

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕДАЧИ ИМПУЛЬСА ОТ УДАРНОЙ ВОЛНЫ К ПУЗЫРЬКОВОЙ СРЕДЕ\*

К. А. Авдеев<sup>1</sup>, В. С. Аксенов<sup>2</sup>, А. А. Борисов<sup>3</sup>, Р. Р. Тухватуллина<sup>4</sup>, С. М. Фролов<sup>5</sup>,  
Ф. С. Фролов<sup>6</sup>

**Аннотация:** На основе системы уравнений двухфазного сжимаемого вязкого течения проведено двумерное численное моделирование передачи импульса от ударной волны, распространяющейся в газе, к сплошной воде и к воде с пузырьками воздуха. При воздействии ударной волны на сплошную воду несжимаемая жидкость вовлекается в движение после отражения ударной волны от поверхности раздела «газ–жидкость» под действием избыточного давления газа, а при воздействии ударной волны на воду с пузырьками воздуха жидкость вовлекается в движение за счет проникновения ударной волны в сжимаемую пузырьковую среду. Параметрические расчеты показали, что при передаче импульса от ударной волны к пузырьковой жидкости возможны динамические эффекты, при которых импульс, переданный пузырьковой жидкости, в течение некоторого времени значительно превышает импульс, переданный сплошной жидкости, при прочих равных условиях. Указанные динамические эффекты можно использовать для создания энергоэффективных импульсных гидрореактивных движителей.

**Ключевые слова:** пузырьковая жидкость; ударная волна; передача импульса; численное моделирование

---

\* 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».

<sup>1</sup> Центр импульсно-детонационного горения; Институт химической физики им. Н. Н. Семенова Российской академии наук, kaavdeev@mail.ru

<sup>2</sup> Центр импульсно-детонационного горения; Институт химической физики им. Н. Н. Семенова Российской академии наук; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», v.aksenov@mail.ru

<sup>3</sup> Центр импульсно-детонационного горения; Институт химической физики им. Н. Н. Семенова Российской академии наук, borisov@chph.ras.ru

<sup>4</sup> Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, tukhvatullinarr@gmail.com

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

<sup>6</sup> Центр импульсно-детонационного горения; Институт химической физики им. Н. Н. Семенова Российской академии наук, f.frolov@chph.ru

## Введение

В современных силовых установках водного транспорта наиболее распространены лопастные движители с гребным винтом, которые обладают высоким коэффициентом полезного действия (КПД), достигающим 70% [1]. Однако с увеличением скорости движения судна тяговые характеристики таких движителей и их КПД уменьшаются, а при скорости выше  $\sim 50$ – $60$  узлов проявляется кавитация, которая ограничивает предельное значение силы, действующей на забортную воду со стороны гребного винта.

Для высокоскоростных приложений в качестве альтернативы гребным винтам рассматривают пульсирующие гидрореактивные водометные движители (ГРД) [2], в которых тяга создается в результате передачи энергии от теплоносителя к рабочему телу — воде — в специальном проточном канале (водоводе), а теплоносителем могут служить расширяющиеся продукты сгорания топливно-воздушной смеси (ТВС), водяной пар высокого давления или продукты горения топлива, реагирующего с водой. Основное преимущество ГРД — прямое преобразование химической энергии топлива в кинетическую энергию реактивной струи, вытесняемой из водовода.

В пульсирующих ГРД, оборудованных клапанами, подготовка воды может происходить в условиях постоянного объема  $V = const$  (термодинамический цикл Хампри), когда давление воды в водоводе повышается, например благодаря сжиганию ТВС в присоединенной камере сгорания.

Известно, что термодинамический цикл с детонационным горением (цикл Зельдовича) обеспечивает более высокий термодинамический КПД преобразования химической энергии топлива в механическую работу по сравнению с дефлаграционным горением при постоянном объеме [3, 4]. Следовательно, пульсирующие ГРД с детонационным горением химического топлива могут быть весьма перспективны для водного транспорта.

Чтобы в полной мере использовать термодинамические преимущества цикла Зельдовича в пульсирующем ГРД, необходимо учесть следующие обстоятельства. Ввиду большой инерции водяного заряда в водоводе детонационная волна, выходящая из присоединенной камеры сгорания на поверхность раздела «газ–вода», претерпит множество отражений, прежде чем вода начнет ускоренно вытесняться из водовода, т. е. вся кинетическая энергия продуктов детонации превратится в их тепловую энергию. Последнее приведет к тому, что в присоединенной камере сгорания топливо фактически сгорит при постоянном объеме. Кроме того, при отражении детонационной волны от поверхности воды в жидкость проникает лишь слабая акустическая волна, практически не вовлекающая воду в движение, что связано с очень низкой сжимаемостью воды. В этом случае ускорение воды в водоводе начинается лишь после многократных отражений детонационной волны от поверхности раздела «газ–вода» под действием избыточного давления продуктов горения. Вместе с тем из литературы известно, что сжимаемость жидкости сильно зависит от ее газосодержания [5]. Следовательно, замена воды на пузырьковую жидкость

позволила бы использовать преимущество детонационного горения, отмеченное выше, т. е. проникновение волны давления конечной амплитуды (ударной волны) в пузырьковую среду привело бы к одновременному вовлечению (без многократных отражений) пузырьковой среды в движение и обеспечило бы водометному двигателю повышенный импульс гидрореактивной тяги в течение некоторого интервала времени [6]. Кроме того, даже при взаимодействии газовой детонационной волны со сплошной жидкостью в последней неизбежно должны появиться пузырьки газа. Поэтому в пульсирующем ГРД пузырьковая жидкость будет присутствовать так или иначе.

Цель данной работы — численное моделирование передачи импульса от ударной волны, распространяющейся в газе, к сплошной воде и к воде с пузырьками воздуха.

### Постановка задачи

Для численного моделирования взаимодействия ударной волны с пузырьковой жидкостью использовали физико-математическую модель [7], основанную на дифференциальных уравнениях двухфазного течения, выведенных в рамках концепции взаимнопроникающих континуумов [8] — на уравнениях сохранения массы, количества движения и энергии фаз:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \alpha_i \rho_i}{\partial t} + \nabla \cdot \alpha_i \rho_i \mathbf{v}_i &= 0; \\ \frac{\partial \alpha_i \rho_i \mathbf{v}_i}{\partial t} + \nabla \cdot \alpha_i \rho_i \mathbf{v}_i \mathbf{v}_i &= -\alpha_i \nabla p_i + \nabla \cdot \alpha_i \boldsymbol{\tau}_i + \mathbf{M}_{ij}; \\ \frac{\partial \alpha_i \rho_i h_i}{\partial t} + \nabla \cdot \alpha_i \rho_i \mathbf{v}_i h_i &= \nabla \cdot \alpha_i \mathbf{q}_i + \nabla \cdot \alpha_i \boldsymbol{\tau}_i \cdot \mathbf{v}_i + \alpha_i \frac{\partial p_i}{\partial t} + \mathbf{H}_{ij}; \\ h_i &= h_{i,0} + \int_{T_{i0}}^{T_i} c_{p,i} dT + \frac{1}{2} \mathbf{v}_i \mathbf{v}_i, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $i, j$  — индекс фазы;  $t$  — время;  $\nabla$  — дифференциальный оператор по координатам радиус-вектора  $\mathbf{r}$ ;  $\rho$  — плотность;  $\mathbf{v}$  — скорость;  $p$  — давление;  $\boldsymbol{\tau}$  — тензор вязких касательных напряжений;  $\mathbf{q}$  — тепловой поток; члены  $\mathbf{M}_{ij}$  и  $\mathbf{H}_{ij}$  описывают межфазный обмен количеством движения и энергией соответственно;  $h$  — энтальпия торможения;  $c_p$  — теплоемкость фазы при постоянном давлении;  $T$  — температура; индекс 0 относится к начальным значениям переменных.

Систему уравнений (1) следует дополнить соотношениями для потоков [8], начальными и граничными условиями, а также четырьмя дополнительными соотношениями:

$$\rho_2 = \rho_2(T_2); \quad \alpha_2 = 1 - \alpha_1; \quad p_1 = \rho_1 R T_1; \quad p_2 = p_1, \quad (2)$$

так как в системе из восьми уравнений (1) 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  $T_2$ .



**Рис. 1** Схема устройства для расчета передачи импульса от ударной волны к пузырьковой среде. Размеры указаны в миллиметрах

Проверочные расчеты, выполненные в [7], дают основание считать, что физико-математическая модель двухфазного течения, основанная на системе (1)–(2), в целом правильно описывает динамику взаимодействия ударной волны с пузырьковой средой. Это позволяет поставить и решить важную задачу о передаче импульса от ударной волны к пузырьковой среде.

Рассмотрим схему модельного устройства на рис. 1. Устройство состоит из водовода (широкого прямого канала постоянного сечения длиной  $L_B = 850$  мм и шириной 100 мм с двумя открытыми концами) и из вложенного в водовод генератора ударной волны (газового канала шириной 50 мм с камерой высокого давления (КВД) и камерой низкого давления (КНД), разделенными диафрагмой), причем один конец канала открыт и сообщается с водоводом.

Предположим, что все устройство погружено в сплошную неподвижную воду, КВД заполнена продуктами горения при высоких значениях давления и температуры газов, КНД заполнена воздухом при нормальных условиях, а примыкающие

Параметры задачи о передаче импульса от ударной волны к пузырьковой жидкости

Параметр	Значение
$L_{\text{КНД}}$ , мм	250
$L_{\text{КВД}}$ , мм	250
$L_B$ , мм	850
Давление в КВД, атм	15,5
Температура в КВД, К	3957
Давление воздуха в КНД, атм	1
Температура воздуха в КНД, К	293,15
Температура воды, К	293,15
Объемная доля газа в водяном заряде $\alpha_{10}$	0; 0,03; 0,06; 0,1; 0,2

к ней части водовода (области I, II и III на рис. 1) могут быть заполнены водой с пузырьками воздуха. Отличием гидростатического давления в разных точках расчетной области пренебрегаем. На рис. 1 показаны размеры модельного устройства, а в таблице — параметры задачи, использованные в расчетах. Для сокращения вычислительных затрат задачу о передаче импульса от ударной волны к пузырьковой жидкости решали для половины водовода, так что расчетная область была снизу ограничена плоскостью симметрии, как показано на рис. 1. Три другие границы расчетной области (левая, правая и верхняя) были удалены от водовода на достаточно большое расстояние, чтобы они не оказывали влияние на течение в водоводе и в его ближайшей окрестности.

## Результаты расчетов

Проведены две серии расчетов. В первой серии пузырьки воздуха вводились только в область I водовода, примыкающей к выходному сечению генератора ударной волны. Начальную объемную долю воды в этой области принимали равной  $\alpha_{20} = 1, 0,97, 0,94, 0,90$  и  $0,80$ . Во второй серии расчетов пузырьки воздуха вводились либо в область I водовода, либо в области I и II, либо в области I, II и III, а начальная объемная доля воды в пузырьковом заряде была одинаковой и равной  $\alpha_{20} = 0,90$ . Во всех расчетах в начальный момент времени все среды (газ в КВД, газ в КНД, вода в водоводе и за его пределами, а также пузырьковая жидкость в водоводе) находились в состоянии покоя. Движение начиналось после мгновенного открытия диафрагмы, разделяющей КВД и КНД: в КНД формировалась воздушная ударная волна, которая по истечении короткого времени сначала проникала в пузырьковую жидкость, а затем выходила в сплошную воду в водоводе и за его пределами, претерпевая отражения и дифракцию.

Расчеты позволяли определить мгновенную силу, действующую на устройство, используя формулу:

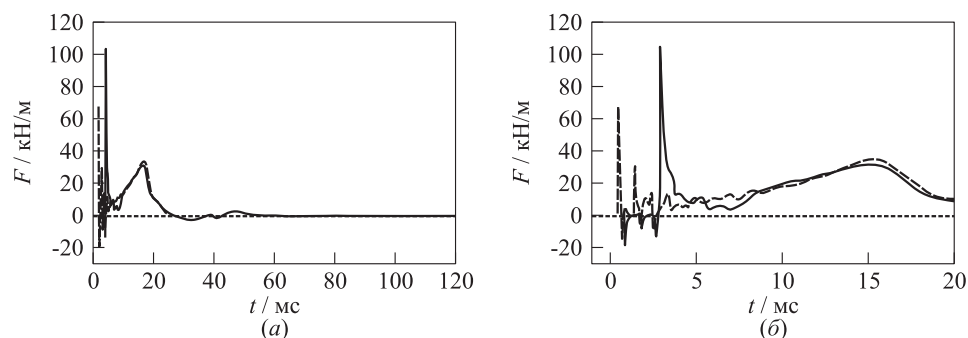
$$F(t) = I_{\text{in}}(t) - I_{\text{out}}(t).$$

Здесь

$$I_{\text{in}}(t) = \int_0^h [p_{\text{in}}(t, y) + \rho_{\text{in}}(t, y)u_{\text{in}}^2(t, y)] dy;$$

$$I_{\text{out}}(t) = \int_0^h [p_{\text{out}}(t, y) + \rho_{\text{out}}(t, y)u_{\text{out}}^2(t, y)] dy,$$

где  $y$  — поперечная координата (см. рис. 1), а индексы in и out соответствуют левому и правому сечениям водовода полушириной  $h = 50$  мм. Сила  $F$  считается положительной, если она направлена справа налево на рис. 1.



**Рис. 2** Расчетные зависимости мгновенной силы, действующей на устройство, от времени при передаче импульса от ударной волны к пузырьковому водяному заряду с  $\alpha_{20} = 0,9$  (сплошная кривая) и к сплошному водяному заряду с  $\alpha_{20} = 1$  (штриховая кривая): (а) продолжительность течения 120 мс; (б) фрагмент продолжительностью 20 мс

На рис. 2 приведены результаты расчетов мгновенной силы  $F$  для двух случаев (сплошная вода и пузырьковая жидкость с газосодержанием  $\alpha_{20} = 0,9$ ) в виде зависимостей от времени на протяжении всего расчета (рис. 2, а) и на протяжении 20 мс (фрагмент на рис. 2, б). В обоих случаях весь процесс передачи импульса от ударной волны к жидкости (и сплошной, и пузырьковой) можно разделить на четыре стадии:

**на первой стадии** доминирующую роль играет волновое воздействие ударной волны на жидкость в водоводе;

**на второй стадии** волновое воздействие сменяется поршневым действием газов высокого давления на жидкость в водоводе;

**на третьей стадии** поршневое воздействие уменьшается вследствие выхода газового пузыря через правый конец водовода;

**на четвертой стадии** давления жидкости и газа в водоводе выравниваются, и процесс передачи импульса завершается.

Из рис. 2 видно, что на первой стадии процесса наблюдаются кратковременные пики положительной и отрицательной мгновенной силы, вызванные отражениями ударной волны и волны разрежения, возникающей в газовом канале, а также в стратифицированной среде и в полуграниченном объеме, причем для пузырькового заряда наибольший пик положительной мгновенной силы наблюдается в момент времени  $\sim 3$  мс, а для сплошного водяного заряда — в момент времени  $\sim 0,5$  мс, т. е. в моменты выхода волны давления через правый конец водовода с выталкиванием порции вещества через него. Далее, на второй стадии, до момента времени 15–16 мс в обоих случаях идет медленное нарастание мгновенной силы, вызванное прогрессирующим ускорением вещества расширяющимся газовым пузырем из генератора

ударной волны. Последующее уменьшение силы  $F$  (третья стадия) связано со снижением давления газов в водоводе вследствие выхода газового пузыря через правый конец водовода, а также вследствие выталкивания жидкости через левый конец водовода. В целом из рис. 2 видно, что в обоих случаях мгновенная сила  $F$ , действующая на устройство, почти всегда положительна в течение 50–60 мс после открытия диафрагмы, а в дальнейшем спадает до нуля (четвертая стадия). Интегралы под кривыми на рис. 2, а, определяющие работу расширяющихся газов, оказались практически одинаковыми с точностью до 2%–3%.

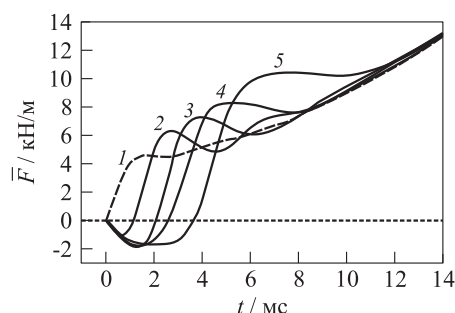
Вид кривых на начальных стадиях процесса (см. рис. 2, б) показывает, что при использовании в водоводе пузырькового водяного заряда можно получить большее значение максимальной мгновенной силы, чем при использовании сплошного водяного заряда. В первом случае пиковое значение мгновенной силы, действующей на устройство, достигает 100 кН/м, тогда как во втором случае пиковое значение мгновенной силы не превышает 70 кН/м. Кроме того, в первом случае больше и продолжительность пика:  $\sim 1$  мс вместо  $\sim 0,2$  мс.

Более детально этот эффект отражен на рис. 3, на котором показаны зависимости средней силы  $\bar{F}(t)$ , действующей на устройство, от времени для пяти значений  $\alpha_{20} = 1, 0,97, 0,94, 0,9$  и  $0,8$  (первая серия расчетов). Средняя сила определена по формуле:

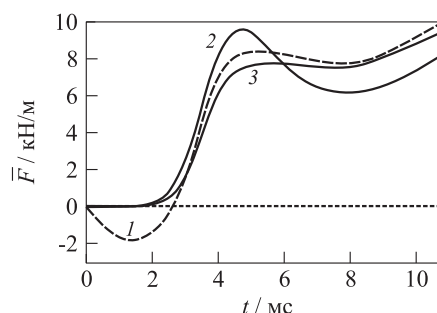
$$\bar{F}(t) = \frac{1}{t} \int_0^t F(t) dt.$$

Из рис. 3 видно, что увеличение начальной объемной доли газа в пузырьковом заряде, с одной стороны, приводит к увеличению пикового значения положительной средней силы  $\bar{F}(t)$  по отношению к ее пиковому значению в сплошном водяном заряде (штриховая кривая), а с другой стороны — к увеличению продолжительности пикового значения отрицательной средней силы  $\bar{F}(t)$  в начале процесса, причем на кривой  $\bar{F}(t)$  для сплошного водяного заряда участок с отрицательной средней силой вообще отсутствует. По истечении времени 12–14 мс средняя сила  $\bar{F}(t)$  перестает зависеть от начального газосодержания водяного заряда в водоводе.

Появление отрицательных значений средней силы для пузырьковых водяных зарядов связано с тем, что скорости волн давления, проникающих в пузырьковую и в сплошную жидкость после прихода ударной волны из газа на границу раздела с пузырьковой жидкостью, сильно отличаются друг от друга: в пузырьковой жидкости волна давления распространяется значительно медленнее, чем в сплошной жидкости. Поэтому волна давления, бегущая по сплошной жидкости влево по водоводу, приводит к более раннему выталкиванию воды через левый конец водовода, чем через правый. Этот факт подтверждается данными на рис. 4, где показаны зависимости средней силы  $\bar{F}(t)$ , действующей на устройство, от времени для трех вариантов заполнения водовода пузырьковой жидкостью с  $\alpha_{20} = 0,9$  (вторая серия расчетов). Кривая 1 соответствует варианту с заполнением только



**Рис. 3** Расчетные зависимости средней силы  $\bar{F}(t)$  от времени при передаче импульса от ударной волны водяному заряду с  $\alpha_{20} = 1$  (1) и к пузырьковому водяному заряду с  $\alpha_{20} = 0,97$  (2), 0,94 (3), 0,9 (4) и 0,8 (5)



**Рис. 4** Расчетные зависимости средней силы  $\bar{F}(t)$  от времени для трех вариантов заполнения водовода пузырьковой жидкостью с  $\alpha_{20} = 0,9$ : 1 — заполнение только области I на рис. 1; 2 — областей I и II; 3 — областей I, II и III

области I (см. рис. 1), кривая 2 — областей I и II, кривая 3 — областей I, II и III. Видно, что дополнительное заполнение водовода пузырьковой жидкостью (кривые 2 и 3 на рис. 4) позволяет исключить начальный участок с отрицательной средней силой, обеспечивая при этом значение средней силы, превышающее соответствующее значение для сплошного водяного заряда (см. рис. 3) на временах до 6–7 мс.

## Заключение

Таким образом, на основе системы уравнений двухфазного сжимаемого вязкого течения проведено двумерное численное моделирование передачи импульса от ударной волны, распространяющейся в газе, к сплошной воде и к воде с пузырьками воздуха. При воздействии ударной волны на сплошную воду несжимаемая жидкость вовлекается в движение после отражения ударной волны от поверхности раздела «газ–жидкость» под действием избыточного давления газа, а при воздействии ударной волны на воду с пузырьками воздуха жидкость вовлекается в движение за счет проникновения ударной волны в сжимаемую пузырьковую среду. Параметрические расчеты показали, что при передаче импульса от ударной волны к пузырьковой жидкости возможны динамические эффекты, при которых импульс, переданный пузырьковой жидкости, в течение некоторого времени может значительно превышать импульс, переданный сплошной жидкости, при прочих равных условиях. Указанные динамические эффекты можно использовать для создания энергоэффективных импульсных ГРД.

Фамилии в списке авторов перечислены в алфавитном порядке.



## Литература

1. Куликов С. В., Храмкин М. Ф. Водометные движители (теория и расчет). — Л.: Судостроение, 1980. 312 с.
2. Слижевский Н. Б., Король Ю. М., Соколик М. Г. Расчет ходкости быстроходных судов и судов с динамическими принципами поддержания / Под общ. ред. Н. Б. Слижевского. — Николаев: НУК, 2006. 151 с.
3. Зельдович Я. Б. К теории распространения детонации в газообразных системах // Ж. эксперим. теор. физ., 1940. Т. 10. Вып. 5. С. 542–568.
4. Фролов С. М. Импульсные детонационные двигатели: введение // Импульсные детонационные двигатели / Под ред. С. М. Фролова. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2006. С. 19–32.
5. Кутателадзе С. С., Накоряков В. Е. Теплообмен и волны в газожидкостных системах. — Новосибирск: Наука, 1984. 301 с.
6. Фролов С. М., Аксенов В. С., Фролов Ф. С., Авдеев К. А. Водометный импульсный детонационный двигатель (варианты) и способ создания гидрореактивной тяги. Номер международной заявки РСТ/RU2013/001148 от 23.12.2013.
7. Авдеев К. А., Аксенов В. С., Борисов А. А., Тухватуллина Р. Р., Фролов С. М., Фролов Ф. С. Численное моделирование воздействия ударной волны на пузырьковую среду // Горение и взрыв, 2015. Т. 8. С. 45–56.
8. Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред. Ч. I. — М.: Наука, Физматлит, 1987. 467 с.

Поступила в редакцию 01.11.14

---

## NUMERICAL SIMULATION OF THE MOMENTUM TRANSFER FROM THE SHOCK WAVES TO THE BUBBLE MEDIA

K. A. Avdeev<sup>1,2</sup>, V. S. Aksenov<sup>1,2,3</sup>, A. A. Borisov<sup>1,2</sup>, R. R. Tikhvatullina<sup>4</sup>, S. M. Frolov<sup>1,2,3</sup>, and F. S. Frolov<sup>1,2</sup>

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

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

<sup>3</sup>National Research Nuclear University MEPHI, 31 Kashirskoe Sh., Moscow 115409, Russian Federation

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

**Abstract:** Based on the system of equations for a two-phase compressible viscous flow, a two-dimensional numerical simulation of momentum transfer from the shock wave propagating in a gas to a pure water and water with air bubbles has been performed. Under the effect of a shock wave on the pure water, the incompressible liquid is set in motion due to gas overpressure induced by shock reflection from the gas–liquid interface, whereas

when the shock wave interacts with the water containing air bubbles, the compressible bubbly liquid is set in motion due to shock penetration into it. Parametric calculations have shown that the transfer of momentum from the shock wave to the bubbly liquid was accompanied by short-duration dynamic effects with the momentum transferred to the bubbly water considerably exceeding the momentum transferred to the pure water, other conditions being equal. These dynamic effects can be used to create energy-efficient pulse jet propulsion devices.

**Keywords:** bubbly liquid; shock wave; momentum transfer; numerical simulation

## 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. Hramkin. 1980. *Vodometnye dvizhiteli (teoriya i raschet)* [Hydrojet engines (the theory and calculation)]. Leningrad: Sudostroenie. 312 p.
2. Slizhevskiy, N. B., Yu. M. Korol', and M. G. Sokolik. 2006. *Raschet hodkosti bystrokhodnykh sudov i sudov s dinamicheskimi printsipami podderzhaniya* [The calculation of high-speed propulsion of dynamically supported vessels]. Ed. N. B. Slizhevskiy. Nikolaev: NUK. 151 p.
3. Zel'dovich, Ya. B. 1940. K teorii rasprostraneniya detonatsii v gazoobraznykh sistemakh [To the theory of propagation of detonation in gaseous systems]. *Zh. Eksper. Teor. Fiz.* 10(5):542–568.
4. Frolov, S. M. 2006. Impul'snye detonatsionnye dvigateli: Vvedenie [Pulse detonation engines: Introduction]. *Impul'snye detonatsionnye dvigateli* [Pulse detonation engines]. Ed. S. M. Frolov. Moscow: TORUS PRESS. 19–32.
5. 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. 301 p.
6. 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/RU2013/001148 dated 23.12.2013.
7. Avdeev, K. A., V. S. Aksenov, A. A. Borisov, R. R. Tukhvatullina, S. M. Frolov, and F. S. Frolov. 2015. Chislennoe modelirovanie vozdeystviya udarnoy volny na puzyr'kovuyu sredu [Numerical modeling of the impact of shock wave on bubbly environment]. *Goren. Vzryv (Mosk.) — Combustion and Explosion* 8(2):45–56.
8. Nigmatulin, R. I. 1987. *Dinamika mnogofaznykh sred* [Dynamics of multiphase media]. Part 1. Moscow: Nauka, Fizmatlit. 467 p.

Received November 01, 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