

УДАРНЫЕ ВОЛНЫ В ЖИДКОСТИ, СОДЕРЖАЩЕЙ ИНЕРТНЫЕ И РЕАКЦИОННОСПОСОБНЫЕ ГАЗОВЫЕ ПУЗЫРЬКИ*

Р. Р. Тухватуллина¹, С. М. Фролов²

Аннотация: Предложена физико-математическая модель, описывающая двухфазное двухскоростное течение инертной жидкости с инертными или реакционноспособными газовыми пузырьками. Показано, что на основе предложенной модели можно получить решения с ударной волной (УВ) с осциллирующей структурой, а также уединенную сверхзвуковую самоподдерживающуюся волну пузырьковой детонации. Проведено сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными по скорости и структуре ударных и детонационных волн, распространяющихся в жидкости с пузырьками азота или ацетилено-кислородной смеси.

Ключевые слова: пузырьковая среда; реакционноспособный газ; пузырьковая детонация; ударная волна; двухфазное течение

1 Введение

В работах [1, 2] предложена силовая установка нового типа для надводных и подводных аппаратов и транспортных средств различного назначения — гидрореактивный водометный движитель (ГРД), работающий в режиме импульсной или непрерывной детонации. Для оценки эффективности ГРД и его проектирования необходимо понимать особенности двухфазного течения жидкости с химически инертными и/или химически активными газовыми пузырьками.

Экспериментальные исследования распространения УВ в пузырьковых жидкостях проводились в ряде работ [3–14]. Что касается УВ в жидкости с реакционноспособными газовыми пузырьками, то работ по этой тематике меньше [15–22].

В работах [15–22] показано, что при проникновении УВ в жидкость, содержащую равномерно распределенные по объему пузырьки реакционноспособного газа, возможно возникновение пузырьковой детонации — самоподдерживающейся детонационноподобной волны давления, распространяющейся квазистационарно со сверхзвуковой скоростью.

Теоретический анализ пузырьковой детонации приведен в [23–28]. При этом в работах [23–25, 27] используются простейшие двухфазные модели течения инертной пузырьковой среды [29–32]. В них предполагается, что (*i*) газосодержание мало; (*ii*) газ подчиняется уравнению состояния идеального га-

за; (*iii*) жидкость несжимаемая и изотермическая; (*iv*) пузырьки газа сохраняют сферическую форму, не взаимодействуют и не дробятся; (*v*) пульсации в газе и жидкости описываются уравнением Рэлея–Ламба; (*vi*) жидкость и газ движутся с одной скоростью.

Модели [23–25, 27] привлекательны в силу своей относительной простоты. Однако непосредственно за УВ скорость газа и жидкости на самом деле сильно различаются, т. е. условие (*vi*) не выполняется. В работе [28] использовалась двухфазная двухскоростная вязкая модель течения пузырьковой среды [32], однако не была учтена радиальная инерция газовых пузырьков. В работе [26] для исследования пузырьковой детонации использовалась стационарная двухскоростная модель движения пузырьковой среды [32].

В рассматриваемой работе предложена нестационарная двухскоростная модель течения двухфазной среды (инертная жидкость с пузырьками инертного или реакционноспособного газа), полученная на основе пространственного осреднения исходных уравнений для каждой составляющей фазы в предположении условий (*i*)–(*v*) по типу [32].

Давления в газе и жидкости связаны уравнением Рэлея–Ламба. Дополнительно к фазовым давлениям в модель введено физически обоснованное межфазное давление, обеспечивающее корректность (по Адамару–Петровскому) задачи Коши определяющих дифференциальных уравнений [33, 34].

* Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Минобрнауки России по государственному контракту № 14.609.21.0001 (идентификатор контракта RFMEFI60914X0001) и Российского фонда фундаментальных исследований (грант 16-29-01065 офи-м).

¹ Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, tukhvatullinarr@gmail.com

² Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, smfrol@chph.ras.ru

2 Физико-математическая модель

Рассмотрим неизотермическую двухскоростную модель течения двухфазной среды (инертная жидкость с инертными или реакционноспособными газовыми пузырьками):

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \phi_f \rho_f}{\partial t} + \nabla_k (\phi_f \rho_f u_f^k) &= 0; \\ \frac{\partial \phi_f \rho_f u_f^j}{\partial t} + \nabla_k (\phi_f \rho_f u_f^k u_f^j + p_f \phi_f \delta^{jk}) - \\ &\quad - p_i \nabla_j \phi_f = F_f^j; \\ \frac{\partial \phi_2 \rho_2 Y_l}{\partial t} + \nabla_k (\phi_2 \rho_2 u_2^k Y_l) &= \phi_2 \dot{\omega}_l; \\ \frac{\partial \phi_2 \rho_2 E_2}{\partial t} + \nabla_k (\phi_2 u_2^k (\rho_2 E_2 + p_2)) + \\ &\quad + p_i \frac{\partial \phi_2}{\partial t} = \phi_2 \dot{\omega}_T + H_2. \end{aligned} \right\} (1)$$

Здесь индекс f обозначает жидкость (1) или газ (2); ϕ_f , p_f , ρ_f и E_f — объемная доля, давление, плотность и полная энергия фазы f соответственно; $\mathbf{u}_f = u_f^j \mathbf{e}_j$ — скорость фазы f , где \mathbf{e}_j — ковариантные векторы базиса евклидова пространства; δ^{jk} — символ Кронекера; Y_l — массовая доля l -го компонента в газовой фазе ($l = 1, \dots, L - 1$; L — общее число компонентов). В случае инертных газовых пузырьков химические превращения в газовой фазе не происходят, поэтому скорость реакций $\dot{\omega}_l = 0$ для всех компонентов l и, следовательно, скорость энерговыделения $\dot{\omega}_T = 0$. В случае реакционноспособных газовых пузырьков скорость энерговыделения в результате химических реакций определяется следующим образом:

$$\dot{\omega}_T = - \sum_{l=1}^L \Delta e_{2,l}^0 \dot{\omega}_l,$$

где $\Delta e_{2,l}^0$ — стандартные энергии образования химических компонентов. При этом скорость реакции в газе определяется стандартным образом [35]:

$$\dot{\omega}_l = W_l \sum_{k=1}^M \left(\nu''_{l,k} - \nu'_{l,k} \right) f_k. \quad (2)$$

Здесь M — полное число химических реакций; W_l — молекулярная масса l -го компонента; $\nu''_{l,k}$ ($\nu'_{l,k}$) — стехиометрический коэффициент l -го компонента, являющегося продуктом (реагентом) в k -й реакции;

$$f_k = A_k T^{\alpha_k} e^{-E_k/(RT)} \prod_{j=1}^L \left(\frac{Y_j \rho_2}{W_j} \right)^{m_{j,k}}, \quad (3)$$

где A_k , α_k и E_k — предэкспоненциальный множитель, показатель степени при температуре и энергия

активации k -й реакции, R — универсальная газовая постоянная, $m_{j,k}$ — порядок k -й реакции по j -му компоненту, если не отмечено отдельно, то $m_{j,k} = \nu'_{j,k}$.

Межфазное давление p_i определяется следующим образом [33, 34]:

$$p_i = p_1 + \frac{1}{2} C_s(\phi_2, \text{Re}_{12}) \rho_1 \mathbf{u}_{12}^2. \quad (4)$$

Здесь \mathbf{u}_{12} — скорость проскальзывания фаз; $C_s(\phi_2, \text{Re}_{12})$ — эмпирическая функция, которая зависит от объемной доли газа и числа Рейнольдса относительного движения фаз $\text{Re}_{12} = d \rho_1 |\mathbf{u}_{12}| / \mu_1$, где d — средний диаметр пузырьков в элементарном объеме, μ_1 — вязкость жидкости. Функция $C_s(\phi_2, \text{Re}_{12})$ определена следующим образом:

$$C_s(\phi, \text{Re}_{12}) = \alpha(\text{Re}_{12}) C_{dp}^{\text{coll}}(\phi_2, \text{Re}_{12}), \quad (5)$$

где C_{dp}^{coll} — коэффициент сопротивления «формы», учитывающий коллективные эффекты:

$$C_{dp}^{\text{coll}}(\phi_2, \text{Re}_{12}) = C_{dp}(\text{Re}_{12}) (1 - \phi_2)^{-2,7}. \quad (6)$$

Коэффициент $\alpha(\text{Re}_{12})$ в (5) и функция $C_{dp}(\text{Re}_{12})$ в (6) линейно интерполируются по значениям, представленным в табл. 1.

Таблица 1 Коэффициенты C_{dp} и α для различных чисел Рейнольдса Re_{12}

Re_{12}	α	C_{dp}
10	-0,13	1,5
100	-0,52	0,48
400	-0,96	0,32
1000	-0,74	0,43
163 000	-0,74	0,43

Сумма объемных долей фаз равна единице:

$$\phi_1 + \phi_2 = 1. \quad (7)$$

Фазовые давления связаны уравнением Рэлея–Ламба, описывающим пульсации газового пузырька:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d_2 R}{dt} &= \omega_b; \\ \rho_1 R \frac{d_2 \omega_b}{dt} + \rho_1 \frac{3}{2} \omega_b^2 &= p_2 - \frac{2\sigma}{R} - p_1 - \frac{4\mu_1 \omega_b}{R}, \end{aligned} \right\} (8)$$

т. е. пульсации пузырька определяются инерцией присоединенной массы, различием фазовых давлений и вязкой диссипацией, причем в (8) $R = d/2$ —

средний радиус газовых пузырьков в элементарном объеме; ω_b — скорость пульсаций газового пузырька; $d_2/dt = \partial/\partial t + u_2^k \nabla_k$ — субстанциональная производная. Средний радиус газовых пузырьков и объемная доля газа связаны соотношением:

$$\phi_2 = \frac{4}{3} \pi R^3 N, \quad (9)$$

где $N = const$ — число газовых пузырьков в элементарном объеме.

Согласно предположениям (ii) и (iii) (см. разд. 1) уравнения состояния фаз имеют следующий вид:

$$\rho_1 = \rho_1^0 = const; \quad \rho_2 = \frac{p_2 W}{RT}, \quad (10)$$

где для средней молекулярной массы смеси имеем:

$$\frac{1}{W} = \sum_{l=1}^L \frac{Y_l}{W_l}.$$

Система уравнений (1)–(10) дополняется соотношениями для межфазного обмена энергией и импульсом:

$$\left. \begin{aligned} F_2^j &= -F_1^j = C_d(\text{Re}_{12}) \frac{A \rho_1 (u_1^j - u_2^j) |u_1^j - u_2^j|}{8}; \\ H_2 &= \text{Nu}_2 \lambda_2 \frac{A(T_1 - T_2)}{d}, \end{aligned} \right\} (11)$$

где T_f — температура фазы f ; $A = 6\phi_2/d$ — межфазная поверхность внутри элементарного объема; λ_2 — теплопроводность газа; C_d — коэффициент гидродинамического сопротивления газового пузырька. Для относительно малых чисел Рейнольдса ($\text{Re}_{12} < 100$) газовый пузырек имеет сферическую форму, а коэффициент сопротивления такой же, как для твердой сферы:

$$C_d(\text{Re}_{12}) = \frac{24}{\text{Re}_{12}} \left(1 + 0,15 \text{Re}_{12}^{0,687} \right), \quad \text{Re}_{12} \leq 100. \quad (12)$$

При умеренных числах Рейнольдса Re_{12} газовый пузырек деформируется, принимая форму эллипсоида вращения, сплюсненного в направлении обтекания. Диапазон чисел Рейнольдса, при которых пузырек имеет форму эллипсоида вращения, зависит, вообще говоря, от типа несущей жидкости. В представленных расчетах коэффициент C_d для такого пузырька аппроксимировался по значениям, измеренным экспериментально для пузырьков воздуха в воде [36]. При дальнейшем увеличении числа Рейнольдса газовый пузырек принимает форму сегмента, коэффициент сопротивления которого не зависит от его размера и равен постоянному значению $C_d \approx 2,6$.

Отметим, что в данной модели деформация пузырька учтена только в коэффициенте C_d , а эффективная межфазная поверхность в (11) для простоты рассчитывается в предположении, что пузырек имеет сферическую форму.

Число Нуссельта газовой фазы, Nu_2 , определяется следующим образом [32]:

$$\text{Nu}_2 = \begin{cases} \sqrt{\text{Pe}_2}, & \text{Pe}_2 \geq 100; \\ 10, & \text{Pe}_2 < 100. \end{cases} \quad (13)$$

Здесь

$$\text{Pe}_2 = 12 (\gamma_2 - 1) \frac{T_1 R |w_b|}{|T_2 - T_1| \varkappa_2},$$

где $\varkappa_2 = \lambda_2 / (\rho_2 c_{p,2})$ — коэффициент теплопроводности газа; γ_2 , $c_{p,2}$ и λ_2 — показатель адиабаты, теплоемкость при постоянном давлении и коэффициент теплопроводности газа соответственно, которые зависят от температуры многокомпонентного газа T_2 [37].

Согласно условию (iii) температура несущей жидкости $T_1 = T_1^0 = const$, а T_2 определяется из калорического уравнения состояния:

$$e_2 = \int_{T_2^0}^{T_2} c_{v,2}(T_2) dT_2,$$

где $c_{v,2}(T_2)$ — теплоемкость газа при постоянном объеме [37].

Таблица 2 Параметры ГKM самовоспламенения стехиометрической ацетиленокислородной смеси в диапазоне начального давления $30 < p_2^0 < 150$ атм и начальной температуры $1500 < T_2^0 < 2500$ К

Реакция	A, м-моль-с	α	E, кДж/моль
$\text{C}_2\text{H}_2 + 2,5\text{O}_2 \longrightarrow 2\text{CO} + \text{H}_2\text{O}^*$	10^{11}	0	55,4
$\text{CO} + 0,5\text{O}_2 = \text{CO}_2$	$2,0 \cdot 10^9$	0	12
$\text{H}_2\text{O} + M = \text{H} + \text{OH} + M$	$1,6 \cdot 10^{27}$	-3,0	124

* $m_{\text{C}_2\text{H}_2} = 0,5; m_{\text{O}_2} = 0,5$.

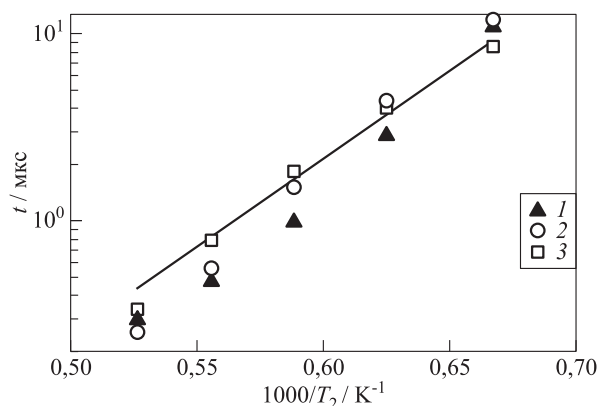


Рис. 1 Зависимость задержек самовоспламенения стехиометрической ацетилено-кислородной смеси от температуры; значки — ДКМ [37], кривая — ГКМ; 1 — $p_2^0 = 30$ атм; 2 — 70; 3 — $p_2^0 = 150$ атм

Применимость системы уравнений (1)–(13) для моделирования распространения УВ в жидкости с инертными или реакционноспособными пузырьками проверена на экспериментах [11, 17, 20], в которых в качестве инертной жидкости используется вода, раствор воды и глицерина или силиконовое масло, а в качестве газа используется азот или ацетиленокислородная смесь. Для моделирования химических превращений в ацетиленокислородной смеси применяется глобальный кинетический механизм (ГКМ) (табл. 2). Кинетические параметры E_k , α_k , A_k и $m_{j,k}$ реакций в (3) подбирались по задержкам самовоспламенения ацетиленокислородной смеси в соответствующем диапазоне температур и давлений (рис. 1) на основе расчетов по детальному кинетическому механизму (ДКМ) [37].

3 Результаты и их обсуждение

Алгоритм численного решения системы уравнений (1)–(13) основан на методе расщепления по физическим процессам. Сначала BDF-методом (Backward Differentiation Formula) решаются кинетические уравнения для химических реакций при постоянном объеме с использованием внутреннего шага интегрирования и переменного порядка аппроксимации [38]. Далее методом, предложенным в [11], но модифицированным для двухскоростной модели, решается система уравнений (1)–(13) без химических источников.

Для проверки модели проведено сравнение численных расчетов с экспериментальными данными [11] по структуре УВ в инертной пузырьковой среде. Эксперименты [11] выполнены в вертикальной гидроударной трубе с внутренним диамет-

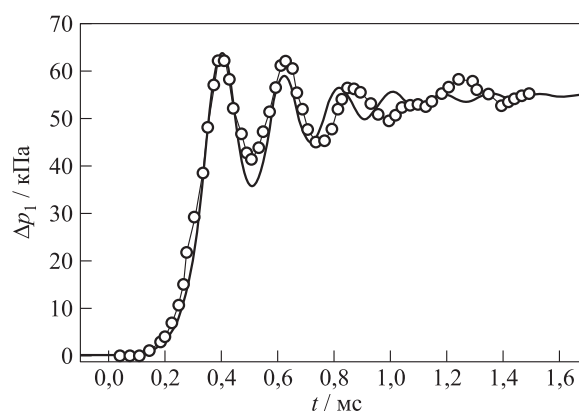


Рис. 2 Сравнение измеренных [11] (символы) и расчетных (кривые) профилей давления в УВ; датчик давления установлен на глубине 314 мм от поверхности раздела газ — пузырьковая среда

ром 18 мм. Гидроударная труба состоит из камеры высокого давления (КВД, 1,6 м), камеры низкого давления (КНД, 1,8 м) и измерительной секции (ИС, 2 м), заполненной силиконовым маслом (KF96-50) с пузырьками азота при нормальных условиях.

На рис. 2 представлены результаты сравнения экспериментальных [11] и рассчитанных профилей давления в УВ, распространяющейся в инертной пузырьковой среде для условий эксперимента [11]: $\phi_2^0 = 0,0015$; $p_1^0 = 100,1$ кПа; $\Delta p_1 = 55,6$ кПа; $R^0 = 0,591$ мм. Видно, что расчетные кривые качественно и количественно удовлетворительно предсказывают частоту (погрешность меньше $\approx 13\%$) и амплитуду (погрешность меньше $\approx 10\%$) осцилляций давления в УВ.

На рис. 3 представлены экспериментальные осциллограммы распространения детонационной волны [21] в инертной жидкости с реакционноспособными газовыми пузырьками. В пузырьковой среде формируется своеобразное волновое возмущение: от инициирующей УВ отходит короткая уединенная волна (1), а за ней следуют основная УВ (2) и УВ (3), отраженная от торца КВД (см. записи 2-го, 3-го и 4-го датчиков на рис. 3). Согласно регистрациям фотодатчиков воспламенение пузырьков происходило лишь в волне 1, тогда как в волнах 2 и 3 воспламенения не было. Анализ движения уединенной волны показывал, что со временем (зависящим от условий эксперимента) уединенная волна выходит на квазистационарный режим и движется со скоростью, значительно превышающей равновесную (низкочастотную [39]) скорость звука в пузырьковой среде, а основная УВ, следующая за ней, затухает вследствие диссипации энергии. Такой стационарный сверхзвуковой само-

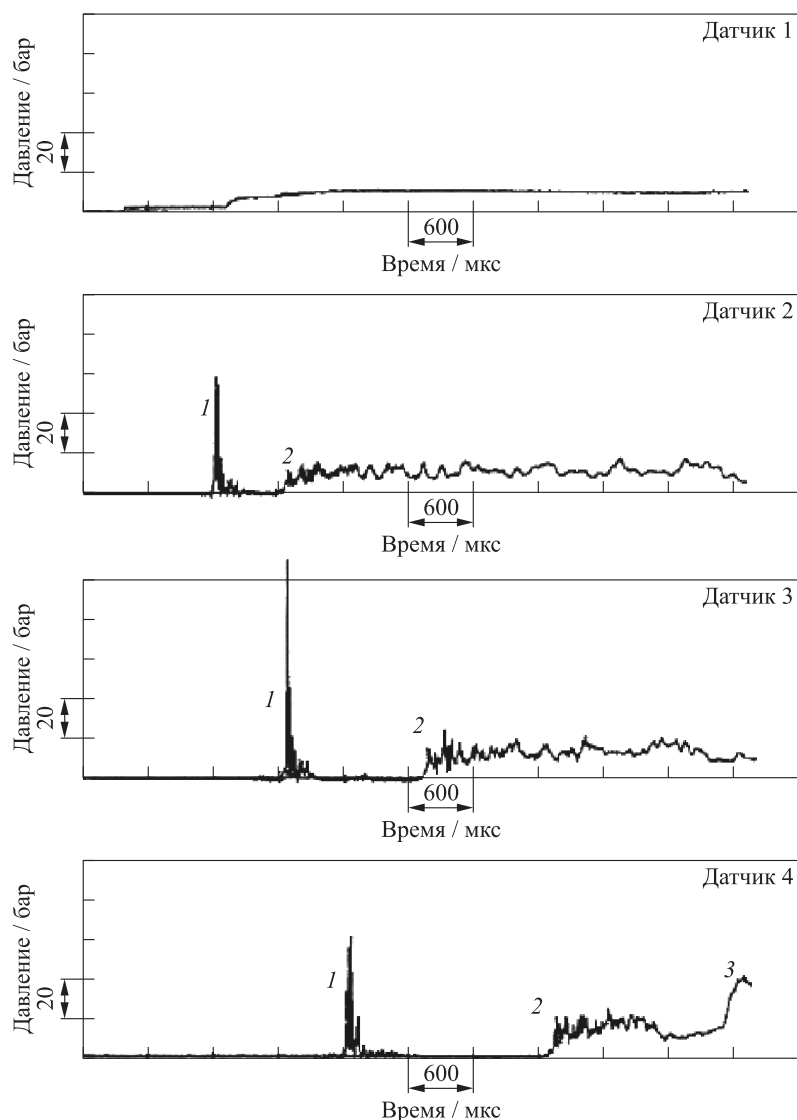


Рис. 3 Осциллограммы профилей давления [21]. Датчик 1 установлен в газе; датчик 2 установлен на глубине 285 мм; датчик 3 — 815 мм; датчик 4 — 1345 мм (глубина отсчитывается от поверхности раздела газ — пузырьковая жидкость); $\phi_2^0 = 0,0035$; $d^0 = 2.8$ мм; пузырьки газа — 30%(2H₂ + O₂) + 70%Ar; несущая жидкость — вода

поддерживающийся фронт реакции с быстрым и полным выгоранием горючего в уединенной УВ называют пузырьковой детонацией.

По мнению авторов [19] механизм образования пузырьковой детонации может быть следующим. Известно, что в пузырьковой среде с инертными газовыми пузырьками существуют УВ с осцилляторной структурой. Осцилляторная УВ может распадаться на последовательность уединенных УВ — солитонов, скорость которых пропорциональна их амплитудам. Наличие химических реакций приводит к повышению давления в лидирующей УВ, и, следовательно, к резкому возрастанию ее скорости.

Для проверки модели проведено сравнение численных расчетов с экспериментальными данными [17, 20] по скорости распространения и структуре пузырьковой детонации в воде с пузырьками ацетиленокислородной смеси (система I), а также в растворе воды и глицерина (50 % (об.) / 50 % (об.)) с пузырьками ацетиленокислородной смеси (система II).

Эксперименты [17, 20] выполнены в вертикальной гидроударной трубе с внутренним диаметром 35 мм. Начальное давление и температуру (62,94 атм и 4278 К) в КВД создавали за счет сжигания стехиометрической ацетиленокислородной смеси. Камеру низкого давления заполняли возду-

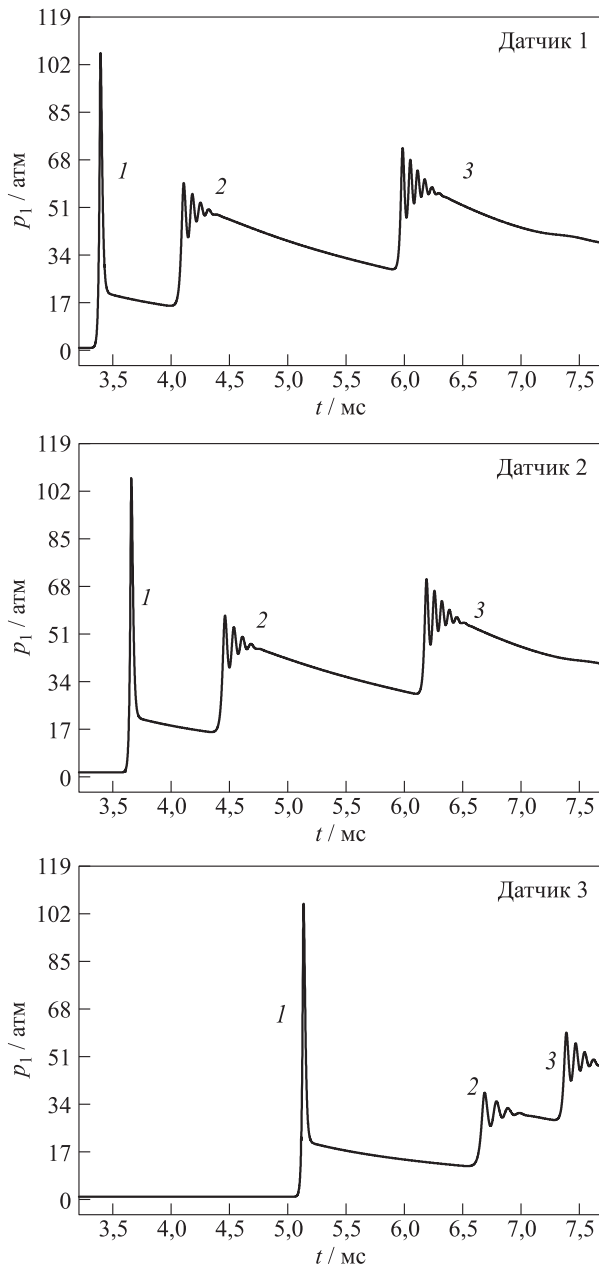


Рис. 4 Рассчитанные профили давления в УВ, распространяющейся в воде с пузырьками стехиометрической ацетиленокислородной смеси: 1 — уединенная УВ; 2 — основная УВ; 3 — отраженная УВ. Датчик 1 установлен на глубине 2340 мм; 2 — 2540 мм; 3 — 3730 мм; $\phi_2^0 = 0,01$; $d^0 = 3,5$ мм; система I

хом при нормальных условиях (1 атм и 293 К). В ИС создавали столб жидкости с газовыми пузырьками (система I или II) с начальным объемным газосодержанием ϕ_2^0 от 0,01 до 0,1 при среднем размере пузырьков реакционноспособного газа $d^0 = 3,5$ –4,0 мм (массовые доли C_2H_2 и O_2 равны 0,245

и 0,755 соответственно). Начальная температура систем I и II была комнатной.

На рис. 4 представлены рассчитанные профили волн давления в жидкости для условий эксперимента [17]. Так же как и в эксперименте, в расчете наблюдается образование уединенной (1) и основной УВ (2). На рис. 5 символами показаны измеренные значения средних скоростей D уединенной (1) и основной УВ (2) в системе I в зависимости от начального газосодержания. В [17] значения средних скоростей получены по записям давления на датчиках, установленных на глубине 3530 и 3570 мм. Отметим, что пузырьковая детонация в [17] со свечением продуктов горения ацетиленокислородной смеси наблюдалась лишь в пределах ϕ_2^0 от 0,02 до 0,06, тогда как при $\phi_2^0 > 0,06$ свечение продуктов горения ацетилена не регистрировалось, т. е., по утверждению авторов [17], детонация отсутствовала. Из рис. 5 видно, что результаты, полученные на основе модели, в целом удовлетворительно согласуются с экспериментом.

При всех начальных газосодержаниях и измеренные, и рассчитанные скорости уединенной УВ существенно превышают равновесную скорость звука в воде с пузырьками газа. Равновесная скорость звука c_e оценивается по формуле:

$$c_e^2 = \frac{\gamma p_1^0}{\rho_1 \phi_1^0 \phi_2^0}, \quad (14)$$

где $\gamma = 1,33$ для смеси $C_2H_2 + 2,5O_2$. В условиях экспериментов [17] скорость звука составляла приблизительно 82 м/с при $\phi_2^0 = 0,02$ и 48 м/с при $\phi_2^0 = 0,06$, т. е. в этих условиях уединенные волны распространялись с числом Маха, равным 9,4 и 8 соответственно.

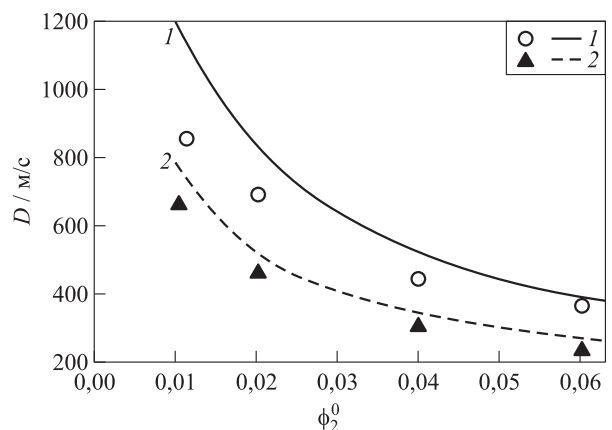


Рис. 5 Сравнение измеренных [17] (символы) и рассчитанных (кривые) зависимостей скоростей распространения уединенной УВ (1) и основной УВ (2) в воде с пузырьками стехиометрической ацетиленокислородной смеси от начального газосодержания

На рис. 6 приведено сравнение измеренного [20] и расчетного профилей уединенной УВ, распространяющейся квазистационарно со скоростью $D \approx 1130$ м/с в системе II при $\phi_2^0 = 0,01$ и $p_1^0 = 1$ атм. Видно, что в эксперименте и в расчете полуширина волны давления практически одинакова и составляет около 30 мкс.

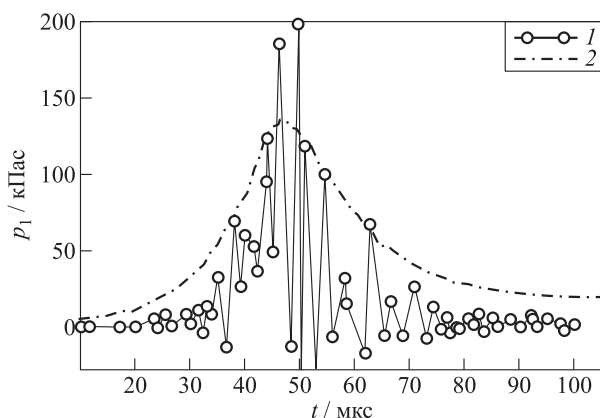


Рис. 6 Сравнение измеренного [20] (1) и рассчитанного (2) профилей давления в волне пузырьковой детонации (система II; $\phi_2^0 = 0,01$; $D \approx 1130$ м/с; $p_1^0 = 1$ атм)

4 Выводы

Таким образом, в работе предложена новая физико-математическая модель двухфазного двухскоростного неизотермического реагирующего течения, которая использовалась для расчета распространения ударных и детонационных волн в пузырьковых средах.

Показано, что в пузырьковой среде, состоящей из инертной жидкости и реакционноспособных газовых пузырьков, может распространяться квазистационарный сверхзвуковой самоподдерживающийся фронт реакции с быстрым и полным выгоранием горючего в лидирующей УВ. Такой фронт реакции можно трактовать как детонационноподобный или как пузырьковую детонацию.

Модель может быть использована для расчета двухфазных реагирующих течений в перспективных импульсно-детонационных водометных двигателях.

Литература

1. Фролов С. М., Аксенов В. С., Фролов Ф. С., Авдеев К. А. 2013. Водометный импульсный детонационный двигатель (варианты) и способы создания гидрореактивной тяги. Заявка РСТ/RU 2013/001148

от 23.12.2013. <http://www.idgcenter.ru/patentPCT-RU2013-001148.htm>.

2. Авдеев К. А., Аксенов 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.
3. Noordzij L. Shock waves in bubble–liquid mixture // Phys. Commun. Amst., 1971. Vol. 3. No. 1. P. 51.
4. Burdukov A. P., Kuznetsov V. V., Kutateladze S. S., Nakoryakov V. E., Pokusaev B. G., Shreiber I. R. Shock wave in a gas–liquid medium // J. Appl. Mech. Tech. Phys., 1973. Vol. 14. No. 3. P. 349–352.
5. Гельфанд Б. Е., Губин С. А., Козарко С. М., Козарко Б. С. Исследование волн сжатия в смеси жидкости с пузырьками газа // Докл. АН СССР, 1973. Т. 213. № 5. С. 1043–1064.
6. Mori Y., Hijikata K., Komine A. Propagation of pressure waves in two-phase flow // Int. J. Multiphas. Flow, 1975. Vol. 2. No. 2. P. 139–152.
7. Накоряков В. Е., Покусаев Б. Г., Шрейбер И. Р., Кузнецов В. В., Малых Н. В. Экспериментальное исследование ударных волн в жидкости с пузырьками газа // Волновые процессы в двухфазных системах: сб. статей / Под ред. С. С. Кутателадзе. — Новосибирск: Институт теплофизики СО АН СССР, 1975. С. 54–97.
8. Padmanabhan M. Shock wave formation in flowing bubbly mixtures by steepening of pressure waves // Int. J. Multiphas. Flow, 1978. Vol. 4. P. 81–88.
9. Borisov A. A., Gelfand B. E., Timofeev E. I. Shock waves in liquids containing gas bubbles // Int. J. Multiphas. Flow, 1983. Vol. 9. No. 5. P. 531–543.
10. Beylich A. E., Gülhan A. On the structure of nonlinear waves in liquids with gas bubbles // Phys. Fluids A Fluid. Dyn., 1990. Vol. 2. No. 8. P. 1412–1428.
11. Kameda M., Matsumoto Y. Shock waves in a liquid containing small gas bubbles // Phys. Fluids, 1996. Vol. 8. No. 2. P. 322–335.
12. Kameda M., Shimaura N., Higashino F., Matsumoto Y. Shock waves in a uniform bubbly flow // Phys. Fluids, 1998. Vol. 10. No. 10. P. 2661–2668.
13. Сычев А. И. Сильные ударные волны в пузырьковых средах // ЖТФ, 2010. Т. 80. № 6. С. 31–35.
14. Авдеев К. А., Аксенов В. С., Борисов А. А., Фролов С. М., Фролов Ф. С., Шамшин И. О. Исследование передачи количества движения от ударной волны к пузырьковой жидкости // Хим. физика, 2015. Т. 34. № 11. С. 27–32.
15. Hasegawa T., Fujiwara T. Detonation oxyhydrogen bubbled liquids // 19th Symposium (International) on Combustion Proceedings. — Elsevier, 1982. P. 675–683.
16. Сычев А. И. Воспламенение системы жидкость – пузырьки газа ударной волной // ФГВ, 1985. Т. 21. № 2. С. 130–134.
17. Сычев А. И. Волна детонации в системе жидкость – пузырьки газа // ФГВ, 1985. Т. 21. № 3. С. 103–110.

18. Сычев А. Н., Пинаев А. В. Самоподдерживающаяся детонация в жидкостях с пузырьками взрывчатого газа // ПМТФ, 1986. № 1. С. 133–138.
19. Пинаев А. В., Сычев А. И. Структура и свойства детонации в системах жидкость – пузырьки газа // ФГВ, 1986. Т. 22. № 3. С. 109–118.
20. Пинаев А. В., Сычев А. И. Влияние физико-химических свойств газа и жидкости на параметры и условия существования волны детонации в системах жидкость – пузырьки газа // ФГВ, 1987. Т. 23. № 6. С. 76–84.
21. Beylich A. E., Gülhan A. Waves in reactive bubbly liquids // *Adiabatic waves in liquid–vapor systems*. — Berlin–Heidelberg: Springer, 1990. P. 39–48.
22. Авдеев К. А., Аксёнов В. С., Борисов А. А., Садыков И. А., Фролов С. М., Фролов Ф. С., Шамшин И. О. Феноменология процесса распространения ударной волны в воде с пузырьками реакционноспособного газа // *Горение и взрыв*, 2016. Т. 9. № 4. С. 64–82.
23. Красный Ю. П., Михо В. В. Самоподдерживающаяся нелинейная волна детонации в жидкости с пузырьками горючего газа // ФГВ, 1989. Т. 25. № 2. С. 75–81.
24. Шаганов В. Ш., Вахитова Н. К. Волны в пузырьковой системе при наличии химических реакций в газовой фазе // ФГВ, 1989. Т. 25. № 6. С. 14–22.
25. Троцюк А. В., Фомин П. А. Модель пузырьковой детонации // ФГВ, 1992. Т. 28. № 4. С. 129–136.
26. Шаганов В. Ш., Абдрашитов Д. В. Структура волн детонации в пузырьковой жидкости // ФГВ, 1992. Т. 28. № 6. С. 89–96.
27. Kedrinskii V. K. The Iordansky – Kogarko – van Wijngaarden model: Shock and rarefaction wave interactions in bubbly media // *Appl. Sci. Res.*, 1997. Vol. 58. P. 115–130.
28. Авдеев К. А., Аксёнов В. С., Борисов А. А., Севастопольева Д. Г., Тухватуллина Р. Р., Фролов С. М., Фролов Ф. С. Ударные волны в воде с пузырьками реакционноспособного газа: расчет // *Горение и взрыв*, 2016. Т. 9. № 4. С. 47–63.
29. Иорданский С. В. Об уравнениях движения жидкости, содержащей пузырьки газа // ПМТФ, 1960. Т. 3. С. 102–110.
30. Когарко Б. С. Об одной модели кавитирующей жидкости // Докл. АН СССР, 1961. Т. 137. № 6. С. 1331–1333.
31. Wijngaarden V. L. On equations of motion for mixtures of liquid and gas bubbles // *J. Fluid Mech.*, 1968. Vol. 33. P. 465.
32. Нугматулин Р. И. Динамика многофазных сред. Часть I. — М.: Наука, 1987. 464 с.
33. Stuhmiller J. H. The influence of interfacial pressure forces on the character of two-phase flow model equations // *Int. J. Multiphas. Flow*, 1977. Vol. 3. No. 6. P. 551–560.
34. Tikhvatullina R. R., Frolov S. M. Well-posed Euler model of shock and detonation induced two-phase flow in bubbly liquid // *Progress in detonation physics* / Eds. S. M. Frolov, G. D. Roy. — Moscow: TORUS PRESS, 2016. P. 106–120.
35. Вильямс Ф. А. Теория горения / Пер с англ. — М.: Наука, 1971. 616 с. (*Williams F. A. Combustion theory*. — Addison-Wesley, 1985. 680 p.)
36. Haberman W. L., Morton R. K. An experimental investigation of the drag and shape of air bubbles rising in various liquids. Washington, DC, USA, 1953. Technical Report No. DTMB-802.
37. Smith G. P., Golden D. M., Frenklach M., Moriarty N. W., Eiteneer B., Goldenberg M., Bowman C. T., Hanson R. K., Song S., Gardiner W. C., Jr., Lissianski V. V., Qin Z. *GRI-Mech 3.0*, 2000. http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/.
38. Goodwin D. G., Moffat H. K., Speth R. L. Cantera: An object-oriented software toolkit for chemical kinetics, thermodynamics, and transport processes. Version 2.2.1, 2016. <http://www.cantera.org>.
39. Кутателадзе С. С., Накоряков В. Е. Теплообмен и волны в газожидкостных системах. — Новосибирск: Наука, 1984. 301 с.

Поступила в редакцию 14.02.17

SHOCK WAVES IN LIQUID CONTAINING INERT AND REACTIVE GAS BUBBLES

R. R. Tikhvatullina and S. M. Frolov

N. N. Semenov Institute of Chemical Physics, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation

Abstract: A physico-mathematical model of nonisothermal two-phase two-velocity flow of bubbly medium composed of inert liquid and inert or reactive gas bubbles is proposed. It is shown that a solution in the form of a shock wave with an oscillating structure and a supersonic self-sustaining solitary wave, or “bubble detonation,” can be obtained using the proposed model. Comparison of calculation results with experimental data on the velocity and structure of shock and detonation waves propagating in water with bubbles of nitrogen or acetylene–oxygen mixture showed satisfactory predictive capabilities of the model.

Keywords: bubbly medium; chemically reactive gas; bubble detonation; shock wave; two-phase flow

Acknowledgments

The work was partly supported by the Russian Ministry of Education and Science under the State Contract No. 14.609.21.0001 (Contract ID RFMEFI60914X0001) and the Russian Foundation for Basic Research (grant 16-29-01065 ofi-m).

References

1. Frolov, S. M., V. S. Aksenov, F. S. Frolov, and K. A. Avdeev. 2013. Vodometnyy impul'snyy detonatsionnyy dvigatel' (varianty) i sposob sozdaniya gidroreaktivnoy tyagi [Pulse detonation engine (variants) and the way to create hydrojet thrust]. PCT/RU 2013/001148. Available at: <http://www.idgcenter.ru/patentPCT-RU2013-001148.htm> (accessed June 2, 2017).
2. Avdeev, K. A., V. S. Aksenov, A. A. Borisov, R. R. Tikhvatullina, 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.
3. Noordzij, L. 1971. Shock waves in bubble–liquid mixtures. *Phys. Commun. Amst.* 3(1):51.
4. Burdukov, A. P., V. V. Kuznetsov, S. S. Kutateladze, V. E. Nakoryakov, B. G. Pokusaev, and I. R. Shreiber. 1973. Shock wave in a gas–liquid medium. *J. Appl. Mech. Tech. Phy.* 14(3):349–352.
5. Gel'fand, B. E., S. A. Gubin, B. S. Kogarko, and S. M. Kogarko. 1974. Investigation of compression waves in a mixture of liquid with gas bubbles. *Sov. Phys. Dokl.* 18:787.
6. Mori, Y., K. Hijikata, and A. Komine. 1975. Propagation of pressure waves in two-phase flow. *Int. J. Multiphas. Flow* 2(2):139–152.
7. Nakoryakov, V. E., B. G. Pokusaev, I. R. Shreiber, V. V. Kuznetsov, and N. V. Malykh. 1975. Eksperimental'noe issledovanie udarnykh voln v zhidkosti s puzyr'kami gaza [Experimental study of shock waves in a liquid with gas bubbles]. *Volnovye protsessy v dvukhfaznykh sistemakh* [Wave processes in two-phase systems]. Ed. S. S. Kutateladze. Novosibirsk: Institute of Thermal Physics SB USSR AN. 54–97.
8. Padmanabhan, M., and C. S. Martin. 1978. Shock-wave formation in owing bubbly mixtures by steepening of compression waves. *Int. J. Multiphas. Flow* 4(1):81–88.
9. Borisov, A., B. Gelfand, and E. Timofeev. 1983. Shock waves in liquids containing gas bubbles. *Int. J. Multiphas. Flow* 9(5):531–543.
10. Beylich, A. E., and A. Gülhan. 1990. On the structure of nonlinear waves in liquids with gas bubbles. *Phys. Fluids A Fluid Dyn.* 2(8):1412–1428.
11. Kameda, M., and Y. Matsumoto. 1996. Shock waves in a liquid containing small gas bubbles. *Phys. Fluids* 8(2):322–335.
12. Kameda, M., N. Shimaura, F. Higashino, and Y. Matsumoto. 1998. Shock waves in a uniform bubbly flow. *Phys. Fluids* 10(10):2661–2668.
13. Sychev, A. 2010. Intense shock waves in bubble media. *Tech. Phys.* 55(6):783–788.
14. Avdeev, K. A., V. S. Aksenov, A. A. Borisov, S. M. Frolov, F. S. Frolov, and I. O. Shamshin. 2015. Momentum transfer from a shock wave to a bubbly liquid. *Russ. J. Phys. Chem. B* 9(6):895–900.
15. Hasegawa, T., and T. Fujiwara. 1982. Detonation in oxy-hydrogen bubbled liquids. *19th Symposium (International) on Combustion Proceedings*. Elsevier. 675–683.
16. Sychev, A. 1985. Shock-wave ignition of liquid – gas bubble systems. *Combust. Expl. Shock Waves* 21(2):250–254.
17. Sychev, A. 1985. Detonation waves in a liquid – gas bubble system]. *Combust. Expl. Shock Waves* 21(3):365–372.
18. Sychev, A., and A. Pinaev. 1986. Samopodderzhivayushchayasya detonatsiya v zhidkostyakh s puzyr'kami vzryvchatogo gaza [Self-sustained detonation in liquids with bubbles of explosive gas]. *Zh. Prikl. Mekhan. Tekhn. Fiz.* 1:133–138.
19. Pinaev, A., and A. Sychev. 1986. Structure and properties of detonation in a liquid – gas bubble system]. *Combust. Expl. Shock Waves* 22(3):360–368.
20. Pinaev, A., and A. Sychev. 1987. Effects of gas and liquid properties on detonation-wave parameters in liquid–bubble systems]. *Combust. Expl. Shock Waves* 23(6):735–742.
21. Beylich, A. E., and A. Gülhan. 1990. Waves in reactive bubbly liquids. *Adiabatic waves in liquid–vapor systems*. Berlin–Heidelberg: Springer. 39–48.
22. Avdeev, K. A., V. S. Aksenov, A. A. Borisov, I. A. Sadykov, S. M. Frolov, F. S. Frolov, and I. O. Shamshin. 2016. Fenomenologiya protsessa rasprostraneniya udarnoy volny v vode s puzyr'kami reaktsionnosposobnogo gaza [The phenomenology of the process of shock wave propagation in water with reactive gas bubbles]. *Goren. Vzryv (Mosk.) — Combustion and Explosion* 9(4):64–82.
23. Krasnyj, Yu., and V. Mikho. 1989. Self-sustaining nonlinear detonation wave in a liquid with bubbles of combustible gas. *Combust. Expl. Shock Waves* 25(2):200–205.
24. Shagapov, V., and N. Vakhitova. 1989. Waves in a gas-phase bubble system in the presence of chemical reactions. *Combust. Expl. Shock Waves* 25(6):669–677.
25. Trotsyuk, A. V., and P. A. Fomin. 1992. Model of bubble detonation. *Combust. Expl. Shock Waves* 28(4):439–445.
26. Shagapov, V., and D. Abdrashitov. 1992. Detonation wave structure in bubble liquid. *Combust. Expl. Shock Waves* 28(6):654–660.
27. Kedrinskii, V. 1997. The Iordansky – Kogarko – van Wijngaarden model: Shock and rarefaction wave interactions in bubbly media. *Appl. Sci. Res.* 58(1-4):115–130.
28. Avdeev, K. A., V. S. Aksenov, A. A. Borisov, D. G. Sevastopoleva, R. R. Tikhvatullina, S. M. Frolov, and F. S. Frolov. 2016. Udarnye volny v vode s puzyr'kami reaktsionnosposobnogo gaza: Raschet [Shock waves in water with bubbles

- of reactive gas: Calculation]. *Goren. Vzryv (Mosk.) — Combustion and Explosion* 9(4):47–63.
29. Iordansky, S. 1960. Ob uravneniyakh dvizheniya zhidkosti, soderzhashchey puzyr'ki gaza [The equations of motion of the liquid containing gas bubbles]. *Zh. Prikl. Mekhan. Tekhn. Fiz.* 3:102–110.
 30. Kogarko, B. 1961. Ob odnoy modeli kavitiruyushchey zhidkosti [On a model of cavitating liquid]. *Dokl. Akad. Nauk SSSR* 137(6):1331–1333.
 31. Wijngaarden, L. V. 1968. On the equations of motion for mixtures of liquid and gas bubbles. *J. Fluid Mech.* 33(3):465–474.
 32. Nigmatulin, R. I. 1990. *Dynamics of multiphase media: Vol. 1*. New York, NY: Hemisphere. 532 p.
 33. Stuhmiller, J. 1977. The influence of interfacial pressure forces on the character of two-phase flow model equations. *Int. J. Multiphas. Flow* 3(6):551–560.
 34. Tukhvatullina, R., and S. Frolov. 2016. Well-posed Euler model of shock and detonation induced two-phase flow in bubbly liquid. *Progress in detonation physics*. Eds. S. M. Frolov and G. D. Roy. Moscow: TORUS PRESS. 106–120.
 35. Williams, F. A. 1985. *Combustion theory*. Addison-Wesley. 680 p.
 36. Haberman, W., and R. Morton. 1953. An experimental investigation of the drag and shape of air bubbles rising in various liquids. Washington, DC. Technical Report No. DTMB-802.
 37. Smith, G. P., D. M. Golden, M. Frenklach, N. W. Moriarty, B. Eiteneer, M. Goldenberg, C. T. Bowman, R. K. Hanson, S. Song, W. C. Gardiner, Jr., V. V. Sianski, and Z. Qin. 2000. GRI-Mech 3.0. Available at: http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/ (accessed June 2, 2017).
 38. Goodwin, D. G., H. K. Moffat, and R. L. Speth. 2017. Cantera: An object-oriented software toolkit for chemical kinetics, thermodynamics, and transport processes. Version 2.3.0. Available at: <http://www.cantera.org> (accessed June 2, 2017).
 39. Kutateladze, S. S., and V. E. Nakorakov. 1984. Teplomas-soobmen i volny v gazozhidkostnykh sistemakh [Heat and mass transfer and waves in gas–liquid systems]. Novosibirsk: Nauka. 301 p.

Received February 14, 2017

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; professor, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), 31 Kashirskoe Sh., Moscow 115409, Russian Federation; smfrol@chph.ras.ru

Tukhvatullina Ruzana R. (b. 1988) — junior research scientist, N. N. Semenov Institute of Chemical Physics, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; tukhvatullinarr@gmail.com