**Рис. 5** Пример первичных записей параметров рабочего процесса при пульсирующем горении ТВС в камере в одном из опытов с частотой циклов 1 Гц: 1 — давление перед диафрагмой (воздух); 2 — перепад давления на диафрагме (воздух); 3 — давление перед диафрагмой (топливо); 4 — перепад давления на диафрагме (топливо); 5 — давление за электромагнитным клапаном (воздух); 6 — давление в камере; 7 — выталкивающая сила; 8 — толкающая сила

Периоды времени, соответствующие циклограмме рабочего процесса в камере с пульсирующим горением

| Интервал  | Время, с |
|-----------|----------|
| $t_0-t_1$ | 0,50     |
| $t_1-t_2$ | 0,03     |
| $t_2-t_3$ | 0,02     |
| $t_3-t_4$ | 0,45     |

си (от 4 до 7 г/с) и разной частотой зажигания ТВС (от 0,5 до 5 Гц). Эксперименты показали, что с увеличением расхода ТВС и средняя выталкивающая сила, и средняя толкающая сила, действующие на камеру, возрастают, причем средняя тол-

кающая сила зависит от дифферента камеры. При усреднении по первом циклу (что исключает влияние волновых явлений, развивающихся в бассейне, на регистрируемые усилия) измеренные значения сил, действующих на камеру, на 30%–40% больше. Ниже для проверки предсказательной способности расчетной модели [4, 5] рассмотрен лишь один из множества проведенных экспериментов.

### Расчетная модель

Базовая физико-математическая модель турбулентного реагирующего течения в полужамкнутом объеме над свободной поверхностью воды подробно описана в [4, 5].

Модель основана на системе уравнений сохранения массы, количества движения и энергии для двухфазной среды «газ–вода» с объемными долями фаз  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ , записанных в рамках концепции двух взаимопроникающих континуумов:

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

причем объемные доли фаз связаны соотношением:

$$\alpha_2 = 1 - \alpha_1. \quad (2)$$

В уравнениях системы (1) индекс  $f$  обозначает газ (1) или воду (2),  $\alpha_f$ ,  $\rho_f$  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;  $\mathbf{v}_f = v_f^k e_k = v_{f,k} e^k$  — скорость фазы  $f$ ;  $e_k$  и  $e^k$  — ковариантный и контравариантный базисы евклидова пространства;  $\tau_f^{jk}$  — тензор вязких напряжений:

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

$\tau_{t,f}^{jk}$  — тензор турбулентных напряжений:

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

$\mu_{t,f}$  — турбулентная вязкость:

$$\mu_{t,f} = \rho_f C_\mu \frac{k_f^2}{\varepsilon_f},$$

где  $k_f$  и  $\varepsilon_f$  — турбулентная кинетическая энергия и ее диссипация;  $q_f^k$  — тепловой поток:

$$q_f^k = - \frac{\kappa_f}{c_{p,f}} \nabla_k h_f,$$

где  $\kappa_f$  — коэффициент теплопроводности,  $c_{p,f}$  — теплоемкость при постоянном давлении;  $q_{t,f}^k$  — турбулентный тепловой поток:

$$q_{t,f}^k = - \frac{\mu_f^t}{\sigma_T} \nabla_k h_f;$$

$\psi_l^k = D_l \nabla_k Y_l$  — 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; а  $\dot{Q}_{ign}$  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:

$$p = \frac{\rho_1 R T_1}{M}; \quad \rho_2 = const, \quad (3)$$

где  $M$  — средняя молекулярная масса газа ( $L = 5$ ):

$$M = \frac{1}{\sum_l Y_l / \mu_l}.$$

Полная энтальпия фаз  $h_f$  определяется из калорического уравнения состояния:

$$h_f = h_{f,0} + \int_{T_{f0}}^{T_f} c_{p,f} dT + \frac{1}{2} v_f^2, \quad (4)$$

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

Соотношения для межфазного обмена количеством движения и энергией имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} M_1 &= C_D \frac{A \rho_2 |\mathbf{v}_{12}| |\mathbf{v}_{12}|}{8}; \\ H_1 &= Nu_2 \frac{\kappa_2 A (T_1 - T_2)}{d}, \end{aligned} \right\} (5)$$

где  $C_D$  — коэффициент межфазного гидродинамического сопротивления:

$$C_D = \min \left[ \frac{24}{Re_{12}} \left( 1 + 0,15 Re_{12}^{0,687} \right); \frac{72}{Re_{12}} \right];$$

$A$  — удельная межфазная поверхность;  $Nu_2$  — число Нуссельта, определенное по характерному размеру  $d$ :

$$Nu_2 = 2 + 0,6 Re_{12}^{0,5} Pr_2^{0,33};$$

$\kappa_2$  — коэффициент теплопроводности воды, которые в общем случае зависят от числа Рейнольдса относительного движения фаз  $Re_{12} = \rho_2 \mathbf{v}_{12} d / \mu_2$  и числа Прандтля жидкости  $Pr_2 = c_{p,2} \mu_2 / \kappa_2$ .

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

$$\left. \begin{aligned} & \frac{\partial \alpha_f \rho_f k_f}{\partial t} + \nabla_j \alpha_f k_f \rho_f \nu_f^j - \\ & - \nabla_k \alpha_f \left( \mu_f + \frac{\mu_{t,f}}{\sigma_K} \right) \nabla_j k_f - \alpha_f P_f = K_f; \\ & \frac{\partial \alpha_f \rho_f \varepsilon_f}{\partial t} + \nabla_j \alpha_f \varepsilon_f \rho_f \nu_f^j - \\ & - \nabla_k \left( \alpha_f \left( \mu_f + \frac{\mu_{t,f}}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla_j \varepsilon_f \right) = \alpha_f P_f C_1 \frac{\varepsilon_f}{k_f} - \\ & - \alpha_f C_2 \rho_f \frac{\varepsilon_f^2}{k_f} + \alpha_f C_4 \rho_f \varepsilon_f \nabla_k \nu_f^k + E_f, \end{aligned} \right\} (6)$$

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

Для моделирования химического энерговыделения используется модель явного выделения фронта пламени (ЯВП) [6]. Искривление фронта пламени, вызванное турбулентными пульсациями скорости, 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 местной средней скорости потока и нормальной скорости турбулентного горения  $u_T$ , причем местные значения скорости течения и параметров турбулентности определяются из решения системы осредненных уравнений течения (1)–(6) методом контрольных объемов с использованием специальной процедуры интерполяции, а  $u_T$  рассчитывается по формуле Щелкина:

$$u_T = B u_n \sqrt{1 + \frac{u'^2}{u_n^2}}, \quad (7)$$

где  $u_n$  — скорость ламинарного пламени;  $u'$  — локальная интенсивность турбулентности;  $B$  — постоянный коэффициент, близкий к 1.

Основное допущение модели [4, 5] заключается в том, что горение ТВС в двухфазной среде прекращается, когда объемное содержание воды  $\alpha_2$  превышает некоторое пороговое значение  $\alpha_2 \geq 0,1$ .

## Сравнение расчетов с экспериментом

Система определяющих уравнений базовой физико-математической модели решается численно по методике [7], основанной на сегрегированном алгоритме типа SIMPLE [8] (Semi-Implicit 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 [9]. Для вычисления производной по времени используется метод Эйлера первого порядка точности.

На рис. 6 показана трехмерная расчетная область, соответствующая эксперименту. В отличие от эксперимента расчет проводится для «половины» каверны ввиду симметрии задачи и без форкамеры. В начальный момент времени во всей расчетной области задаются нормальные условия. 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 на рис. 6. Центр очага зажигания располагается в точке, показанной на рис. 6, б. Очаг зажигания в расчете имеет диаметр 3 мм. Расчетная сетка неравномерная и содержит 3,4 млн ячеек. Ячейки с минимальным размером (1 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. 7 приведено сравнение экспериментальных и расчетных изображений фронта пламени (вид снизу), а на рис. 8 показана расчетная динамика распространения пламени и возмущения поверхности раздела сред «газ–вода» в модельной каверне в последовательные моменты времени после зажигания ТВС (вид с плоскости симметрии). В дополнение к рис. 7 и 8 на рис. 9 показано сравнение расчетных и экспериментальных зависимостей перемещения лидирующей точки фронта пламени вдоль плоскости симметрии каверны от времени. Расчет в целом удовлетворительно воспроизводит форму и положение фронта пламени в каверне, хотя расчетная скорость пламени в середине рассматриваемого промежутка времени несколько занижена (см. рис. 9). Возможно, это связано с тем, что в расчете



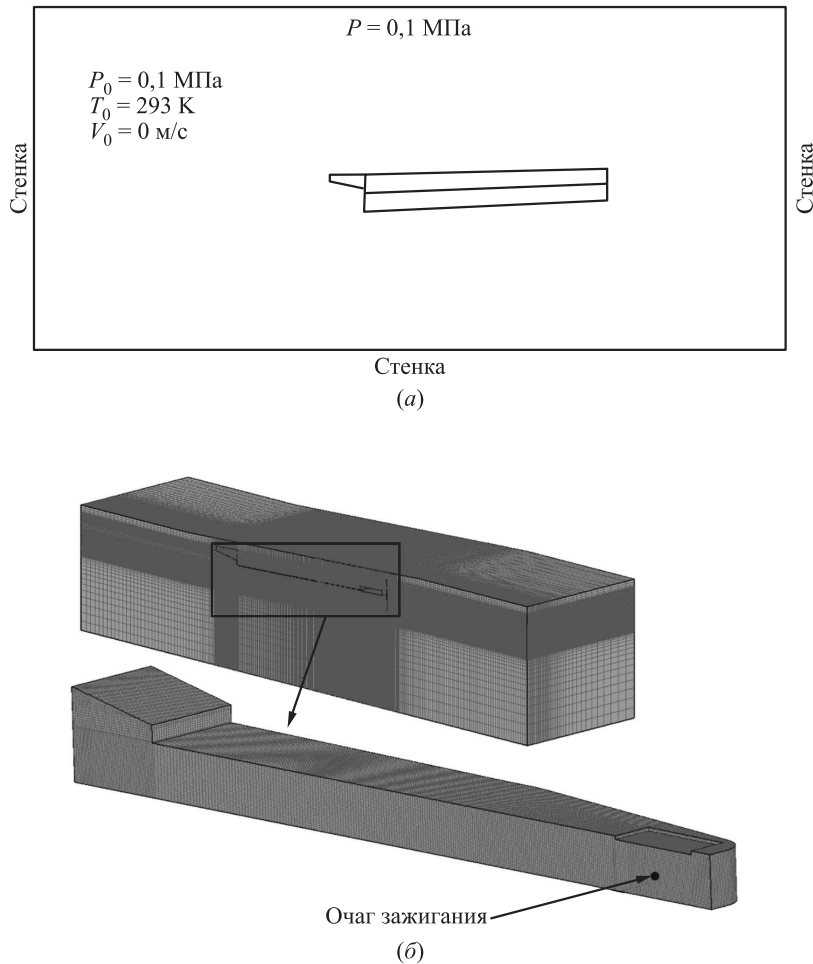


Рис. 6 Расчетная области (а) и фрагменты расчетной сетки (б)

не моделируется форкамерное зажигание, которое, как известно [10], сопровождается истечением турбулентной струи из форкамеры в основную камеру, а также используется формула Щёлкина (7) с коэффициентом пропорциональности  $B$  в правой части, равным 1. Учет форкамерного зажигания и/или небольшое увеличение  $B$ , или использование других известных корреляций для  $u_T$  могут привести к увеличению скорости пламени.

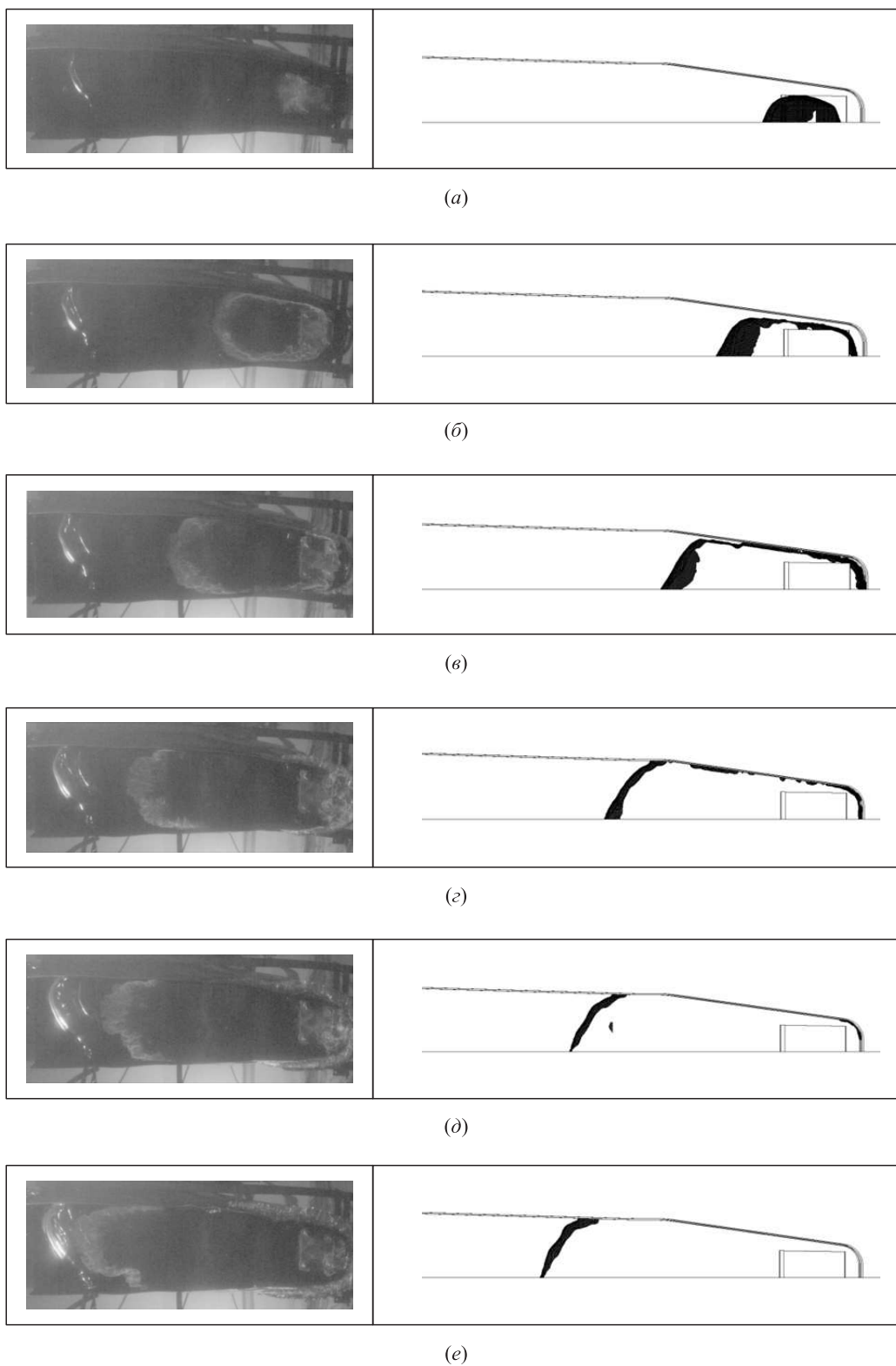
На рис. 10 приведено сравнение экспериментальных и расчетных зависимостей выталкивающей и толкающей сил, действующих на каверну, от времени в период активного горения ТВС. Видно, что экспериментальные и расчетные кривые в целом удовлетворительно согласуются друг с другом. Расчет хорошо воспроизводит амплитуду и длительность «положительного» импульса силы, вызванного сгоранием ТВС, а также соотношение между значениями выталкивающей и толкающей сил.

Интересно, что расчет хорошо воспроизводит форму положительного импульса выталкивающей силы с двумя максимумами. Промежуточный «про-

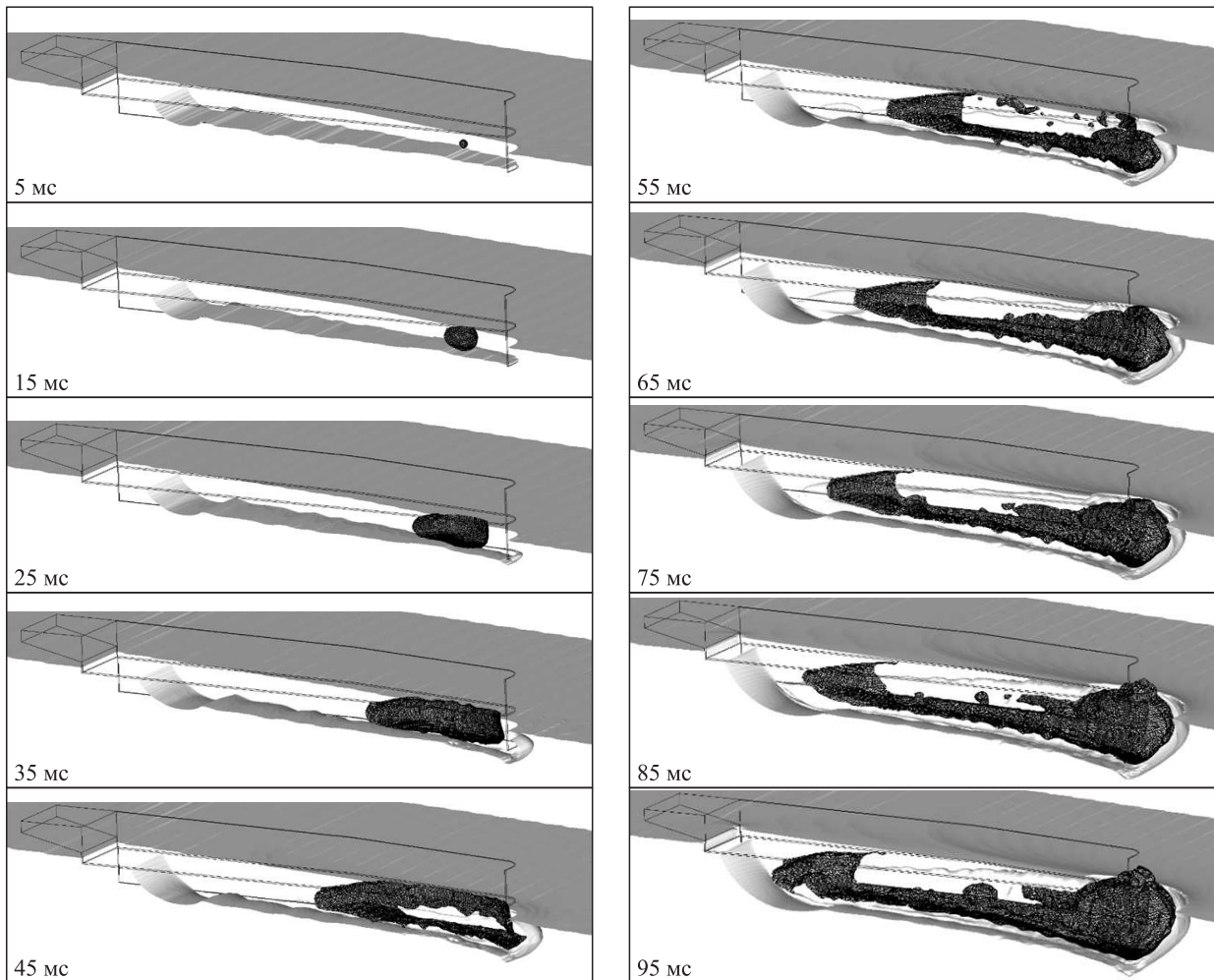
вал» в значении выталкивающей силы вызван приходом пламени на боковые стенки каверны (см. рис. 3). «Отрицательный» импульс выталкивающей силы в расчете возникает раньше, чем в эксперименте (см. рис. 4). По-видимому, это связано с эффектом выхода газового пузыря с продуктами сгорания наружу через носовую погруженную часть каверны — эффекта, который не моделируется в рамках концепции взаимопроникающих континуумов.

Отметим, 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  $u_n$ . Эта особенность, очевидно, связана с относительно малой величиной газового объема над свободной поверхностью воды и будет нарушаться при увеличении масштаба решаемой задачи.

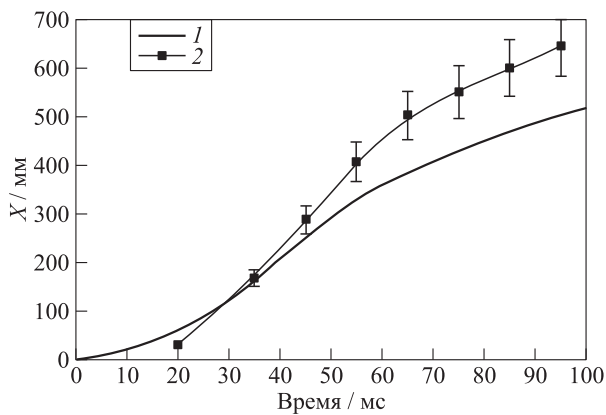
Из рис. 7–10 следует, что физико-математическая модель, предложенная в [4, 5], удовлетворительно (качественно и количественно) описывает



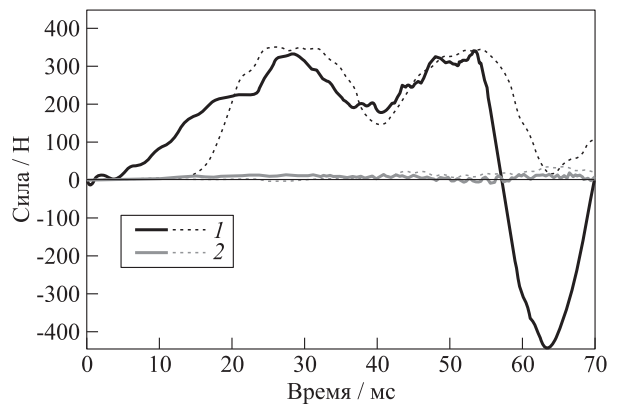
**Рис. 7** Сравнение экспериментальных (а) и расчетных (б) положения и формы пламени в модельной камере в последовательные моменты времени после зажигания ТВС (вид снизу): (а) 25 мс; (б) 35; (в) 45; (г) 55; (д) 65; (е) 75 мс



**Рис. 8** Расчетная динамика распространения пламени и возмущения поверхности раздела сред «газ–вода» в модельной каверне в последовательные моменты времени после зажигания ТВС (вид с плоскости симметрии)



**Рис. 9** Сравнение расчетной (1) и измеренной (2 с указанием ошибки измерений) зависимостей видимой скорости фронта пламени от времени



**Рис. 10** Сравнение экспериментальных (пунктирные кривые) и расчетных (сплошные кривые) зависимостей выталкивающей (1) и толкающей (2) сил, действующих на каверну, от времени

процесс горения в каверне над свободной поверхностью воды и ее можно использовать для решения задач масштабирования рассматриваемых процессов.

## Заключение

Таким образом, нами проведены эксперименты с пульсирующим горением пропановоздушной смеси в модельной днищевой каверне судна (без обводов судна), погруженной в бассейн с покоящейся водой.

В экспериментах регистрировались расходы воздуха и горючего, распространение пламени, мгновенные выталкивающая и толкающая силы, действующие на модельную каверну, а также проводилась видеорегистрация распространения пламени и движения границы раздела сред.

Показано, что с увеличением расхода ТВС и средняя выталкивающая сила, и средняя толкающая сила возрастают, причем средняя толкающая сила зависит от дифферента каверны. При усреднении по первом циклу (что исключает влияние волновых явлений, развивающихся в бассейне, на регистрируемые усилия) измеренные значения сил, действующих на каверну, на 30%–40% выше.

Результаты экспериментов сравниваются с результатами трехмерных расчетов, основанных на физико-математической модели горения подготовленной ТВС в полузамкнутом объеме над свободной поверхностью воды, разработанной ранее: по форме и положению фронта пламени и границы раздела сред «газ–вода» в разные моменты времени, по динамике изменения сил, действующих на днище и на редан каверны, а также по зависимости видимой скорости пламени от времени. Получено удовлетворительное качественное и количественное согласие результатов расчетов и измерений.

В дальнейшем разработанную физико-математическую модель планируется адаптировать к задачам проектирования газовой каверны с горением под днищем судна. В таких задачах потребуются дополнительно рассматривать направленное движение воды с учетом обводов днища судна и формы газовой каверны.

Результаты, полученные в работе, формируют теоретические и экспериментальные основы для создания судов, движение которых обеспечивается только благодаря горению топливной смеси под днищем судна, т. е. без применения традиционных движителей (гребных винтов, водометов и др.).

## 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 Российской Федерации на изобретение № 2653664 от 11.05.2018. Приоритет от 01.06.2017.
3. 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.
4. Фролов С. М., Платонов С. В., Авдеев К. А., Аксёнов В. С., Иванов В. С., Садыков И. А., Тухватуллина Р. Р., Фролов Ф. С., Шамшин И. О. Горение топливно-воздушной смеси в объеме над свободной поверхностью воды // Горение и взрыв, 2019. Т. 12. № 3. С. 58–68. doi: 10.30826/CE19120307.
5. Фролов С. М., Платонов С. В., Авдеев К. А., Аксёнов В. С., Иванов В. С., Садыков И. А., Тухватуллина Р. Р., Фролов Ф. С., Шамшин И. О. Трехмерное моделирование горения топливно-воздушной смеси в объеме над свободной поверхностью воды // Сб. докладов VI Минского международного colloquia по физике ударных волн, горению и детонации. — Минск: Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси, 2019. С. 193–199.
6. 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.
7. Frolov S. M., Avdeev K. A., Aksenov V. S., Borisov A. A., Frolov F. S., Shamshin I. O., Tikhvatullina 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. 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.
9. 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.
10. Воинов А. Н. Исследование детонации и самовоспламенения в условиях двигателей легкого топлива: Дис. . . . д-ра техн. наук. — М.: ИХФ АН СССР, 1957.

Поступила в редакцию 05.11.19

## COMBUSTION OF THE FUEL–AIR MIXTURE IN THE CAVITY UNDER THE BOAT BOTTOM: EXPERIMENT AND SIMULATION

S. M. Frolov<sup>1,2,3,4,5</sup>, S. V. Platonov<sup>6</sup>, K. A. Avdeev<sup>1</sup>, V. S. Aksenov<sup>1,2</sup>, V. S. Ivanov<sup>1,3</sup>, A. E. Zangiev<sup>1</sup>, I. A. Sadykov<sup>1</sup>, R. R. Tukhvatullina<sup>1</sup>, F. S. Frolov<sup>1,3</sup>, and I. O. Shamshin<sup>1,3</sup>

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

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

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

<sup>4</sup>National University of Science and Technology MISIS, 4 Leninskii Prosp., Moscow 119049, Russian Federation

<sup>5</sup>A. G. Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Material Science, Russian Academy of Sciences, 8 Academician Osipyan Str., Chernogolovka, Moscow Region 142432, Russian Federation

<sup>6</sup>“Almaz” Central Marine Design Bureau, 50 Warshavskaya Str., St. Petersburg 196128, Russian Federation

**Abstract:** Experimental studies of pulsed combustion of propane–air mixture in a model cavity under a boat bottom (without boat contours), immersed in a pool with quiescent water, are carried out. In the experiments, air and fuel consumption, flame propagation, as well as buoyancy and propulsive forces acting on the model cavity are recorded. The experimental results are compared with the results of three-dimensional calculations based on the physical and mathematical model of combustion of a premixed fuel–air mixture in a semiclosed volume above a free surface of water, developed earlier: by the shape and position of the flame front and the gas–water interface at different times and in dynamics of the forces acting on the cavity. Satisfactory qualitative and quantitative agreement is obtained between the results of calculations and measurements.

**Keywords:** boat with a gas cavity; fuel–air mixture; pulsed combustion in the cavity; experiment; mathematical model; flame propagation; propulsive force; buoyancy force

**DOI:** 10.30826/CE19120408

### Acknowledgments

The 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. Priority 01.06.2017.
3. 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 kaverno 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.
4. Frolov, S. M., S. V. Platonov, K. A. Avdeev, V. S. Aksenov, V. S. Ivanov, I. A. Sadykov, R. R. Tukhvatullina.

- na, F.S. Frolov, and I.O. Shamshin. 2019. Gorenje toplivno-vozdushnoy smesi v ob"eme nad svobodnoy poverkhnost'yu vody [Combustion of the fuel–air mixture in the volume over the free water surface]. *Goren. Vzryv (Mosk.) — Combustion and Explosion* 12(3):58–68. doi: 10.30826/CE19120307.
5. Frolov, S. M., S. V. Platonov, K. A. Avdeev, V. S. Aksenov, V. S. Ivanov, I. A. Sadykov, R. R. Tukhvatullina, F. S. Frolov, and I. O. Shamshin. 2019. Trekhmernoe modelirovaniye gorennya toplivno-vozdushnoy smesi nad svobodnoy poverkhnost'yu vody [Three-dimensional simulation of combustion of fuel–air mixture over the free water surface]. *6th Minsk Colloquium (International) on Physics of Shock Waves, Combustion and Detonation Proceedings*. Minsk: A. V. Lyikov Institute of Heat and Mass Transfer, NAS of Belarus. 193–199.
6. 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.
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. Multiphas. Flow* 92:20–38. doi: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2017.01.016.
8. 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.
9. 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.
10. Voinov, A. N. 1957. Issledovanie detonatsii i samovosplamneniya v usloviyakh dvigateley legkogo topliva [Investigation of detonation and self-ignition under conditions of engines operating on light fuels]. Moscow: Inst. Chem. Phys. USSR Acad. Sci. DSc Thesis.

Received November 5, 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 of the 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; professor, National University of Science and Technology MISIS, 4 Leninskii Prosp., Moscow 119049, Russian Federation; head of laboratory, A. G. Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Material Science, Russian Academy of Sciences, 8 Academician Osipyan Str., Chernogolovka, Moscow Region 142432, Russian Federation; smfrol@chph.ras.ru

**Platonov Sergey V.** (b. 1971) — Candidate of Science in technology, chief designer, “Almaz” Central Marine Design Bureau, 50 Varshavskaya 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 of the 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 of the 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; vaksenov@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 of the 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

**Zangiev Alan E.** (b. 1986) — junior research scientist, N. N. Semenov Institute of Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; sydra777@gmail.com

**Sadykov Ilyas A.** (b. 1993) — junior research scientist, N. N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics of the 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 of the 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 of the 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 of the 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