

ГОРЕНИЕ, ВЗРЫВ И УДАРНЫЕ ВОЛНЫ

УДК 535.71

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕДАЧИ КОЛИЧЕСТВА ДВИЖЕНИЯ ОТ УДАРНОЙ ВОЛНЫ К ПУЗЫРЬКОВОЙ ЖИДКОСТИ

© 2015 г. К. А. Авдеев^{1,2}, В. С. Аксёнов^{1,2,3}, А. А. Борисов^{1,2},
С. М. Фролов^{1,2,3*}, Ф. С. Фролов^{1,2}, И. О. Шамшин^{1,2,3}

¹Институт химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук, Москва

²Центр импульсно-детонационного горения, Москва

³Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва

*E-mail: smfrol@chph.ras.ru

Поступила в редакцию 03.04.2015

Проведены систематические экспериментальные и расчетные исследования передачи количества движения от ударных волн с разной начальной амплитудой давления (от 0.05 до 0.5 МПа) к водной среде с пузырьками воздуха со средним диаметром 2.5 мм. Эксперименты проведены в вертикальной лабораторной гидроударной трубе прямоугольного сечения 50 × 100 мм и длиной 1980 мм с камерой высокого давления длиной 495 мм, камерой низкого давления длиной 495 мм и с измерительной секцией длиной 990 мм, оборудованной генератором пузырьков воздуха и заполняемой водой. Эксперименты показали, что с увеличением объемного газосодержания воды от 0 до 30% количество движения, переданное пузырьковой жидкости ударными волнами, монотонно возрастает, достигая постоянного значения при объемном содержании воздуха, близком к 20–25%. Полученные экспериментальные результаты подтверждены двумерными расчетами распространения ударных волн в пузырьковой жидкости как по зависимостям скорости ударной волны от объемного газосодержания, так и по скорости вовлечения пузырьковой жидкости в движение.

Ключевые слова: пузырьковая жидкость, ударная волна, передача количества движения, эксперименты, расчеты.

DOI: 10.7868/S0207401X15110035

1. ВВЕДЕНИЕ

Известно [1, 2], что термодинамический цикл с управляемым детонационным горением (цикл Зельдовича) обеспечивает более высокий термодинамический коэффициент полезного действия (КПД) преобразования химической энергии топлива в работу расширения по сравнению с дефлаграционным горением при постоянном объеме. Использованию цикла Зельдовича в жидкостных ракетных двигателях и в воздушно-реактивных двигателях посвящено множество работ (см. обзор [3]), тогда как возможность использования такого цикла в гидрореактивных двигателях ранее обсуждалась лишь в наших работах [4–7]. Согласно [4–7], импульсно-детонационный гидрореактивный двигатель состоит из водовода и генератора детонационных волн, работающего на той или иной топливной смеси. Важнейшая проблема, стоящая на пути реализации цикла Зельдовича в гидрореактивных двигателях, — эффективная передача количества движения от ударной волны (УВ), выходящей из генератора в водовод, к водной среде.

Цель данной работы — с помощью экспериментальных и расчетных исследований взаимодействия УВ со сжимаемой пузырьковой водной средой определить такое газосодержание воды, при котором достигается наиболее эффективная передача количества движения от УВ к воде.

2. ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Экспериментальные исследования проведены на лабораторной установке “Гидроударная труба” (ГУТ) (рис. 1) постоянного прямоугольного сечения 50 × 100 и длиной 1980 мм, в состав которой входит камера высокого давления (КВД) длиной 495 мм, камера низкого давления (КНД) длиной 495 мм, измерительная секция (ИС) длиной 990 мм, генератор пузырьков (ГП) воздуха, системы подачи горючей смеси, регистрации экспериментальных данных, а также система управления. Для измерения давления в КВД использовали дифференциальный датчик давления пьезокерамического типа (датчик P1 на рис. 1) и датчик абсолютного

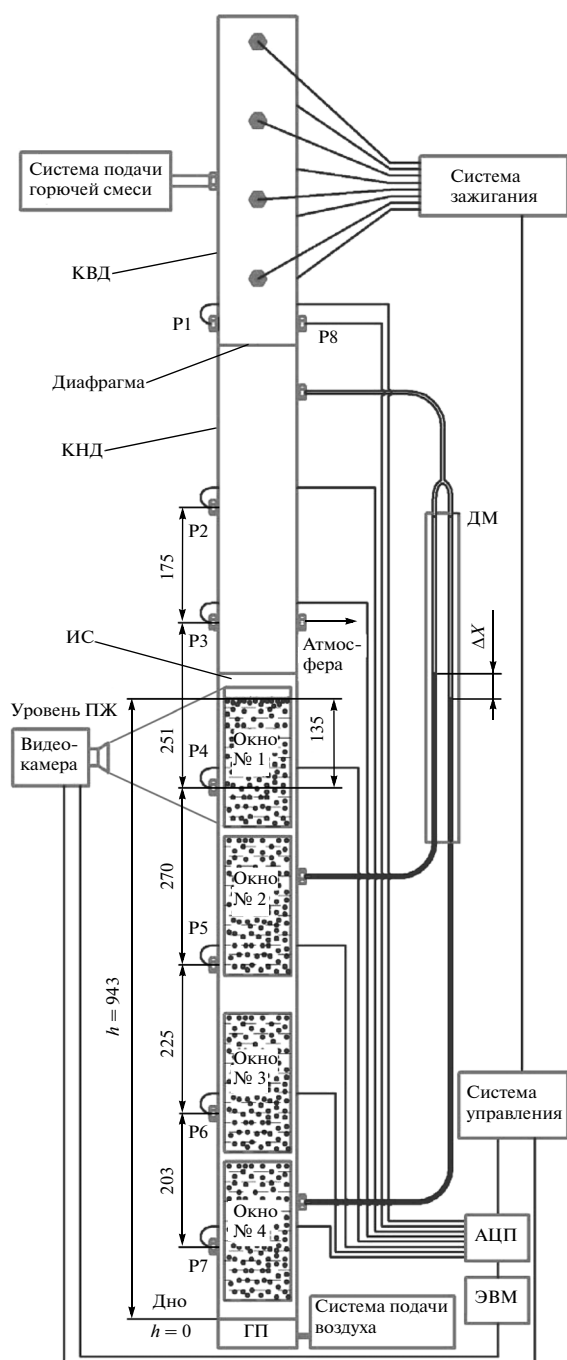


Рис. 1. Схема гидроударной трубы: КВД – камера высокого давления, КНД – камера низкого давления, ИС – измерительная секция, ГП – генератор пузырьков, ДМ – дифференциальный манометр, P1–P7 – пьезокерамические датчики избыточного давления типа РСВ 113В24, P8 – датчик абсолютного давления тензорезистивного типа КУРАНТ-ДА.

давления (датчик P8). Первый использовался для определения амплитуд волн давления, а второй – для измерения начального абсолютного давления в КВД и давления в КВД перед моментом разрыва мембраны. Камера низкого давления установки

ГУТ постоянно сообщалась с атмосферой через боковое отверстие диаметром 3 мм. В КНД с помощью двух высокочастотных пьезокерамических датчиков давления РСВ113В24 (P2 и P3) определялись основные параметры воздушной УВ, формируемой после разрыва мембраны: ее амплитуда, длительность и скорость распространения. В ИС выполнены четыре оптических окна и установлены четыре высокочастотных пьезокерамических датчика давления РСВ113В24 (P4–P7). Перед опытом ИС заполнялась водой. В нижней торцевой части ИС устанавливался генератор воздушных пузырьков, представляющий собой плиту с трубками-капиллярами (152 шт., внутренний диаметр отверстий каждого капилляра – 0.16 мм), через которые воздух из ресивера поступал в воду в виде цепочки отдельных пузырьков. Объемная доля воздуха в воде контролировалась по изменению уровня жидкости (оптическое окно № 1 с нанесенными рисками) и по перепаду уровней жидкости в дифференциальном жидкостном манометре.

Процедура определения объемного газосодержания состояла в следующем. Зная высоту столба пузырьковой среды h и необходимое начальное газосодержание α_{10} , определяли эквивалентную высоту столба газа $h_r = \alpha_{10}h$. Затем ИС заполняли водой до отметки $(h - h_r)$ и включали подачу воздуха, подбирая расход воздуха так, чтобы уровень пузырьковой жидкости (ПЖ) установился на отметке h . На поверхности пузырьковой жидкости всегда присутствовало некоторое количество пузырьков, которые образовывали тонкий слой “пены”, что затрудняло точное определение положения границы пузырьковой жидкости при большом газосодержании ($\alpha_{10} > 8\%$). Поэтому для более точного определения объемного газосодержания использовали дифференциальный водяной манометр. Зная разность высот, на которых производится отбор давления ($\Delta h = 496$ мм) и разность показаний высот водяных столбов Δx , можно определить газосодержание $\alpha_{10} = (\Delta x / \Delta h) \cdot 100\%$. Минимальное значение Δx , которое может быть измерено по показаниям дифференциального манометра с точностью $\pm 0.05\alpha_{10}$, равно 10 мм. Таким образом, нижняя граница по объемному газосодержанию для измерений по водяному манометру находилась в районе отметки $\alpha_{10} = 2\%$. Для получения меньших значений α_{10} использовались только измерения высоты столба жидкости (погрешность – $\pm 0.01\alpha_{10}$).

В таблице приведены координаты всех датчиков давления по отношению к положению диафрагмы ГУТ. Поскольку далее речь пойдет в основном о взаимодействии УВ с поверхностью раздела между воздухом в КНД и газосодержащей водной средой в ИС и о распространении УВ в пузырьковой жидкости, удобно ввести систему координат с началом в точке, отвечающей положению

этой поверхности раздела в начальный момент времени, т.е. положение датчиков давления в ИС — это их глубина погружения в пузырьковую жидкость. Данные координаты также приведены в таблице. По фронтам УВ на осциллограммах давления определялись моменты времени их прихода на тот или иной датчик давления, а по этим моментам времени и по длине измерительных баз рассчитывалась скорость УВ на той или иной измерительной базе. Значения длин всех измерительных баз приведены на рис. 1.

3. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Детальное описание математической модели и процедуры численного решения задачи о взаимодействии ударной волны с пузырьковой жидкостью приведено в [5–7]. Математическая модель основана на двумерных дифференциальных уравнениях двухфазного течения, выведенных в рамках концепции взаимнопроникающих континуумов [8] — на системе уравнений сохранения массы, количества движения и энергии фаз с дополнительными замыкающими соотношениями, описывающими динамическое взаимодействие фаз. Для численного решения системы использовали метод SIMPLE [9], основанный на конечно-объемной дискретизации дифференциальных уравнений с первым порядком аппроксимации по пространству и по времени. Чтобы избежать чрез-

Расстояния от диафрагмы до датчиков давления и глубина датчиков — расстояние от свободной поверхности пузырьковой жидкости до осевой линии датчика

Датчик	Координата, мм	Глубина, мм
P1, P8	–32	–
P2	247	–
P3	422	–
P4	673	135
P5	943	405
P6	1168	630
P7	1371	833

мерного сгущения сетки к твердым поверхностям с прилипанием потока, использовали стандартный метод пристеночных функций.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И РАСЧЕТОВ

Экспериментальные исследования взаимодействия УВ с газосодержащей жидкостью проведены для относительно слабых и сильных УВ. В экспериментах с относительно слабыми УВ использовали диафрагму толщиной 25 мкм. Давление в КВД (≈ 0.3 МПа в момент разрыва диафрагмы) получали за счет подачи в КВД сжатого воздуха. В экспериментах с сильными УВ использовали диа-

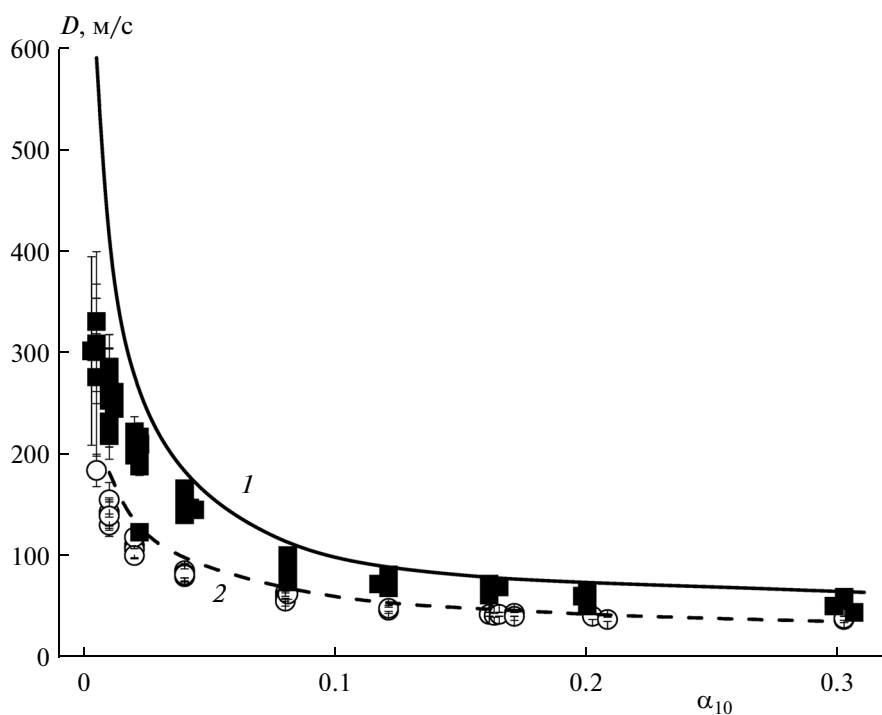


Рис. 2. Зависимость скорости УВ на измерительной базе P5–P6 от объемного газосодержания: ■ — сильная УВ (амплитуда ≈ 0.5 МПа), эксперимент; 1 — сильная УВ (амплитуда ≈ 0.5 МПа), расчет; ○ — слабая УВ (амплитуда ≈ 0.05 МПа), эксперимент; 2 — слабая УВ (амплитуда ≈ 0.05 МПа), расчет.

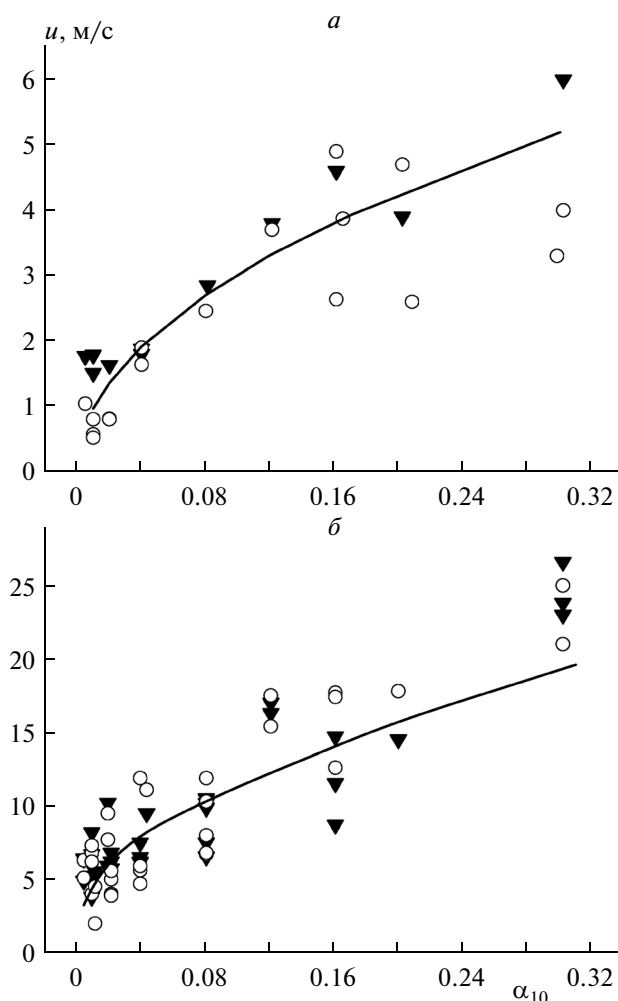


Рис. 3. Сравнение измеренных (точки) и расчетных (кривые) зависимостей скорости контактной границы и пузырьков воздуха (u) от начального объемного газосодержания в относительно слабых (a , амплитуда ≈ 0.05 МПа) и сильных УВ (b , амплитуда ≈ 0.5 МПа): \blacktriangledown – скорость контактной границы, \circ – скорость пузырьков за УВ.

фрагму толщиной 150 мкм, а давление газа в КВД на уровне ~ 1.5 МПа в момент разрыва диафрагмы получали за счет быстрого сжигания пропановоздушной смеси, обогащенной кислородом (до 30 об. %). Во всех экспериментах КНД заполняли воздухом при атмосферном давлении, а в ИС размещали столб воды высотой ≈ 943 мм с пузырьками воздуха со средним диаметром $d_{10} = 2.5$ мм и начальным объемным газосодержанием от 0.5 до 30%. Температура воздуха и воды комнатная.

В качестве примера точками на рис. 2 показаны результаты измерений скорости УВ на измерительной базе Р5–Р6 в пузырьковой жидкости для относительно слабых и сильных УВ при разных начальных значениях объемного газосодержания α_{10} . Экспериментальные значения скоростей УВ получены по осциллограммам давления. Для сравнения на рис. 2 показаны расчетные зависимости скорости УВ от α_{10} , полученные по методике из работ [5–7].

В экспериментах измеряли скорость УВ на всех измерительных базах в ИС, а также скорость контактной границы между воздухом и пузырьковой жидкостью и скорость отдельных воздушных пузырьков. Скорость контактной границы измерялась по видеозаписям скоростной видеокамеры Phantom Miro LC310 с помощью программного обеспечения Phantom Camera Control. Данное программное обеспечение позволяет проводить измерения расстояний и скоростей выбранных точек видеозаписи после предварительной калибровки – установления масштабной связи между изображением и физическим объектом. Для этого в объект съемки всегда включался масштабный отрезок известной длины.

На рис. 3 в виде точек представлены результаты обработки экспериментальных данных по скорости контактной границы и пузырьков воздуха в воде с разным объемным газосодержанием в УВ разной интенсивности. Здесь же в виде кривых

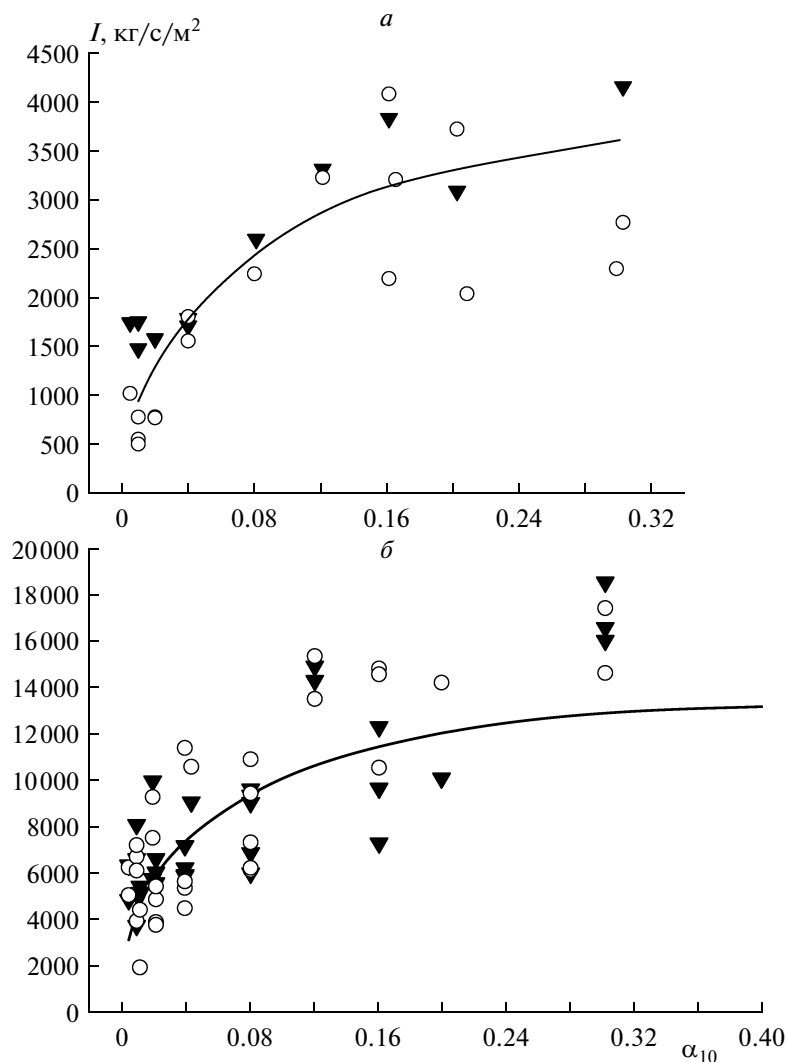


Рис. 4. Сравнение измеренных (точки) и расчетных (кривые) зависимостей удельного импульса жидкости от начального объемного газосодержания в относительно слабых (*a*, амплитуда ≈ 0.05 МПа) и сильных УВ (*б*, амплитуда ≈ 0.5 МПа): \blacktriangledown – импульс пузырьковой жидкости, определенный по измеренной скорости контактной границы; \circ – импульс пузырьковой жидкости, определенный по измеренной скорости пузырьков.

приведены результаты расчетов скорости жидкости за УВ, выполненные по методике из [5–7].

Из рис. 3 видно, что между скоростью контактной границы и скоростью воздушных пузырьков за УВ имеется полная корреляция, причем не только качественная, но и количественная. Видно также, что расчетная максимальная скорость жидкости наилучшим образом согласуется с экспериментальными данными по скорости контактной границы и по скорости воздушных пузырьков за УВ во всем диапазоне изменения объемного газосодержания как для относительно слабых (рис. 3*a*), так и для сильных УВ (рис. 3*б*).

Используя измеренные значения скорости контактной границы и скорости воздушных пузырьков, можно определить удельный импульс,

приобретенный пузырьковой жидкостью за бегущей УВ:

$$I = (1 - \alpha_{01}) \rho_2 u_2,$$

где α_{01} – начальное объемное газосодержание, ρ_2 – плотность жидкости, u_2 – скорость жидкости за УВ в контрольном сечении.

На рис. 4 показаны полученные из эксперимента (точки) и из расчета (кривые) зависимости удельного импульса от объемного газосодержания для относительно слабых (рис. 4*a*) и сильных УВ (рис. 4*б*). Видно, что расчетный удельный импульс хорошо согласуется с удельным импульсом, определенным из эксперимента, во всем диапазоне изменения объемного газосодержания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены систематические экспериментальные и расчетные исследования передачи количества движения от ударных волн с разной начальной амплитудой давления (от 0.05 до 0.5 МПа) к водной среде с пузырьками воздуха со средним диаметром 2.5 мм. Эксперименты проведены в вертикальной лабораторной гидроударной трубе прямоугольного сечения 50 × 100 мм и длиной 1980 мм с КВД длиной 495 мм, КНД длиной 495 мм и с ИС длиной 990 мм. Измерительная секция была оборудована генератором пузырьков воздуха и заполнялась водой. Эксперименты показали, что с увеличением объемного газосодержания воды от 0 до 30% количество движения, переданное пузырьковой жидкости ударными волнами, монотонно возрастает, достигая постоянного значения при объемном содержании воздуха, близком к 20–25%. Полученные экспериментальные результаты подтверждены двумерными расчетами распространения ударных волн в пузырьковой жидкости как по зависимостям скорости ударной волны от объемного газосодержания, так и по скорости вовлечения пузырьковой жидкости в движение.

Авторы признательны В.А. Сметанюку за помощь в работе со скоростной видеокамерой.

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 демонстрационно-

го 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”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зельдович Я.Б.* // ЖЭТФ. 1940. Т. 10. № 5. С. 543.
2. *Фролов С.М.* // Импульсные детонационные двигатели / Под ред. С.М. Фролова М.: Торус Пресс, 2006. С. 19.
3. *Roy G.D., Frolov S.M., Borisov A.A., Netzer D.W.* // Progress in Energy and Combust. Sci. 2004. V. 30. № 6. P. 545.
4. *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>
5. *Авдеев К.А., Аксенов В.С., Борисов А.А., Тухватуллина Р.Р., Фролов С.М., Фролов Ф.С.* // Горение и взрыв. 2015. Т. 8. № 2. С. 45.
6. *Авдеев К.А., Аксенов В.С., Борисов А.А., Тухватуллина Р.Р., Фролов С.М., Фролов Ф.С.* // Там же. 2015. Т. 8. № 2. С. 57.
7. *Авдеев К.А., Аксёнов В.С., Борисов А.А., Тухватуллина Р.Р., Фролов С.М., Фролов Ф.С.* // Хим. физика. 2015. Т. 34. № 5. С. 34.
8. *Нигматулин Р.И.* Динамика многофазных сред. Ч. I. М.: Наука, 1987.
9. *Патанкар С.* Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоатомиздат, 1984.