

УДАРНЫЕ ВОЛНЫ В ВОДЕ С ПУЗЫРЬКАМИ РЕАКЦИОННОСПОСОБНОГО ГАЗА: РАСЧЕТ*

К. А. Авдеев¹, В. С. Аксёнов², А. А. Борисов³, Д. Г. Севастополева⁴,
Р. Р. Тухватуллина⁵, С. М. Фролов⁶, Ф. С. Фролов⁷

Аннотация: На основе уравнений двухфазного сжимаемого вязкого реагирующего течения проведено численное исследование проникновения ударной волны (УВ) из газа в воду с пузырьками реакционноспособного газа (стехиометрической ацетиленокислородной смеси), равномерно распределенными по объему жидкости. Показано, что в такой пузырьковой жидкости может распространяться стационарный сверхзвуковой самоподдерживающийся фронт реакции с быстрым и полным выгоранием горючего в лидирующей УВ. Такой фронт реакции можно трактовать как детонационноподобный или как «пузырьковую детонацию». Проведено сравнение расчетной и измеренной скоростей волны пузырьковой детонации в диапазоне начальных газосодержаний от 2% до 6%. Получено удовлетворительное качественное и количественное согласие результатов. Численно исследована структура волн пузырьковой детонации. Показано, что в таких волнах газосодержание за лидирующим фронтом оказывается приблизительно в 3–4 раза больше, чем в волнах давления, распространяющихся в воде с пузырьками воздуха при прочих равных начальных условиях. Волна пузырьковой детонации может формироваться после проникновения УВ на неболь-

* Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России по государственному контракту № 14.609.21.0001 (идентификатор контракта RFMEFI60914X0001) «Разработка технологии создания гидрореактивной тяги в водометных двигателях высокоскоростных водных транспортных средств и создание стендового демонстрационного образца гидрореактивного импульсно-детонационного двигателя» в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы». Фамилии в списке авторов статьи перечислены в алфавитном порядке.

¹ Центр импульсно-детонационного горения; Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, kaavdeev@mail.ru

² Центр импульсно-детонационного горения; Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», vaksenov@mail.ru

³ Центр импульсно-детонационного горения; Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, borisov@chph.ras.ru

⁴ Центр импульсно-детонационного горения; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», dinasevastopoleva@icloud.com

⁵ Центр импульсно-детонационного горения, tukhvatullinart@gmail.com

⁶ Центр импульсно-детонационного горения; Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», smfrol@chph.ras.ru

⁷ Центр импульсно-детонационного горения; Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, f.frolov@chph.ru

шую (~ 300 мм) глубину в столб пузырьковой жидкости. Предложенная модель может быть использована для поиска условий достижения наибольшей эффективности передачи количества движения от волн давления к пузырьковой жидкости в перспективных импульсно-детонационных водометных движителях.

Ключевые слова: пузырьковая среда; реакционноспособный газ; ударная волна; гидроударная труба; реагирующее двухфазное течение

1 Введение

В патенте [1] и в статьях [2–4] для создания гидрореактивной тяги вместо механических движителей типа гребного винта, импеллера и др. предложено использовать импульсно-детонационный водометный движитель. Основные элементы такого движителя — импульсно-детонационная трубка, периодически заполняемая топливно-воздушной смесью для генерации УВ, и профилированный водовод, в котором с помощью УВ забортная вода ускоряется, создавая гидрореактивную тягу. Чтобы обеспечить эффективное вовлечение забортной воды в движение за УВ, в [1] предложено увеличить сжимаемость воды в водоводе путем добавления в нее пузырьков химически инертного или химически активного газа. В [2–4] представлены результаты экспериментов и расчетов по передаче импульса от УВ к воде с химически инертными пузырьками газа — воздуха.

Известно [5–9], 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.

Пузырьковая детонация, по-видимому, впервые наблюдалась в экспериментах [5] в вертикальной трубе квадратного сечения (50×50 мм) длиной 1985 мм. В экспериментах исследовалось прохождение УВ через столб жидкого глицерина с цепочкой пузырьков реакционноспособного газа (смесь 30% ($2\text{H}_2 + \text{O}_2$) + 70% Ar). Длина цепочки ~ 670 мм, средний диаметр пузырьков ~ 10 мм. Позже, в [6–8], проведены систематические экспериментальные исследования пузырьковой детонации в системе жидкость (вода) — пузырьки реакционно способного газа (стехиометрическая ацетиленокислородная смесь) в вертикальной гидроударной трубе внутренним диаметром 35 мм и общей высотой 5635 мм (высота столба пузырьковой жидкости — 4195 мм). В экспериментах [7, 8] пузырьковую детонацию инициировали, перепуская газовую детонацию в столб пузырьковой жидкости с начальным объемным газосодержанием α_{20} , достигающим 8%–10%. В этих экспериментах пузырьковая детонация возникала лишь при относительно низких α_{20} , не превышающих 6% (верхний предел газосодержания), на значительном удалении от границы раздела «газ — пузырьковая жидкость»: от 2,5 до 3,5 м. Попытки получить пузырьковую детонацию в более газонасыщенной воде не увенчались успехом. При очень низком газосодержании, меньшем 0,5% (нижний предел газосодержания), пузырьковая детонация тоже не наблюдалась.

В [9] проведена серия экспериментов, в которых, в частности, исследовалось влияние вязкости жидкости на пределы существования пузырьковой детонации по начальному объемному газосодержанию. Эксперименты проводились в условиях, схожих с условиями [7, 8]. Установлено, что повышение вязкости (за счет добавления в воду глицерина до 50 % (об.)), позволяет инициировать пузырьковую детонацию при меньшей амплитуде инициирующей УВ (17 атм вместо 40–50 атм в [7, 8]). При этом отмечено влияние вязкости жидкости на пределы детонации по начальному объемному газосодержанию. Так, при добавлении в воду глицерина до 25 % (об.) инициировать пузырьковую детонацию ударной волной с амплитудой 17 атм удавалось только при начальном газосодержании 1%. Увеличение начального газосодержания до 6% требовало повышения амплитуды УВ до 60 атм.

В работах [5–9] отмечены основные особенности пузырьковой детонации. Во-первых, скорость ее распространения всегда выше скорости распространения УВ в жидкости с пузырьками химически инертного газа в сходных условиях и заведомо выше скорости звука в пузырьковой жидкости. Например, в [7] при $\alpha \approx 2\%$ скорость пузырьковой детонации составила ~ 560 м/с, скорость УВ ~ 425 м/с, а низкочастотная скорость звука ~ 85 м/с. Во-вторых, процесс распространения пузырьковой детонации самоподдерживающийся [7], тогда как УВ в жидкости с пузырьками химически инертного газа постепенно затухает.

Для применения пузырьковой детонации в импульсно-детонационных водометных двигателях необходимо знать, возможно ли получить пузырьковую детонацию в воде на коротких расстояниях (менее 1 м) в широком диапазоне значений объемного газосодержания. Эту информацию можно получить, например, на основе физико-математической модели процесса и соответствующих численных расчетов. Такие расчеты позволили бы определить параметрическую область существования пузырьковой детонации для постановки эксперимента.

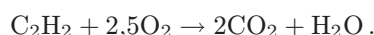
Известные одномерные физико-математические модели процесса [10–12] основаны на допущении о равенстве скоростей фаз. В [13] для описания структуры волны пузырьковой детонации предложена одномерная двухскоростная одностепенная модель. В работах авторов [2–4] предложена модель многомерного двухтемпературного двухскоростного двухфазного нереагирующего течения, которая использована для расчета распространения УВ в воде с пузырьками воздуха. В данной работе модель [2–4] расширена для описания течений жидкости с пузырьками реакционноспособного газа.

2 Математическая модель

Математическая модель двухфазного сжимаемого вязкого реагирующего течения основана на системе дифференциальных уравнений сохранения массы, количества движения и энтальпии среды, использованной в предыдущих работах авторов [2–4].

В отличие от работ [2–4], в которых рассматривались пузырьки химически инертного газа (воздуха), в данной работе система определяющих уравнений дополнена химическими источниками в уравнении неразрывности i -го химического компонента $\dot{\omega}_i$ и в уравнении сохранения энтальпии в газовой фазе $\alpha_2 \dot{\omega}_T$, где α_2 — объемная доля газовой фазы в пузырьковой жидкости.

Поскольку в экспериментальных работах [6–9] одним из основных объектов исследований была вода с пузырьками стехиометрической ацетиленокислородной смеси, для упрощения задачи предполагали, что в пузырьках возможно протекание необратимой одностадийной химической реакции:



В соответствии с феноменологическим законом в химической кинетике источник $\dot{\omega}_i$ определяется выражением

$$\dot{\omega}_i = W_i (\nu_i'' - \nu_i') A e^{-E/(RT_2)} \left(\frac{Y_F \rho_2}{W_F} \right) \left(\frac{Y_{\text{Ox}} \rho_2}{W_{\text{Ox}}} \right)$$

с эффективными значениями предэкспоненциального множителя $A = 2 \cdot 10^8 \text{ м}^3/\text{кмоль}\cdot\text{с}$ и энергии активации $E = 47\,409 \text{ Дж/моль}$, входящими в выражение для константы скорости бимолекулярной реакции [14]; ν_i' — стехиометрический коэффициент компонента i , являющегося реагентом в реакции; ν_i'' — стехиометрический коэффициент компонента i , являющегося продуктом в реакции; R — универсальная газовая постоянная; W_i — молярная масса компонента i ; Y_i — массовая доля компонента i , индексы F и Ox относятся к ацетилену и кислороду соответственно. Для источника в уравнении сохранения энтальпии $\alpha_2 \dot{\omega}_T$ имеем:

$$\alpha_2 \dot{\omega}_T = -\alpha_2 \rho_2 \sum_i (\Delta h_{f,i}^0) \frac{dY_i}{dt},$$

где $\Delta h_{f,i}^0$ — стандартная энтальпия образования i -го вещества газовой фазы. Отметим, что модель позволяет использовать и детальные кинетические механизмы окисления горючего, однако на данном этапе исследований применение таких механизмов преждевременно.

3 Алгоритм

Систему определяющих уравнений представляли в виде обобщенного уравнения для переменной $\phi_k(x, t)$, где индекс k относится к той или иной фазе (1 — жидкость; 2 — газ):

$$\underbrace{\frac{\partial \alpha_k \rho_k \phi_k}{\partial t}}_{\text{Скорость изменения: } R} + \underbrace{\nabla \cdot \alpha_k \rho_k v_k \phi_k}_{\text{Конвекция: } C} - \underbrace{\nabla \cdot \alpha_k \Gamma_{\phi k} \nabla \phi_k}_{\text{Диффузия: } D} = \underbrace{\nabla \cdot \alpha_k S_{\phi k}^A + S_{\phi k}^V}_{\text{Источники: } S}. \quad (1)$$

В левой части (1) первое слагаемое (R) описывает изменение переменной ϕ_k во времени; второе слагаемое (C) — ее конвективный перенос; третье слагаемое (D) — ее перенос диффузией (Γ_{ϕ_k} — коэффициент диффузии). В правой части (1) слагаемое (S) описывает источники ϕ_k , включающие источники в объеме $S_{\phi_k}^V$ и на поверхности $\nabla \cdot \alpha_k S_{\phi_k}^A$ (включают часть диффузионного потока, не учтенного в слагаемом D). Члены межфазного взаимодействия включены в объемные источники $S_{\phi_k}^V$.

Интегрируя (1) по некоторой шестигранной ячейке P , после применения теоремы Гаусса–Остроградского получим:

$$\underbrace{\frac{d}{dt} (\alpha_k \rho_k \phi_k V_{\text{cel}})_P}_R + \sum_{f=1}^{n_f} \underbrace{(\alpha_k \rho_k v_k A \phi_k)_f}_{C_f} - \sum_{f=1}^{n_f} \underbrace{(\alpha_k \Gamma_{\phi_k} \nabla \phi_k A)_f}_{D_f} = \sum_{f=1}^{n_f} \underbrace{(\alpha_k S_{\phi_k}^A A)_f}_{S_{\phi}^A} + \underbrace{(S_{\phi_k}^V V_{\text{cel}})_P}_{S_{\phi}^V}, \quad (2)$$

где индекс P относится к значениям переменных в центре ячейки, а индекс f — к значениям в центре грани; слагаемые C_f и D_f описывают конвективный и диффузионный перенос переменной ϕ_k через грань f соответственно; n_f — количество граней у ячейки P ; A — площадь грани f ; V_{cel} — объем ячейки. Все зависимые переменные (объемная доля, плотность, скорость, давление, энтальпия и концентрации компонентов) определяются в центрах ячеек. Для решения системы (2) использовали сегрегированный алгоритм типа SIMPLE (semiimplicit method for pressure linked equations) [15]. Конвективный перенос в законе сохранения массы аппроксимировали центральной разностью, в законе сохранения количества движения — схемой TVD (total variation diminishing) с лимитером MINMOD, а для остальных уравнений использовали стандартную схему UPWIND первого порядка.

Химические источники рассчитывались в предположении постоянства объема по неявному методу Адамса второго порядка с внутренним шагом интегрирования.

4 Результаты расчетов

4.1 Скорость ударных волн в пузырьковой жидкости в условиях эксперимента [7]

Для проверки модели провели расчеты для условий, близких к экспериментам [7]. Расчеты проводились в одномерном приближении с сохранением основных геометрических параметров гидроударной трубы [7]. На стенке трубы задавались условия проскальзывания и отсутствия теплового потока. Расчеты проводились на разных расчетных сетках до получения результатов, не зависящих от сетки: дальнейшее измельчение сетки и уменьшение шага интегрирования по времени никак не влияло на скорость УВ в пузырьковой жидкости.

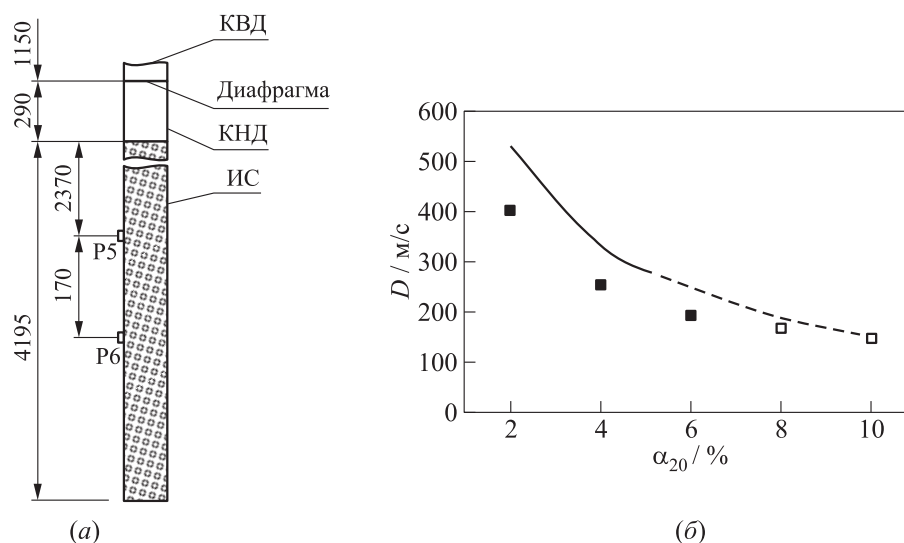


Рис. 1 Схема экспериментальной установки (а) (размеры указаны в миллиметрах) и результаты сравнения рассчитанной (кривая) и измеренной (значки) в [7] зависимостей скорости УВ от начального объемного газосодержания в воде с пузырьками ацетиленокислородной смеси (б)

Эксперименты [7] выполнены в вертикальной гидроударной трубе (рис. 1, а) внутренним диаметром 35 мм. Высокое начальное давление в камере высокого давления (КВД) в [7] создавалось за счет сжигания стехиометрической ацетиленокислородной смеси, камеру низкого давления (КНД) заполняли воздухом при атмосферном давлении, а в измерительной секции (ИС) создавали столб воды с начальным объемным газосодержанием α_{20} от 1% до 10% при среднем размере пузырьков реакционноспособного газа (стехиометрическая ацетиленокислородная смесь) $d_{20} = 3,5\text{--}4,0$ мм. Температура воды, воздуха и реакционноспособного газа в экспериментах [7] была комнатной. Экспериментальные значения средних скоростей УВ, полученных в этих условиях, представлены квадратами на рис. 1, б. Значения скоростей получены по записям давления на датчиках P5 и P6 (см. рис. 1, а). Отметим, что пузырьковая детонация в [7] со свечением продуктов горения ацетилена наблюдалась при α_{20} от 2% до 6% (зачерненные квадраты), тогда как при $\alpha_{20} > 6\%$ свечение продуктов горения ацетилена не регистрировалось, т. е. по утверждению авторов [7] детонация отсутствовала (пустые квадраты).

Для проведения расчетов принимались следующие условия. Параметры среды в КВД (длина 1150 мм): воздух при начальном давлении 62,94 атм и начальной температуре 4278 К, т. е. продукты горения ацетиленокислородной смеси заменены на воздух с соответствующими начальными параметрами, рассчитанными по термодинамической программе. Параметры в КНД (длина 290 мм): воздух

при начальном давлении 1 атм и начальной температуре 293 К. Параметры в ИС (длина 4195 мм): вода с пузырьками стехиометрической газовой ацетиленокислородной смеси (массовые доли C_2H_2 и O_2 равны 0,2453 и 0,7547 соответственно) при начальном давлении 1 атм и начальной температуре 293 К.

Сплошная и штриховая кривые на рис. 1, б — зависимость скорости УВ от газосодержания воды, полученная авторами с помощью численных расчетов. Скорость УВ определяли на расстоянии 2370 мм от контактной границы «воздух — пузырьковая жидкость» (местоположение датчика давления Р5 на рис. 1, а). В расчетах при $\alpha = 2\%–5\%$ скорость УВ не изменялась по длине столба пузырьковой жидкости, поэтому такие волны трактовались как волны самоподдерживающейся пузырьковой детонации. Видно, что рассчитанная скорость пузырьковой детонации (сплошная кривая), хотя и превышает скорость, измеренную в [7] при $\alpha_{20} = 2\%–6\%$, но снижается с ростом α_{20} так же, как в эксперименте. Верхний предел пузырьковой детонации по газосодержанию в расчете оказался несколько ниже (5%), чем в эксперименте (6%). При $\alpha_{20} > 5\%$ полученные в расчете УВ затухали по длине столба пузырьковой жидкости, поэтому такие волны не относились к волнам самоподдерживающейся пузырьковой детонации (штриховая кривая). Из рис. 1, б видно, что в этом интервале газосодержаний результаты расчетов и экспериментов согласуются значительно лучше. Структура волн обоих типов обсуждается ниже в разд. 4.2.

Отметим, что при всех газосодержаниях и измеренные, и рассчитанные скорости УВ существенно превышают максимальную (низкочастотную) скорость звука в воде с пузырьками газа. Согласно [16], низкочастотная скорость звука c_0 определяется по формуле:

$$c_0^2 = \frac{1}{\alpha_{10}\rho_{10} + \alpha_{20}\rho_{20}} \left(\frac{\alpha_{10}}{c_{10}^2\rho_{10}} + \frac{\alpha_{20}}{c_{20}^2\rho_{20}} \right)^{-1}.$$

В условиях экспериментов [7] низкочастотная скорость звука составляла приблизительно 85 м/с при $\alpha_{20} = 2\%$ и 40 м/с при $\alpha_{20} = 10\%$, т. е. в этих условиях УВ распространялись с числом Маха $M = D/c_0$, равным 5 и 3,7 соответственно.

4.2 Скорость и структура ударных волн в пузырьковой жидкости в гидроударной трубе [4]

Для понимания свойств рассматриваемых УВ необходимо, прежде всего, рассмотреть их пространственную структуру, получаемую в численных расчетах. Расчеты проводили для вертикальной гидроударной трубы прямоугольного сечения 50×100 мм [4], в которой исследовалось распространение УВ в воде с химически инертными пузырьками воздуха. Расчеты проводились в двумерном приближении с сохранением основных геометрических параметров трубы [4]. На стенках трубы задавались условия проскальзывания и отсутствия теплового потока. На рис. 2, а показана одна из конфигураций гидроударной трубы, подготовленной

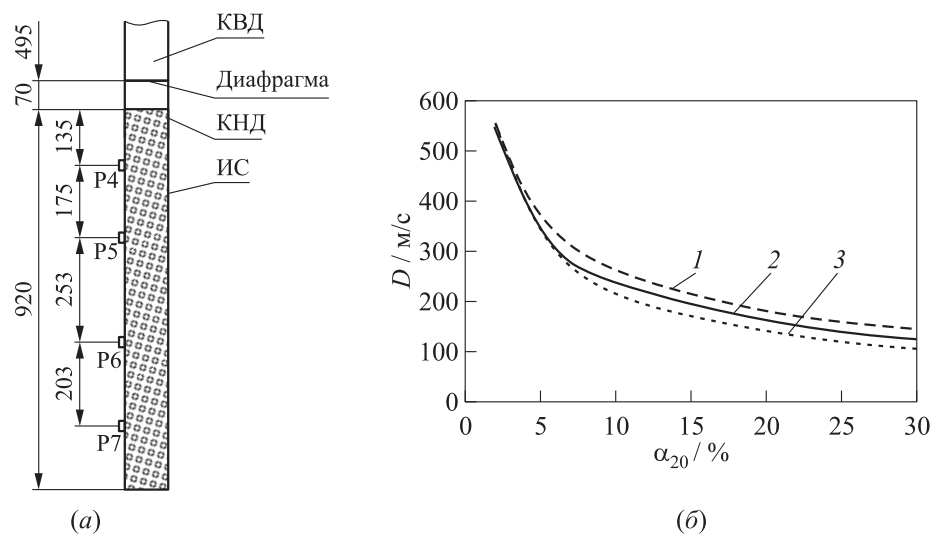


Рис. 2 Схема экспериментальной установки (а) (размеры указаны в миллиметрах) и результаты расчетов (кривые) зависимостей скорости УВ от начального объемного газосодержания в воде с пузырьками ацетиленокислородной смеси на измерительных участках Р4–Р5 (1), Р5–Р6 (2) и Р6–Р7 (3)

для экспериментальных исследований пузырьковой детонации в воде с пузырьками стехиометрической ацетиленокислородной смеси. Высокое начальное давление в КВД этой трубы будет создаваться за счет сжигания стехиометрической смеси пропана с кислородом. Камера низкого давления будет заполняться воздухом при атмосферном давлении, а в ИС будет создаваться столб воды с начальным объемным газосодержанием α_{20} от 2% до 30% при среднем размере пузырьков реакционноспособного газа $d_{20} = 2\text{--}4$ мм. Начальная температура всех сред в экспериментах будет комнатной.

Для проведения расчетов принимались следующие условия. Параметры среды в КВД (длина 495 мм): воздух при начальном давлении 63 атм и начальной температуре 3860 К, т. е. продукты горения пропаноокислородной смеси заменены на воздух с соответствующими начальными параметрами, близкими к рассчитанным по термодинамической программе. Отметим, что согласно [6–9] именно такие значения давления в КВД необходимы для получения пузырьковой детонации в рассматриваемой системе. Параметры в КНД (длина 70 мм): воздух при начальном давлении 1 атм и начальной температуре 293 К. Параметры в ИС (длина 920 мм): вода с пузырьками стехиометрической газовой ацетиленокислородной смеси при начальном давлении 1 атм и начальной температуре 293 К.

Кривые на рис. 2, б — зависимости скорости УВ от газосодержания воды с пузырьками реакционноспособного газа, полученные с помощью численных

рачетов при α_{20} от 2% до 30% для измерительных участков Р4–Р5 (кривая 1), Р5–Р6 (2) и Р6–Р7 (3), показанных на рис. 2, а. Скорость УВ определяли так же, как это делают в экспериментах: например, для участка Р5–Р6 делили расстояние между датчиками Р5 и Р6 на интервал времени, за который УВ преодолевала это расстояние.

Из рис. 2, б видно, что при $2\% \leq \alpha_{20} \leq 6\%$ кривая 1 лежит выше кривых 2 и 3, причем кривые 2 и 3 сливаются. Это означает, что на измерительном участке Р4–Р5 УВ затухает, однако на измерительных участках Р5–Р6 и Р6–Р7 она распространяется с постоянной скоростью. При $\alpha_{20} > 6\%$ кривые 2 и 3 расходятся: скорость УВ на участке Р6–Р7 (кривая 3) меньше, чем на участке Р5–Р6 (кривая 2), т. е. на участках Р4–Р5, Р5–Р6 и Р6–Р7 УВ монотонно затухает.

Как и на рис. 1, б, расчетная скорость стационарной УВ на участках Р5–Р6 и Р6–Р7 при $2\% \leq \alpha_{20} \leq 6\%$ уменьшается с ростом газосодержания. Кроме того, в проведенных расчетах УВ распространяются с числом Маха $M = D/c_0$, равным 6,6 и 5,9 при $\alpha_{20} = 2\%$ и 6% соответственно.

На рис. 3 показан пример расчетных зависимостей давления в сечениях, в которых расположены датчики Р4, Р5 и Р6 в ИС (см. рис. 2, а, далее — в сечениях 4, 5 и 6) от времени при начальном объемном газосодержании 6%. Видно, что в сечение 4 приходит волновой пакет: ярко выраженный лидирующий ударный фронт с присоединенной волной разрежения и вторичным повышением давления, за которым следуют еще одна волна разрежения и УВ, отраженная от закрытого торца КВД. В сечении 5 наблюдается ярко выраженный лидирующий ударный фронт с небольшим вторичным повышением давления и с присоединенной волной разрежения. Профиль волнового пакета в сечении 6 точно такой же, как

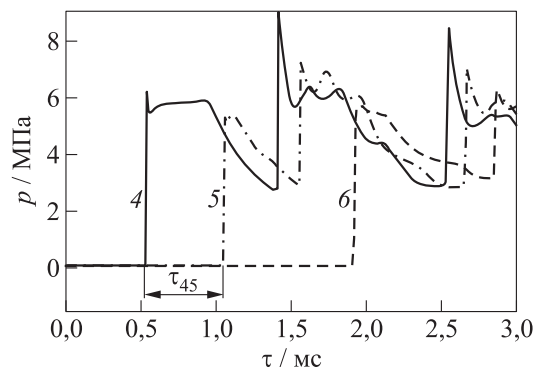


Рис. 3 Пример расчетных зависимостей давления от времени в сечениях, в которых расположены датчики Р4–Р6 (сечениях 4–6), при начальном объемном газосодержании ацетиленокислородной смеси в воде 6%: τ — время; τ_{45} — время прохождения фронтом УВ расстояния между сечениями 4 и 5; X_{45} — расстояние между сечениями 4 и 5; D_{45} — скорость УВ между сечениями 4 и 5 ($D_{45} = X_{45}/\tau_{45}$)

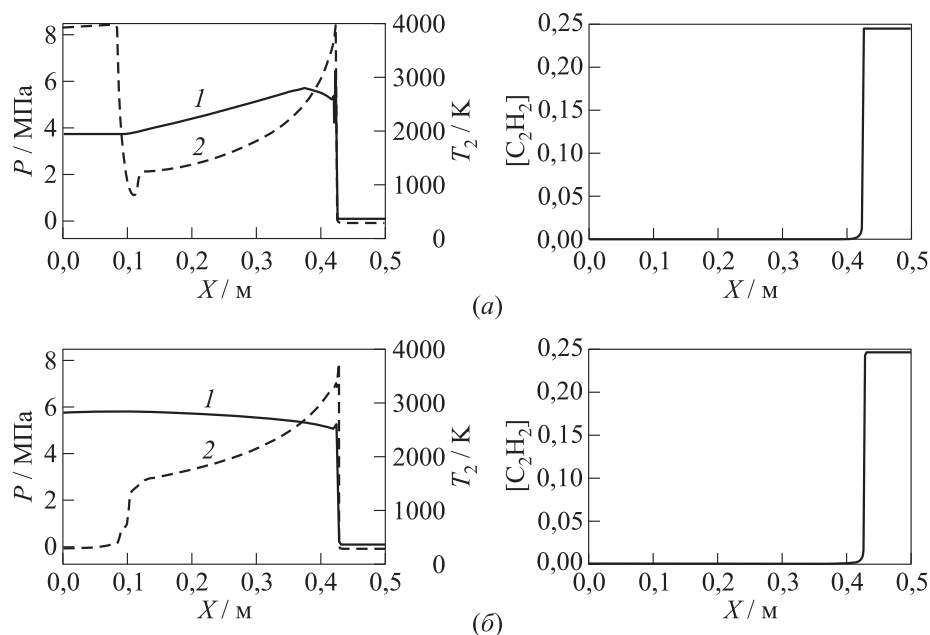


Рис. 4 Структура УВ в сечении 5 при начальном газосодержании 6% (а) и 2% (б): 1 — давление; 2 — температура в пузырьке; $[C_2H_2]$ — массовая доля ацетилена в пузырьке

в сечении 5, причем волновой пакет отдалается от отраженной УВ. На основе данных рис. 2, б и рис. 3 можно заключить, что на участках P5–P6 и P6–P7, так же как и в сечениях 5 и б, наблюдается стационарный процесс распространения УВ в пузырьковой жидкости.

На рис. 4 показана расчетная структура УВ при α_{20} , равном 6% (рис. 4, а) и 2% (рис. 4, б), в момент, когда ее фронт достигает сечения 5 (момент времени 1,05 мс на рис. 3). Ширина зоны горения ацетилена в обоих случаях составляет 3 мм. Учитывая, что скорость среды за фронтом стационарной УВ в движущейся системе координат слабо отличается от скорости самой волны (~ 294 м/с при $\alpha_{20} = 6\%$ и 556 м/с при $\alpha_{20} = 2\%$), получаем время реакции менее 15 мкс. Другими словами, в лидирующем ударном фронте очень быстро (менее чем за 15 мкс) сгорает весь ацетилен, содержащийся в пузырьках газа; температура газа в пузырьках скачком повышается до 3900 (см. рис. 4, а) и 3500 К (см. рис. 4, б), а затем медленно снижается до ~ 1200 (см. рис. 4, а) и 1500 К (см. рис. 4, б) в волне разрежения. Очевидно, полное сгорание ацетилена в лидирующем ударном фронте волны давления связано с высокой температурой ударного сжатия пузырьков. Стационарный фронт реакции с такой структурой, распространяющийся с существенно сверхзвуковой скоростью, следует рассматривать как детонационноподобную волну или волну «пузырьковой детонации» (по терминологии [5]).

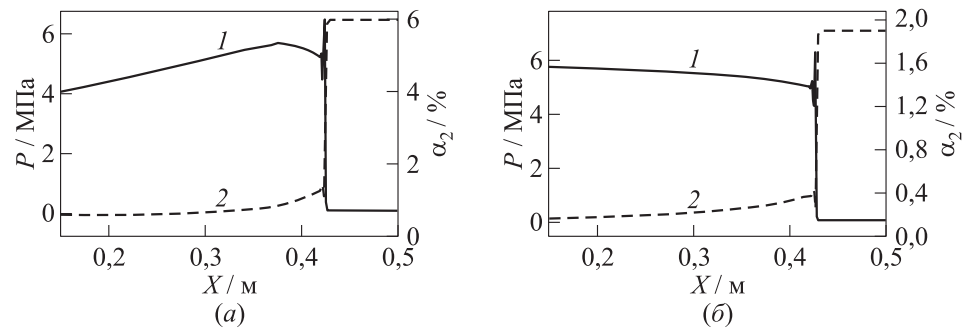


Рис. 5 Структура волны пузырьковой детонации в сечении 5 при начальном газосодержании ацетиленокислородной смеси в воде 6% (а) и 2% (б): 1 — давление; 2 — газосодержание

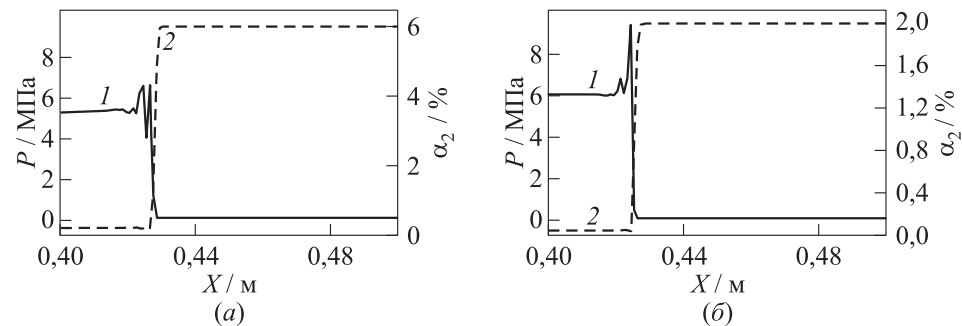


Рис. 6 Структура УВ в воде с пузырьками воздуха в сечении 5 при начальном газосодержании 6% (а) и 2% (б): 1 — давление; 2 — газосодержание

В условиях проведенных расчетов пузырьковая детонация получена при $2\% \leq \alpha_{20} \leq 6\%$ на расстоянии около 300 мм от свободной поверхности пузырьковой жидкости (сечение 5 на рис. 2, а). При $\alpha_{20} > 6\%$ в расчетах получались затухающие волны давления. Как и в экспериментах [7], на рис. 2, б верхний расчетный предел пузырьковой детонации по газосодержанию составил 6%. Отметим, что в [7] детонация наблюдалась на расстоянии ~ 2500 мм от свободной поверхности пузырьковой жидкости.

Интересно проследить за изменением газосодержания в волне пузырьковой детонации по сравнению с изменением газосодержания в УВ, распространяющейся в жидкости с пузырьками химически инертного газа.

На рис. 5 показано изменение газосодержания в волнах пузырьковой детонации при начальных газосодержаниях α_{20} , равных 6% (рис. 5, а) и 2% (рис. 5, б), а на рис. 6 — в УВ, бегущих в воде с химически инертными пузырьками воздуха при тех же начальных условиях. В лидирующем фронте волны пузырьковой

детонации газосодержание скачком уменьшается приблизительно в 6 раз (с 6% до 1% на рис. 5, *a* и с 2% до 0,3% на рис. 5, *b*), а затем медленно уменьшается еще приблизительно в 2 раза (до 0,6% на рис. 5, *a* и до 0,17% на рис. 5, *b*). Во фронте же УВ на рис. 6 газосодержание уменьшается скачком приблизительно в 30–40 раз (с 6% до 0,2% на рис. 6, *a* и с 2% до 0,05% на рис. 6, *b*). Другими словами, газосодержание за лидирующим фронтом пузырьковой детонации оказывается приблизительно в 3–4 раза больше, чем в УВ, распространяющейся в воде с пузырьками воздуха.

Анализ структуры УВ, распространяющихся в пузырьковой жидкости с $\alpha_{20} > 6\%$, показывает постепенное расширение зоны горения и снижение максимальной температуры продуктов горения с ростом α_{20} . Так, при $\alpha_{20} = 10\%$ расчетная ширина зоны горения ацетилена составляет ~ 5 мм, при 20% — ~ 10 мм и при 30% — ~ 15 мм, а соответствующие значения максимальной температуры меньше, чем в волне пузырьковой детонации (3900 К), и равны 2900, 2600 и 1000 К.

4.3 Передача импульса от ударных волн к пузырьковой жидкости

Ударные волны, распространяясь в пузырьковой жидкости, вовлекают жидкость в движение. В соответствии с [1] этот эффект можно использовать для создания импульсно-детонационного водометного движителя для скоростных судов, в котором

будут отсутствовать механические движители типа гребного винта, импеллера и др. Такой движитель позволит уйти от проблемы кавитации, разрушающей механические движители при высоких скоростях потока.

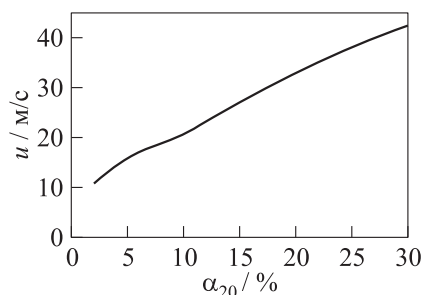


Рис. 7 Расчетные зависимости максимальной скорости движения жидкости за УВ от начального газосодержания на измерительном участке P5–P6

с ростом газосодержания: при $\alpha_{20} = 6\%$ она достигает 16 м/с, а при $\alpha_{20} = 30\%$ — 40 м/с. Следует иметь в виду, что с увеличением газосодержания плотность пузырьковой жидкости снижается. Следовательно, существует оптимальное значение газосодержания, при котором импульс, передаваемый от УВ к пузырьковой среде, достигает максимального значения. В [2–4] эта особенность изучена теоретически и экспериментально для воды с пузырьками воздуха.

Проведенные расчеты позволяют определить скорость жидкости, вовлекаемой в движение волнами пузырьковой детонации при $2\% \leq \alpha_{20} \leq 6\%$ и затухающими УВ при $\alpha_{20} > 6\%$. На рис. 7 приведены результаты расчетов максимальной скорости воды на измерительном участке P5–P6 (см. рис. 2, *a*) в зависимости от начального газосодержания воды. Видно, что скорость жидкости увеличивается

5 Заключение

На основе уравнений двухфазного сжимаемого вязкого реагирующего течения проведено численное исследование проникновения УВ из газа в воду с пузырьками реакционноспособного газа (стехиометрической ацетиленокислородной смеси), равномерно распределенными по объему жидкости. Показано, что в такой пузырьковой жидкости может распространяться стационарный сверхзвуковой самоподдерживающийся фронт реакции с быстрым и полным выгоранием горючего в лидирующей УВ. Такой фронт реакции можно трактовать как детонационно-подобный или как «пузырьковую детонацию» (по терминологии [5]). Проведено сравнение расчетной и измеренной в [7] скорости волны пузырьковой детонации в интервале начальных газосодержаний от 2% до 6%: на границах интервала скорость детонации составила ~ 400 – 500 и 200 – 250 м/с соответственно. Верхний предел пузырьковой детонации по газосодержанию в расчете оказался несколько ниже (5%), чем в эксперименте (6%). В целом, получено удовлетворительное качественное и количественное согласие результатов.

Численно исследованы особенности формирования и структура волн пузырьковой детонации для условий экспериментов, планируемых авторами. Показано, что волна пузырьковой детонации может формироваться после проникновения УВ на небольшую (~ 300 мм) глубину в столб пузырьковой жидкости. В такой волне газосодержание за лидирующим фронтом оказывается приблизительно в 3–4 раза больше, чем в УВ, распространяющихся в воде с пузырьками воздуха при прочих равных начальных условиях.

Расчетные значения скорости жидкости, увлекаемой в движение за УВ, увеличиваются с ростом газосодержания: при $\alpha_{20} = 6\%$ она достигает 16 м/с, а при $\alpha_{20} = 30\%$ — 40 м/с. Предложенная модель может быть использована для поиска условий достижения наибольшей эффективности передачи количества движения от УВ к пузырьковой жидкости в перспективных импульсно-детонационных водометных движителях.

В дальнейшем для уточнения структуры пузырьковой детонации планируется ввести в физико-математическую модель дополнительное уравнение — уравнение Рэлея для пульсаций одиночного пузырька. Предварительные расчеты показывают, что в зависимости от свойств пузырьковой жидкости в ней могут распространяться волновые пакеты разной структуры, включая монотонную, осциллирующую, солитонную или многосолитонную структуры [17].

Литература

1. Фролов С. М., Фролов Ф. С., Аксенов В. С. Авдеев К. А. Водометный импульсный детонационный двигатель (варианты) и способ создания гидрореактивной тяги. Заявка РСТ/RU2013/001148 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 // Горение и взрыв, 2015. Т. 8. № 2. С. 57–67.
3. 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.
4. Авдеев К. А., Аксенов В. С., Борисов А. А., Фролов С. М., Фролов Ф. С., Шамиин И. О. Исследование передачи количества движения от ударной волны к пузырьковой жидкости // Хим. физика, 2015. Т. 34. № 11. С. 27–32.
5. Hasegawa T., Fujiwara T. Detonation oxyhydrogen bubbled liquids // 19th Symposium (International) on Combustion Proceedings. Hafsa, 1982.
6. Сычев А. И. Воспламенение системы жидкость – пузырьки газа ударной волной // Физика горения и взрыва, 1985. Т. 21. № 2. С. 130–134.
7. Сычев А. И. Волна детонации в системе жидкость – пузырьки газа // Физика горения и взрыва, 1985. Т. 21. № 3. С. 103–110.
8. Сычев А. И., Пинаев А. В. Самоподдерживающаяся детонация в жидкостях с пузырьками взрывчатого газа // ПМТФ, 1986. № 1. С. 133–138.
9. 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 // Физика горения и взрыва, 1987. Т. 23. № 6. С. 76–84.
10. Шаганов В. Ш., Вахитова Н. К. Волны в пузырьковой системе при наличии химической реакции в газовой фазе // Физика горения и взрыва, 1989. № 6. С. 14–22.
11. Троцюк А. В., Фомин П. А. Модель пузырьковой детонации // Физика горения и взрыва, 1992. Т. 28. № 4. С. 129–136.
12. Пинаев А. В., Кочетков И. И. Пузырьковая детонация – самоподдерживающаяся уединенная волна с энергосвободением // Физика горения и взрыва, 2007. Т. 43. № 6. С. 104–111.
13. Шаганов В. Ш., Абдрашитов Д. В. Структура волн детонации в пузырьковой жидкости // Физика горения и взрыва, 1992. № 6. С. 89–96.
14. Frolov S. M., Basevich V. Ya., Neuhaus M. G., Tatshl R. A joint velocity-scalar PDF method for modeling premixed and nonpremixed combustion // Advanced computation and analysis of combustion / Eds. G. D. Roy, S. M. Frolov, P. Givi. — Moscow: ENAS Publ., 1997. P. 537–561.
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 Transfer, 1972. Vol. 15. No. 10. P. 1510–1520.
16. Кедринский В. К. Гидродинамика взрыва: модели и эксперимент. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. 435 с.
17. Кутателадзе С. С., Накоряков В. Е. Тепломассообмен и волны в газожидкостных системах. — Новосибирск: Наука, 1984. 302 с.

Поступила в редакцию 18.12.15

SHOCK WAVES IN WATER WITH BUBBLES OF REACTIVE GAS: CALCULATION

K. A. Avdeev^{1,2}, V. S. Aksenov^{1,2,3}, A. A. Borisov^{1,2}, D. G. Sevastopoleva^{1,3},
R. R. Tukhvatullina¹, S. M. Frolov^{1,2,3}, and F. S. Frolov^{1,2}

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

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

³National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute),
31 Kashirskoe Sh., Moscow 115409, Russian Federation

Abstract: Based on the system of equations of two-phase compressible viscous reactive flow, the numerical simulation of penetration of the shock wave in water with reactive gas bubbles (stoichiometric mixture of acetylene and oxygen) has been performed. It has been shown that in such bubbly liquid, a stationary supersonic self-sustained reaction front with fast and complete fuel burning in the leading shock wave may exist. This kind of reaction front can be interpreted as “bubbly detonation.” The calculated and measured velocities of the bubbly detonation waves have been compared for the range of the initial volumetric gas content from 2% to 6%. Satisfactory qualitative and quantitative agreement between the results is obtained. The structure of bubbly detonation wave has been studied numerically. The volumetric gas content behind the leading front of such a wave is shown to be a factor of 3–4 larger than that for the pressure waves propagating in water with air bubbles under the same initial conditions. A bubbly detonation wave can be formed after penetration of a shock wave to a small (~ 300 mm) depth in a column of bubbly liquid. The proposed model can be used for searching the conditions to achieve the most efficient momentum transfer from pressure waves to bubbly liquid in the prospective hydrojet pulsed detonation engines.

Keywords: bubbly liquid; reactive gas; shock wave; hydraulic shock tube; reactive two-phase flow; hydrojet engine

Acknowledgments

The work was supported by the Russian Ministry of Education and Science under the State Contract No. 14.609.21.0001 (Contract ID RFMEFI60914X0001) “Development of technology for the creation of hydrojet thrust for high-speed water vehicles and the creation of stand demonstrator of the hydrojet pulsed detonation engine” under the Federal target program “Research and development on priority directions of scientific-technological complex of Russia for 2014–2020.”

References

1. Frolov, S. M., V. S. Aksenov, F. S. Frolov, and K. A. Avdeev. 2013. Vódometnyy impul'snyy detonatsionnyy dvigatel' (varianty) i sposob sozdaniya gidroreaktivnoy tyagi [Pulse detonation

- engine (variants) and the way to create hydrojet thrust]. PCT/RU2013/001148 dated 23.12.2013. Available at: <http://www.idgcenter.ru/patentPCT-RU2013-001148.htm> (accessed May 20, 2016).
2. Avdeev, K. A., V. S. Aksenov, A. A. Borisov, R. R. Tikhvatullina, S. M. Frolov, and F. S. Frolov. 2015. Chislennoe modelirovanie peredachi impulsa ot udarnoy volny k puzyr'kovoy srede [Numerical simulation of the momentum transfer from the shock waves to the bubbly media]. *Goren. Vzryv (Mosk.) — Combustion and Explosion* 8(2):57–67.
 3. 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.
 4. 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.
 5. Hasegawa, T., and T. Fujiwara. 1982. Detonation oxyhydrogen bubbled liquids. *19th Symposium (International) on Combustion Proceedings*. Hafnia.
 6. Sychev, A. I. 1985. Vosplamneniye sistemy zhidkost' – puzyr'ki gaza udarnoy volnoy [Ignition of the liquid – gas bubbles system by shock wave]. *Fiz. Goreniya Vzryva* 21(2):103–110.
 7. Sychev, A. I. 1985. Volna detonatsii v sisteme zhidkost' – puzyr'ki gaza [Wave of detonation in the liquid – gas bubbles system]. *Fiz. Goreniya Vzryva* 21(3):103–110.
 8. Sychev, A. I., and A. V. Pinaev. 1986. Samopodderzhivayushchayasya detonatsiya v zhidkostyakh s puzyr'kami vzryvchatogo gaza [Self-sustaining detonation in liquid with bubbles of the reactive gas]. *Prikl. Mekh. Tekh. Fiz.* (1):133–138.
 9. Pinaev, A. V., and A. I. Sychev. 1987. Vliyaniye fiziko-khimicheskikh svoystv gaza i zhidkosti na parametry i usloviya sushchestvovaniya volny detonatsii v sistemakh zhidkost' – puzyr'ki gaza [Influence of physicochemical properties of gas and liquid onto parameters and conditions of the detonation wave existence in the liquid – gas bubbles systems]. *Fiz. Goreniya Vzryva* 23(6): 76–84.
 10. Shagapov, V. Sh., and N. K. Vakhitova. 1989. Volny v puzyr'kovoy sisteme pri nalichii khimicheskoy reaktsii v gazovoy faze [Waves in bubbly system at presence of chemical reaction in gas phase]. *Fiz. Goreniya Vzryva* (6):14–22.
 11. Trotsyuk, A. V., and P. A. Fomin. 1992. Model' puzyr'kovoy detonatsii [The bubbly detonation model]. *Fiz. Goreniya Vzryva* 28(4):129–136.
 12. Pinaev, A. V., and I. I. Kochetkov. 2007. Puzyr'kovaya detonatsiya — samopodderzhivayushchayasya uedinennaya volna s energoydeleniem [The bubbly detonation — the self-sustaining solitary wave with energy release]. *Fiz. Goreniya Vzryva* 43(6):104–111.
 13. Shagapov, V. Sh., and D. V. Abdrashitov. 1992. Stuktura voln detonatsii v puzyr'kovoy zhidkosti [Structure of a detonation waves in bubbly liquid]. *Fiz. Goreniya Vzryva* (6):89–96.
 14. Frolov, S. M., V. Ya. Basevich, M. G. Neuhaus, and R. Tatshl. 1997. A joint velocity-scalar PDF method for modeling premixed and nonpremixed combustion. *Advanced computation and analysis of combustion*. Eds. G. D. Roy, S. M. Frolov, and P. Givi. Moscow: ENAS Publ. 537–561.
 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 Transfer* 15(1):1510–1520.
 16. Kedrinskiy, V. K. 2000. *Gidrodinamika vzryva: Modeli i eksperiment* [Hydrodynamics of explosion: Models and experiment]. Novosibirsk: SB RAS Publ. 435 p.

17. Kutateladze, S. S., and V. E. Nakoryakov. 1984. *Teplomassoobmen i volny v gazozhidkostnykh sistemakh* [Heat and mass transfer and waves in gas–liquid systems]. Novosibirsk: Nauka. 302 p.

Received December 18, 2015

Contributors

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

Aksenov Victor S. (b. 1952) — Candidate of Science in physics and mathematics, senior research scientist, N. N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; designer, Noncommercial Partnership Center of Pulse Detonation Combustion, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; associate professor, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), 31 Kashirskoe Sh., Moscow 115409, Russian Federation; v.aksenov@mail.ru

Borisov Anatoliy A. (b. 1932) — Doctor of Science in physics and mathematics, chief research scientist, N. N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; scientific consultant, Noncommercial Partnership Center of Pulse Detonation Combustion, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; borisov@chph.ras.ru

Sevastopoleva Dina G. (b. 1993) — technician, Noncommercial Partnership Center of Pulse Detonation Combustion, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; student, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), 31 Kashirskoe Sh., Moscow 115409, Russian Federation; dinasevastopoleva@icloud.com

Tukhvatullina Ruzana R. (b. 1988) — research engineer, Noncommercial Partnership Center of Pulse Detonation Combustion, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; tukhvatullinarr@gmail.com

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

Frolov Fedor S. (b. 1981) — Candidate of Science in physics and mathematics, senior research scientist, N. N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; senior specialist, Noncommercial Partnership Center of Pulse Detonation Combustion, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; f.frolov@chph.ru