

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ УДАРНОЙ ВОЛНЫ НА ПУЗЫРЬКОВУЮ СРЕДУ*

К. А. Авдеев¹, В. С. Аксенов², А. А. Борисов³, Р. Р. Тухватуллина⁴, С. М. Фролов⁵, Ф. С. Фролов⁶

Аннотация: На основе системы уравнений двухфазного сжимаемого вязкого течения проведено двумерное численное моделирование проникновения ударной волны в воду с пузырьками воздуха и ее последующего распространения в пузырьковой жидкости в условиях, имитирующих условия экспериментов четырех групп авторов. И в расчетах, и в экспериментах объемное газосодержание воды изменялось в пределах от 0,5% до 19% при диаметре воздушных пузырьков 2,0–2,5 мм, а скорость ударной волны в пузырьковой жидкости изменялась в пределах от 40 до 800 м/с. Проведенные расчеты показали, что используемая физико-математическая модель двухфазного течения в целом правильно описывает динамику взаимодействия ударной волны с пузырьковой средой.

Ключевые слова: пузырьковая жидкость; ударная волна; ударная труба; численное моделирование

Введение

В традиционных двигательных системах для водных транспортных средств происходит преобразование химической энергии топлива в механическую энергию различного рода движителей [1]. Для исключения потерь, возникающих вследствие такого рода преобразования энергии, предлагают использовать гидрореактивные

* Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России по государственному контракту № 14.609.21.0001 (идентификатор контракта RFMEFI57914X0038) «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».

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», v.aksenov@mail.ru

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

⁴ Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, tukhvatullinarr@gmail.com

⁵ Центр импульсно-детонационного горения; Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», smfrol@chph.ras.ru

⁶ Центр импульсно-детонационного горения; Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, f.frolov@chph.ru

двигатели (ГРД), в которых реактивная тяга создается путем периодического вытеснения заборной воды или механической смеси воды с пузырьками газа (воздух или отработавшие газы газогенератора) из водовода под действием расширяющихся продуктов горения топлива [1]. Доказано, что из всех известных термодинамических циклов использования химической энергии (горения) топлива термодинамический цикл с детонационным горением (цикл Зельдовича) является наиболее энергоэффективным [2]. Однако о разработке гидрореактивных двигательных систем для водных транспортных средств, использующих данный термодинамический цикл, в открытой литературе никаких сведений нет. По-видимому, этот факт связан с наличием двух важнейших проблем, которые до сих пор не находили практического решения. Первая проблема — реализация рабочего цикла с детонационным горением штатного моторного топлива в воздухе при минимальных массогабаритных параметрах камеры сгорания и минимальных энергозатратах на циклическое инициирование детонации. Вторая проблема — эффективная передача количества движения водной газосодержащей среде от высокоскоростных струй газообразных продуктов детонации топливно-воздушной смеси.

Первая проблема, связанная с очень низкой детонационной способностью штатных моторных топлив, недавно успешно решена. На сегодняшний день в ИХФ РАН создан целый ряд импульсно-детонационных и непрерывно-детонационных энергетических установок, работающих на штатных моторных топливах (бензин, дизельное топливо, керосин, пропан–бутан, природный газ, водород), которые могут быть адаптированы для работы в составе ГРД. Что касается второй проблемы — эффективной передачи количества движения водной газосодержащей среде (пузырьковой жидкости) от высокоскоростных струй газообразных продуктов детонации топливно-воздушной смеси, то эта проблема до сих пор не решена. Последнее отчасти связано с тем, что в теории многофазных течений [3] есть еще ряд нерешенных проблем [4–6]. Во-первых, сами уравнения многофазных течений [3] — предмет продолжающихся исследований и научных дискуссий: во многих публикациях эти уравнения сформулированы некорректно. Во-вторых, численные методы, используемые для решения уравнений многофазных течений, даже корректно сформулированных, не всегда правильны: для решения уравнений часто используются сегрегированные схемы с последовательным решением уравнений гидродинамики, которые сводят корректно поставленную смешанную эволюционно-краевую (ЭК) задачу к некорректному дискретному аналогу.

Цель данной работы — разработка модели волновых процессов в стратифицированных двухфазных системах, содержащих пузырьковую жидкость, а также проверка ее адекватности.

Постановка задачи

Рассмотрим пузырьковую жидкость, которая состоит из двух фаз — дисперсной газовой фазы (индекс 1) с объемной долей α_1 и несущей жидкой фазы (индекс 2) с объемной долей α_2 . Примем следующие упрощающие допущения:

- (1) при ударном сжатии пузырьковой жидкости в бегущей ударной волне газ в жидкости не растворяется, а жидкость внутри пузырьков не испаряется;
- (2) ударная волна имеет относительно низкую интенсивность, так что плотность жидкой фазы зависит только от температуры жидкости T_2 ;
- (3) течение пузырьковой жидкости, вызванное ударной волной, ламинарное;
- (4) влияние силы тяжести, а также подъемной силы и силы трения на ограничивающих поверхностях на относительное движение фаз в пузырьковой жидкости пренебрежимо мало.

Математическая модель взаимодействия ударной волны с пузырьковой жидкостью основана на дифференциальных уравнениях двухфазного течения, выведенных в рамках концепции взаимнопроникающих континуумов [3], — на уравнениях сохранения массы, количества движения и энергии фаз:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \alpha_i \rho_i}{\partial t} + \nabla \cdot \alpha_i \rho_i \mathbf{v}_i &= 0; \\ \frac{\partial \alpha_i \rho_i \mathbf{v}_i}{\partial t} + \nabla \cdot \alpha_i \rho_i \mathbf{v}_i \mathbf{v}_i &= -\alpha_i \nabla p_i + \nabla \cdot \alpha_i \boldsymbol{\tau}_i + \mathbf{M}_{ij}; \\ \frac{\partial \alpha_i \rho_i h_i}{\partial t} + \nabla \cdot \alpha_i \rho_i \mathbf{v}_i h_i &= \nabla \cdot \alpha_i \mathbf{q}_i + \nabla \cdot \alpha_i \boldsymbol{\tau}_i \cdot \mathbf{v}_i + \alpha_i \frac{\partial p_i}{\partial t} + \mathbf{H}_{ij}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где t — время; i и j — индексы фазы; ∇ — дифференциальный оператор по координатам радиус-вектора \mathbf{r} ; ρ — плотность фазы; \mathbf{v} — скорость фазы; p — давление фазы; $\boldsymbol{\tau}$ — тензор вязких касательных напряжений в фазе; \mathbf{q} — тепловой поток в фазе, члены \mathbf{M}_{ij} и \mathbf{H}_{ij} описывают межфазный обмен количеством движения и энергией соответственно; h — энтальпия торможения фаз, определяемая соотношением:

$$h_i = h_{i,0} + \int_{T_{i,0}}^{T_i} c_{p,i} dT + \frac{1}{2} \mathbf{v}_i \mathbf{v}_i, \quad (2)$$

где $c_{p,i}$ — теплоемкость фазы при постоянном давлении; T — температура фазы; дополнительный индекс 0 относится к начальным значениям переменных.

Систему уравнений (1) следует дополнить соотношениями для потоков $\boldsymbol{\tau}_i$, \mathbf{q}_i , \mathbf{M}_{ij} и \mathbf{H}_{ij} :

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\tau}_i &= \mu_i \left[(\nabla \mathbf{v}_i + \nabla \mathbf{v}_i^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \mathbf{v}_i \right]; \\ \mathbf{q}_i &= \frac{\kappa_i}{c_{p,i}} \nabla h_i; \\ \mathbf{M}_{12} &= C_D \frac{A \rho_2 |\mathbf{v}_{12}| \mathbf{v}_{12}}{8}; \quad \mathbf{M}_{21} = -\mathbf{M}_{12}; \\ \mathbf{H}_{12} &= \text{Nu} \frac{\kappa_2 A (T_1 - T_2)}{d_1}; \quad \mathbf{H}_{21} = -\mathbf{H}_{12}, \end{aligned}$$

где μ — коэффициент динамической вязкости фазы; κ — коэффициент теплопроводности фазы; $\mathbf{v}_{12} = \mathbf{v}_1 - \mathbf{v}_2$ — относительная скорость фаз; d_1 — диаметр пузырьков; $A = 6\alpha_1/d_1$ — суммарная площадь межфазной границы в единице объема пузырьковой жидкости; C_D и Nu — коэффициент гидродинамического сопротивления и число Нуссельта, которые в общем случае зависят от числа Рейнольдса относительного движения фаз $Re_{12} = \rho_2 \mathbf{v}_{12} d_1 / \mu_2$ и числа Прандтля жидкости $Pr_2 = c_{p,2} \mu_2 / \kappa_2$ [3]:

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

$$Nu = 1 + 0,6 Re_{12}^{0,5} Pr_2^{0,33}.$$

В системе из восьми уравнений (1) и (2) и в соотношениях для потоков имеется 12 зависимых переменных $\alpha_1, \alpha_2, \rho_1, \rho_2, \mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, p_1, p_2, h_1, h_2, T_1$ и T_2 . Для замыкания задачи используем четыре дополнительных соотношения:

$$\rho_2 = \rho_2(T_2); \quad \alpha_2 = 1 - \alpha_1; \quad p_1 = \rho_1 R T_1; \quad p_2 = p_1. \quad (3)$$

Система уравнений (1)–(3) дополняется начальными и граничными условиями для перечисленных выше переменных и их производных.

К последнему соотношению в (3), которое приравнивает давления фаз, следует относиться с известной долей осторожности. Дело в том, что при одинаковом давлении фаз рассматриваемая система уравнений может терять свойство гиперболичности, что приводит к потере устойчивости решения [4, 5]. Авторами проведен априорный анализ устойчивости системы (1) с ненулевыми потоками, который показал, что учет, например, потоков импульса (τ_1, τ_2) внутри фаз делает эволюционную задачу корректной [6, 7].

Для численного решения системы (1) использовали метод, основанный на конечно-объемной дискретизации дифференциальных уравнений с первым порядком аппроксимации по пространству и по времени [8]. Чтобы избежать чрезмерного сгущения сетки к твердым поверхностям с прилипанием потока, использовали стандартный метод пристеночных функций.

Результаты расчетов

Для проверки предсказательной способности физико-математической модели (1)–(3) использованы результаты экспериментов [9–12], а также недавние собственные эксперименты авторов, в которых на вертикальных ударных трубах изучались характеристики ударных волн, перепускаемых из газа в воду с пузырьками воздуха (см. таблицу). Ударные трубы с характерным поперечным размером h содержали камеру высокого давления (КВД) длиной $L_{КВД}$ и камеру низкого давления (КНД) длиной $L_{КНД} + L$, разделенные диафрагмой (разрывной мембраной).

Геометрические размеры ударных труб в [9–12] и в работе авторов

Эксперимент	h , мм	$L_{\text{КВД}}$, мм	$L_{\text{КНД}}$, мм	L , мм
[9]	20	1400	160	1850
[10]	40	1150	290	3550
[11]	60	800	200	2000
[12]	30	1500	200	1200
Авторов	100	495	1485	438

В нижней части КНД размещался столб воды высотой L с пузырьками воздуха. После разрыва мембраны в верхней части КНД, заполненной воздухом, формировалась ударная волна с известными характеристиками, которая затем проникала в пузырьковую жидкость. Скорость распространения ударной волны в пузырьковой жидкости измерялась с помощью датчиков давления (ДД), установленных в измерительной секции (ИС).

Расчеты, представленные ниже, проводились на разных расчетных сетках до получения результатов, не зависящих от расчетной сетки. Дальнейшее измельчение расчетной сетки и уменьшение шага интегрирования по времени никак не влияло на расчетную скорость распространения ударной волны в пузырьковой жидкости.

В экспериментах [9] КВД и КНД заполнялись воздухом при нормальной температуре и под давлением 4 и 1 атм соответственно. Столб воды высотой 1850 мм насыщался пузырьками воздуха со средним начальным диаметром $d_{10} = 2$ мм и начальной объемной долей газовой фазы α_{10} от 0,01 до 0,2. Скорость ударной волны D

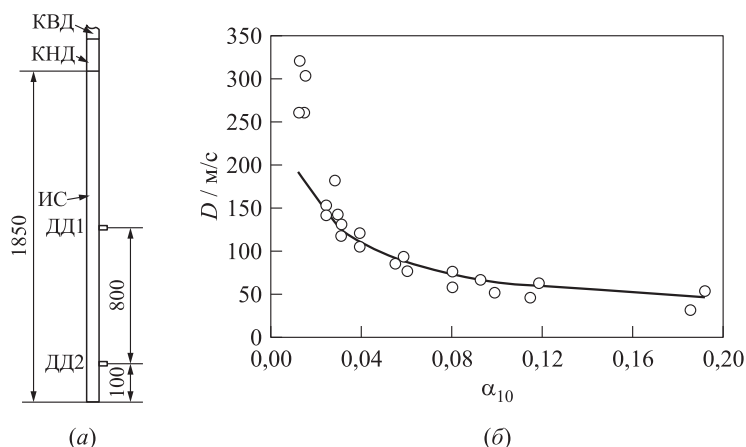


Рис. 1 Схема экспериментальной установки [9] (размеры указаны в миллиметрах) (а) и результаты сравнения расчетных (кривая) и измеренных (значки) скоростей ударной волны на измерительной базе ДД1–ДД2 от объемной доли воздушных пузырьков в воде (б)

в пузырьковой жидкости определяли по записям датчиков ДД1 и ДД2 (рис. 1, а) как частное от деления расстояния между датчиками на интервал времени между приходом волны на датчики ДД1 и ДД2.

На рис. 1, б приведено сравнение расчетов с экспериментальными данными [9] в виде зависимости скорости ударной волны на измерительной базе ДД1–ДД2 от α_{10} . Расчеты проводились в двумерном приближении с сохранением основных геометрических размеров ударной трубы [9]. Среднюю расчетную скорость ударной волны определяли так же, как и в эксперименте — по расстоянию между контрольными сечениями ДД1–ДД2 и по времени прохождения фронта волны через эти сечения. Из рис. 1, б видно, что расчеты хорошо согласуются с экспериментами при $\alpha_{10} > 2\%–3\%$, тогда как при меньших значениях α_{10} наблюдается большое расхождение результатов. Последнее, по-видимому, связано с нарушением допущения о «сплошности» дисперсного компонента пузырьковой среды при малых α_{10} : в таких условиях количество пузырьков в воде относительно мало и они удалены друг от друга на относительно большие расстояния, так что ударная волна фактически взаимодействует с одиночными пузырьками. Из рис. 1, б также видно, что скорость ударной волны в воде с пузырьками воздуха составляет 50–150 м/с, что существенно меньше, чем значения скоростей звука в воде (~ 1500 м/с) и в воздухе (340 м/с).

В экспериментах [10] высокое давление в КВД (24 и 36 атм) получали за счет сжигания ацетиленокислородной смеси, КНД заполняли воздухом при атмосферном давлении, а в измерительной секции размещали столб воды высотой 3550 мм с пузырьками воздуха со средним диаметром $d_{10} = 2,5$ мм и начальной объемной долей газовой фазы α_{10} от 0,005 до 0,06. Температура воздуха и воды комнатная. Скорость ударной волны в пузырьковой жидкости определяли по записям датчиков ДД1, ДД2 и ДД3 (рис. 2, а) как частное от деления расстояния между датчиками на интервал времени между приходом волны на датчики ДД1, ДД2 и ДД3.

На рис. 2, б приведено сравнение расчетов с экспериментальными данными [10] в виде зависимости скорости ударной волны на измерительных базах ДД1–ДД2 и ДД2–ДД3 от α_{10} при двух давлениях газа в КВД (24 и 36 атм). Расчеты проводились в двумерном приближении с сохранением основных геометрических размеров ударной трубы [10]. Среднюю расчетную скорость ударной волны определяли так же, как и в эксперименте — по расстоянию между контрольными сечениями ДД1–ДД2 и ДД2–ДД3 и по времени прохождения фронта волны через эти сечения. Отметим, что при заданных значениях α_{10} и давлениях в КВД расчетные значения скорости ударной волны на измерительных базах ДД1–ДД2 и ДД2–ДД3 практически не отличались друг от друга. Из рис. 2, б видно, что результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментами даже при $\alpha_{10} = 0,005$.

В экспериментах [11] давление воздуха в КВД изменяли от 1,2 до 4 атм, КНД заполняли воздухом при атмосферном давлении, а в измерительной секции размещали столб водно-глицеринового раствора (коэффициент кинематической вязкости — $2 \cdot 10^{-6}$ м²/с) высотой 2000 мм с пузырьками воздуха со средним диаметром

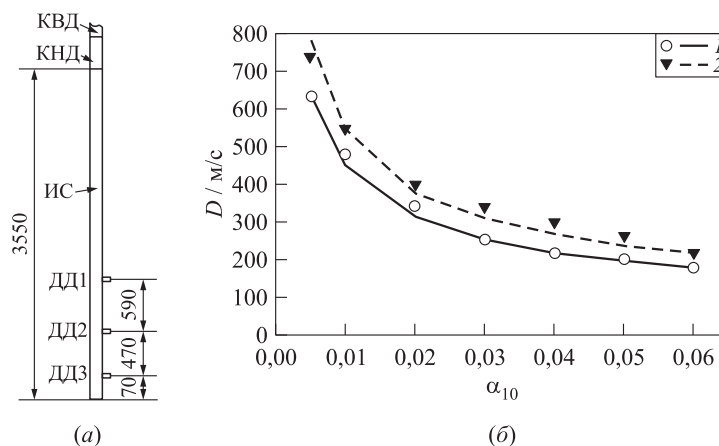


Рис. 2 Схема экспериментальной установки [10] (а) (размеры указаны в миллиметрах) и результаты сравнения расчетных (кривые) и измеренных (значки) скоростей ударной волны на измерительных базах ДД1–ДД2 и ДД2–ДД3 от объемной доли воздушных пузырьков ($d_{10} = 2,5$ мм) в воде (б) при разных давлениях в КВД: 1 – 24 атм; 2 – 36 атм

$d_{10} = 2$ мм и начальной объемной долей газовой фазы $\alpha_{10} = 0,01, 0,02$ и $0,05$. Температура воздуха и раствора комнатная. Скорость ударной волны в пузырьковой жидкости определяли по записям датчиков ДД1 и ДД2 (рис. 3, а).

На рис. 3, б показано сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными в виде зависимостей скорости ударной волны на измерительной базе ДД1–ДД2 от давления в КВД $p_{\text{КВД}}$. Из рис. 3, б видно, что результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментами как при $\alpha_{10} = 0,01$, так и при $\alpha_{10} = 0,02$ и $0,05$.

В экспериментах авторов давление в КВД ($\approx 0,5$ МПа в момент разрыва мембраны) получали за счет сжигания пропановоздушной смеси, КНД заполняли воздухом при атмосферном давлении, а в измерительной секции размещали столб воды высотой 438 мм с пузырьками воздуха со средним диаметром $d_{10} = 2,5$ мм и начальной объемной долей газовой фазы α_{10} от 0,009 до 0,1. Температура воздуха и воды комнатная. Скорость ударной волны в воздухе, определенная по записям датчиков ДД2 и ДД3, во всех опытах составляла 460 ± 20 м/с, скорость ударной волны в пузырьковой жидкости определяли по записям датчиков ДД6 и ДД8 (рис. 4, а).

На рис. 4, б приведено сравнение расчетов с экспериментальными данными в виде зависимости скорости ударной волны в пузырьковой жидкости на измерительной базе ДД6–ДД8 от α_{10} . Расчеты проводились в двумерном приближении с сохранением основных геометрических размеров ударной трубы (см. таблицу). Среднюю расчетную скорость падающей ударной волны в воздухе и в пузырько-

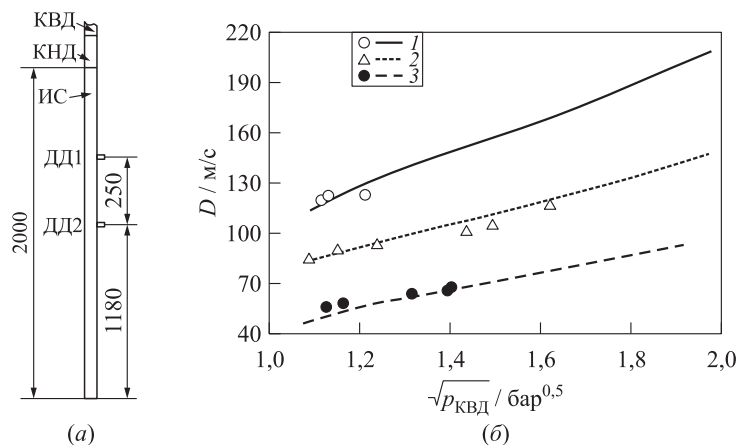


Рис. 3 Схема экспериментальной установки [11] (а) (размеры указаны в миллиметрах) и результаты сравнения расчетных (кривые) и измеренных (значки) скоростей ударной волны на измерительной базе ДД1–ДД2 от давления в КВД $p_{\text{КВД}}$ (б) при разной начальной объемной доле воздуха α_{10} в водно-глицериновом растворе: 1 – $\alpha_{10} = 0,01$; 2 – 0,02; 3 – $\alpha = 0,05$

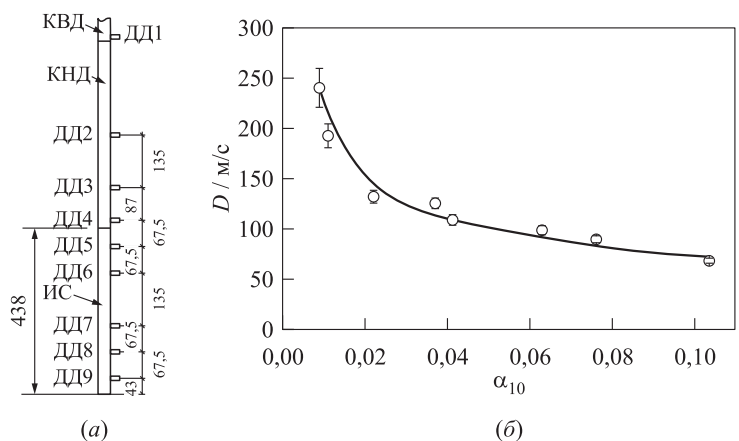


Рис. 4 Схема экспериментальной установки (а) (размеры указаны в миллиметрах) и результаты сравнения расчетных (кривая) и измеренных (значки) скоростей ударной волны в пузырьковой жидкости на измерительной базе ДД6–ДД8 от объемной доли воздушных пузырьков в воде (б). Скорость воздушной ударной волны 460 ± 20 мс

вой жидкости определяли так же, как и в эксперименте — по расстоянию между контрольными сечениями ДД2–ДД3, ДД6–ДД8 и по времени прохождения фронта волны через эти сечения. Давление в КВД подбирали таким образом, чтобы скорость ударной волны в воздухе соответствовала экспериментальным значениям (460 ± 20 м/с). Из рис. 4, б видно, что результаты расчета удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными.

Заключение

Таким образом, на основе системы уравнений двухфазного сжимаемого вязкого течения проведено двумерное численное исследование проникновения ударной волны в пузырьковую жидкость и ее последующего в ней распространения. Полученные результаты дают основание считать, что используемая физико-математическая модель двухфазного течения в целом правильно описывает динамику взаимодействия ударной волны с пузырьковой средой.

Эксперименты авторов выполнены с участием В. А. Сметанюка и И. О. Шамшина. Фамилии в списке авторов статьи перечислены в алфавитном порядке.

Литература

1. Куликов С. В., Храмкин М. Ф. Водометные движители (теория и расчет). — Л.: Судостроение, 1980. 312 с.
2. Зельдович Я. Б. К теории распространения детонации в газообразных системах // ЖЭТФ, 1940. Т. 10. № 5. С. 542–568.
3. Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. Ч. I. 467 с.
4. Radvugin Yu. B., Posvyanskii V. S., Frolov S. M. Stability of 2D two-phase reactive flows // J. Phys. IV France, 2002. No. 12. P. 437–444.
5. Лидский Б. В., Посвянский В. С., Семенов И. В., Тухватулина Р. Р., Фролов С. М. Корректность смешанной эволюционно-краевой задачи и ее дискретного аналога для многофазных течений // Горение и взрыв, 2013. Вып. 6. С. 137–144.
6. Авдеев К. А., Аксенов В. С., Борисов А. А., Тухватулина Р. Р., Фролов С. М., Фролов Ф. С. Численное моделирование передачи импульса от ударной волны к пузырьковой среде // Хим. физика, 2015 (в печати). Т. 34. № 5.
7. Тухватулина Р. Р. Исследование корректности задачи Коши для двухскоростного вязкого двухфазного течения (жидкость–газ) // Горение и взрыв, 2015. Т. 8. № 2. С. 38–44.
8. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. — М.: Энергоатомиздат, 1984. 152 с.
9. Mori Y., Hijikata K., Komine A. Propagation of pressure waves in two-phase flow // Int. J. Multiphase Flow, 1975. Vol. 2. P. 139–152.
10. Сычев А. И. Сильные ударные волны в пузырьковых средах // ЖТФ, 2010. Т. 80. Вып. 6. С. 31–35.

11. 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 / Под. ред. С. С. Кутателадзе. — Новосибирск: Институт теплофизики СО АН СССР, 1975. С. 54–97.
12. Kalra S. P., Zvirin Y. Shock wave-induced bubble motion // Int. J. Multiphase Flow, 1981. Vol. 7. P. 115–127.

Поступила в редакцию 01.11.14

NUMERICAL MODELING OF THE IMPACT OF SHOCK WAVE ON BUBBLY ENVIRONMENT

K. A. Avdeev^{1,2}, V. S. Aksenov^{1,2,3}, A. A. Borisov^{1,2}, R. R. Tukhvatullina⁴,
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 MPhI, 31 Kashirskoe Sh., Moscow 115409, Russian Federation

⁴M. V. Lomonosov Moscow State University, 1-52 Leninskiye Gory, GSP-1, Moscow 119991, Russian Federation

Abstract: Based on the system of equations of two-phase compressible viscous flow the two-dimensional numerical simulation of penetration of the shock wave in water with air bubbles and its subsequent propagation in bubbly liquid under conditions simulating the experimental conditions of four different groups of authors has been performed. In calculations and experiments, the volumetric gas content of water varied from 0.5% to 19% with the air bubbles diameter of 2.0–2.5 mm and the shock wave velocity in the bubbly liquid varied in the range of 40–800 m/s. The results of calculations indicate that the mathematical model of two-phase flow describes properly the dynamics of the interaction of a shock wave with the bubbly liquid.

Keywords: bubbly liquid; shock wave; shock tube; numerical modeling

Acknowledgments

The work was supported by the Russian Ministry of Education and Science under the State Contract No. 14.609.21.0001 (Contract ID RFMEFI57914X0038) “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. Kulikov, S. V., and M. F. Khramkin. 1980. *Vodometnye dvizhiteli (teoriya i raschet)* [Hydrojet engines (theory and calculation)]. — Leningrad: Sudostroenie. 312 p.
2. Zel'dovich, Ya. B. 1940. K teorii rasprostraneniya detonatsii v gazoobraznykh sistemakh [To the theory of propagation of detonation in gaseous systems]. *ZhETF* 10(5):542–568.
3. Nigmatulin, R. I. 1987. *Dinamika mnogofaznykh sred* [Dynamics of multiphase media]. Moscow: Nauka, Fizmatlit. Part 1. 464 p.
4. Lidskii, B. V., V. S. Posvyanskii, I. V. Semenov, R. R. Tukhvatullina, and S. M. Frolov. 2013. Korrektnost' smeshannoy evolyutsionno-kraevoy zadachi i ee diskretnogo analoga dlya mnogofaznykh techeniy [Correctness of mixed evolutionary-boundary problem and its discrete analogue for multiphase flow]. *Goren. Vzryv (Mosk.) — Combustion and Explosion* 6:137–144.
5. Radvogin, Yu. B., V. S. Posvyanskii, and S. M. Frolov. 2002. Stability of 2D two-phase reactive flows. *J. Phys. IV France* 12:437–444.
6. Avdeev, K. A., V. S. Aksenov, A. A. Borisov, R. R. Tuhvatullina, S. M. Frolov, and F. S. Frolov. 2015 (in press). Chislennoe modelirovanie peredachi impul'sa ot udarnoy volny k puzyr'kovoy srede [Numerical simulation of momentum transfer from the shock wave to the bubbly environment]. *Khim. Fiz.* 34(5).
7. Tukhvatullina, R. R. 2015. Issledovanie korrektnosti zadachi Koshi dlya dvukhskorostnogo vyzkogo dvukhfaznogo techeniya (zhidkost'–gaz) [On correctness of the Cauchy problem for two-velocity two-phase viscous flow]. *Goren. Vzryv (Mosk.) — Combustion and Explosion* 8(2):38–44.
8. Patankar, S. 1984. *Chislennyye metody resheniya zadach teploobmena i dinamiki zhidkosti* [Numerical methods for solving problems of heat transfer and fluid dynamics]. Moscow: Energoatomizdat. 152 p.
9. Mori, Y., K. Hijikata, and A. Komine. 1975. Propagation of pressure waves in two-phase flow. *Int. J. Multiphase Flow* 2(2):139–152.
10. Sychev, A. I. 2010. Sil'nye udarnye volny v puzyr'kovykh sredakh [Strong shock waves in bubbly environment]. *Zh. Tekhn. Fiz.* 80(6):31–35.
11. Nakoryakov, V. E., B. G. Pokusaev, I. R. Shreyber, 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 the liquid with gas bubbles]. *Volnovye processy v dvukhfaznykh sistemakh*. Novosibirsk: Institute of Thermal Physics SB AS USSR. 54–97.
12. Kalra, S. P., and Y. Zvirin. 1981. Shock wave-induced bubble motion. *Int. J. Multiphase Flow* 7:115–127.

Received November 1, 2014

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, 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; professor, National Research Nuclear University MEPhI, 31 Kashirskoe Sh., Moscow 115409, Russian Federation; borisov@chph.ras.ru

Tukhvatullina Ruzana R. (b. 1988) — postgraduate student, M.V. Lomonosov Moscow State University, 1-52 Leninskiye Gory, GSP-1, 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, 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