

УДК 533/519.63

## ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УДАРНОЙ ТРУБЫ В ПАКЕТЕ OPENFOAM

© К. И. Баширова<sup>1</sup>, К. И. Михайленко<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Уфимский государственный авиационный технический университет  
Россия, Республика Башкортостан, 450008 г. Уфа, ул. К. Маркса, 12.

<sup>2</sup>Институт механики им. Р. Р. Мавлютова УФИЦ РАН  
Россия, Республика Башкортостан, 450054 г. Уфа, пр. Октября, 71.

Тел: +7 (347) 292 14 10.

\*Email: const@uimech.org

Созданы одно- и трехмерная модели ударной трубы в пакете OpenFOAM. Рассмотрены процессы поглощения ударной волны дисперсной средой. Гранулированная среда задана в виде *stl*-модели. Показано влияние гранулированной среды на распространение волны. Проведены вычислительные эксперименты, описывающие перераспределение ударной волны при прохождении сквозь дисперсную среду. Приведено сравнение результатов вычислений для одномерной и трехмерных моделей с гранулированной средой в нижней части ударной трубы и без нее.

**Ключевые слова:** вычислительное моделирование, ударная труба, многофазные системы, гранулированная среда, OpenFOAM.

### Введение

Ударная труба – длинный цилиндр, перегороденный диафрагмой из легко разрушающегося материала. За диафрагмой находится газ под высоким давлением. Таким образом, в начальный момент времени имеется два однородных сектора с существенно различными давлениями, температурами и плотностью. В результате возникает ударная волна, выходящая из области высокого давления со звуковой скоростью. На фронте волны образуется резкий скачок давления (до  $10^7$  Па) и температуры (до тысяч градусов по Кельвину). После этого на протяжении длительного времени давление и температура сохраняют получившиеся постоянные значения. Впоследствии ударная волна и противоположно направленная называемая волна разряжения отражаются от торцов трубы и усложняют наблюдаемые процессы.

К настоящему моменту проведено множество экспериментальных исследований распространения ударной волны. Часть из них связана с численным и аналитическим анализом прохождения волны через пузырьковую систему. Как правило, изучается распространение слабых волн, их распространение и перераспределение энергии, либо же возможности поглощения ударных волн пузырьковыми завесами. В частности, в [1] рассматривается неравновесность давления в жидкой и газовой частях системы, а также процесс перераспределения ударной волны. В т.ч. изучалось влияние распределения газа на ослабление воздействия волны на стенку [2]. В работе [3] численно анализируется прохождение и рассеяние волн в пузырьковом слое. Показывается существенное рассеяние вблизи собственных частот пузырьков, а также нелинейные эффекты волны даже при незначительных амплитудах.

В ряде исследований рассматриваются серии ударных волн. В этом случае эксперименты проводятся на сверхзвуковой аэродинамической трубе [4],

что затрудняет проведение испытаний из-за высокой стоимости. Некоторые исследователи сообщают, что серии ударных волн можно наблюдать и в простых ударных трубах [5–6]. Ударная волна, генерируемая разрывом диафрагмы, распространяется вдоль секции низкого давления, а затем в сторону высокого давления. Граничный слой индуцируется волной, взаимодействующей с твердой стенкой [7]. В результате, волна движется вверх по потоку и взаимодействует с развивающимся пограничным слоем вдоль стенки в области низкого давления [8].

Стоит отметить возможное влияние геометрии поверхности гранулированной среды. В [9] рассматривается прохождение газа сквозь гранулированную среду различных форм, возникающих при деформациях, вызванных потоком. Рассматривается эффект неоднородности скорости после прохождения слоя с засыпкой, а также влияние искривления и формы гранулированной среды.

В [10] на основе проведенного эксперимента исследуется перепад давления в вертикальной ударной трубе, при ступенчатом распределении слоя газа внутри трубы. Показано, что неравномерность расположения пузырьков приводит к усилению затухания волн.

Исследовались также ударные волны в столбе химически активных газов [11]. В результате поглощения энергии волны пузырьки приобретают температуру воспламенения смеси, взрываются и вызывают повторную ударную волну. Этот эффект получил название пузырьковой детонации.

В большинстве исследований при расчетах используются одномерные или плоскопараллельные модели, в то время как полноценная трехмерная позволит описать ударную волну более точно. Поставленная задача с неподвижными пузырьками является первым приближением, которое позволит моделировать прохождение ударной волны сквозь насыщенную пузырьками среду.

### Математическая модель

Для описания исследуемого процесса запишем следующую математическую модель:

- уравнение неразрывности газовой фазы:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_i)}{\partial x_i} = 0;$$

- уравнение движения газовой среды:

$$\frac{\partial(\rho v_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_i v_j)}{\partial x_j} = -\alpha \frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i;$$

- уравнение энергии газовой среды:

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_j E)}{\partial x_j} = -\alpha \frac{\partial(\rho v_j)}{\partial x_j} + \frac{\partial(\tau_{ij} v_k)}{\partial x_j} + \rho v_j g_j;$$

- уравнение состояния идеального газа:

$$e = \frac{p}{(\gamma-1)\rho};$$

где  $\gamma$  – показатель адиабаты;  $v_i$  –  $i$ -я составляющая вектора скорости газовой фазы;  $\rho$  – эффективная плотность газовой фазы, связанная с истинной плотностью  $\rho^0$  соотношением  $\rho = \alpha \rho^0$ ;  $\alpha$  – объемная концентрация газовой фазы;  $E = e + \frac{v_i^2}{2}$  – удельная полная энергия газовой фазы,  $e$  – внутренняя энергия;  $p$  – давление;  $g$  – ускорение свободного падения; тензор напряжений

$$\tau_{ij} = \mu \left[ \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial v_k}{\partial x_k} \right].$$

Здесь  $\mu$  – динамическая вязкость;  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера, где  $i$  и  $j$  – индексы координат.

Так как гранулированная среда моделируется конечно-разностной сеткой, представленной однофазной модели достаточно для описания рассматриваемого явления.

### Численное решение

В качестве среды моделирования выбран пакет OpenFOAM. Для численного расчета применяется решатель *sonicFoam*, уточняющая сетка для гранул создана средствами утилиты *snappyHexMesh*, входящей в пакет OpenFOAM.

Для сравнения результатов были созданы аналогичные по длине трехмерная и одномерная модели ударной трубы без гранулированной засыпки. Построенные для них сетки представлены на *рис. 1(a)* и *(б)* соответственно.

Для создания цилиндра трехмерной трубы используется квадрат в центре сечения, от которого расходятся прямые к точкам, лежащим на будущей окружности. Все стороны квадрата сглаживаются для уточнения сетки (*рис. 1(б)*) [12].

В третьей модели к исходной трехмерной трубе (*рис. 1 (б)*) добавляется дисперсная среда, задаваемая при помощи *stl*-модели. При генерации сетки с наличием гранулированной среды число ячеек сетки увеличивается с 2550 до 122962 элементов. Пример сетки показан на *рис. 1(в)*.

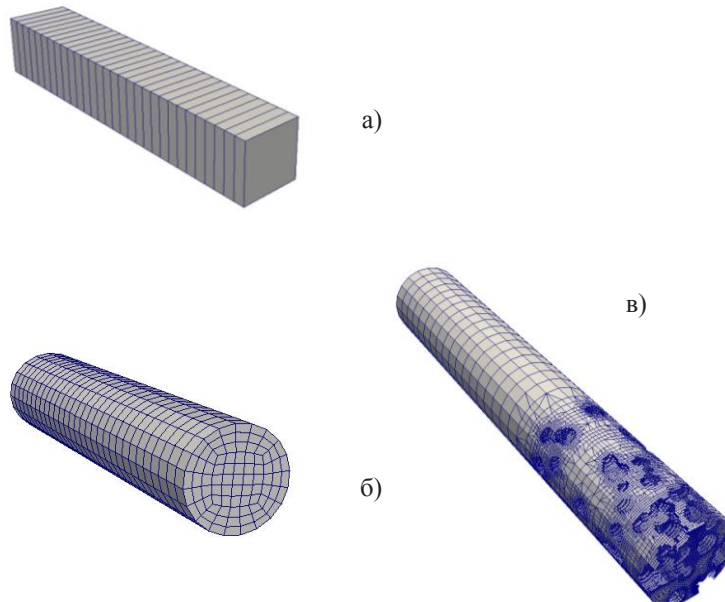


Рис.1. Пример одномерной конечно-разностной сетки (а); трехмерная сетка (б); трехмерная сетка с гранулированной средой (в)

**Параметры задачи**

В ходе работы рассматривается трехмерная ударная труба, длина которой составляет 30 см, а диаметр 5 см (в одномерном случае учитывается только длина). В начальных условиях труба разбивается на две области: нормального ( $10^5$  Па) и низкого ( $10^4$  Па) давления. В реальных экспериментальных установках на границе раздела размещается тонкая диафрагма. В нулевой момент времени область нормального давления занимает верхнюю треть от общего объема трубы, как это показано на *рис. 2(а)*.

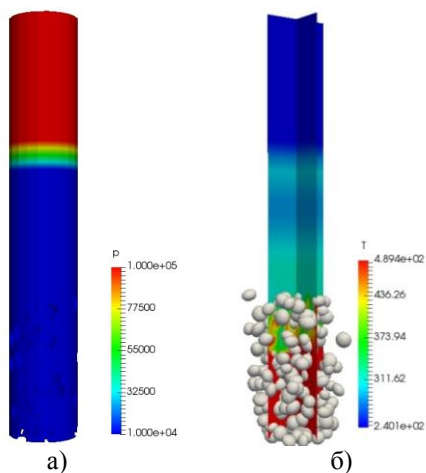


Рис.2. Начальное давление в ударной трубе (а); схема размещения гранулированной среды внутри ударной трубы (б).

В нижней трети трубы может быть размещена гранулированная среда (на *рис. 2(б)* показаны два продольных сечения ударной трубы и stl-модель гранулированной среды). Объемное содержание засыпки составляет  $\sim 0.2$  для параллелепипеда высотой 10 см, длиной и шириной по 5.2 см. В этой заполненный зерном параллелепипед вписывается цилиндрическая труба. Тем самым достигается вырезание из полого цилиндра множества небольших эллипсоидов, выполняющих роль засыпки. Зерна гранулированной среды задаются произвольно размещенными эллипсоидами, радиус которых варьи-

руется от 35 мм до 45 мм. Общее количество составило 201 элемент.

С учетом околосвуковой скорости распространения ударной волны, рассчитывалось 0.00095 с ее движения. За это время волна достигает противоположного конца трубы, отражается от него и выходит из области гранулированной среды. Расчет проводился с шагом по времени  $10^{-7}$  с.

Для давления на всех стенках задается граничное условие второго рода  $\frac{\partial p}{\partial n} = 0$  (условие *zero-Gradient* в OpenFOAM). Скорость на нижней границе трубы приравнивается к нулю, что позволяет добиться корректного отражения волны. На боковых стенках установки и на границах зерен поставлено условие проскальзывания (*slip*).

За счет использования представленных граничных условий и создания единой сетки, описывающей ударную трубу и зерна гранулированной среды, нет необходимости решать две системы уравнений газовой динамики.

**Обсуждение результатов**

На *рис. 3–5* показаны результаты моделирования прохождения ударной волны по нижней части ударной трубы. Размер показанной области определяется размещением гранулированной среды в модели с засыпкой.

На *рис. 3* представлены зависимости температуры от расстояния в моменты времени  $t = 0.00035$  с,  $t = 0.0005$  с,  $t = 0.00065$  с соответственно. На *рис. 3(а)* видно, что температура в полой трехмерной трубе резко поднимается при приближении к стенке, тогда как в трубе с гранулированной средой повышение температуры происходит равномерно. На *рис. 3(б)* видно, что при вхождении в нижнюю область трубы температура значительно выше в модели с гранулированной средой, нежели в пустой трубе. Разогрев можно объяснить сильным сжатием. На *рис. 3(в)* видно, что графики температур в трехмерных трубах в целом схожи, однако температура в гранулированной среде все же выше из-за значительного сжатия.

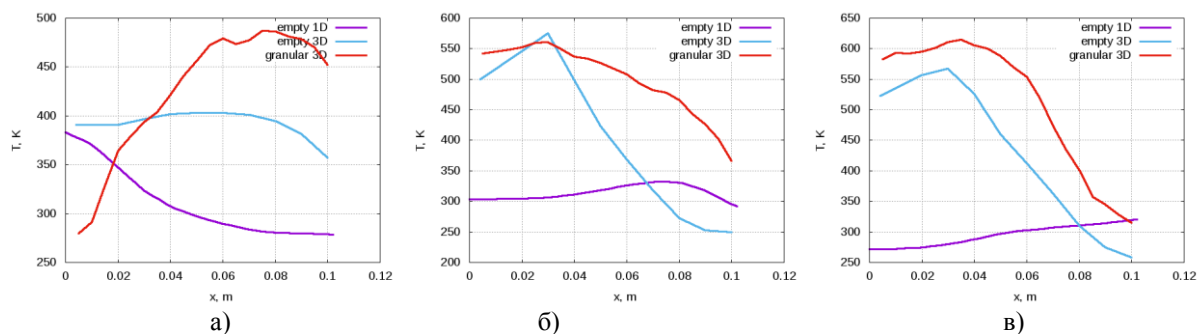


Рис. 3. Распределение температуры в нижней области ударной трубы для трех рассматриваемых моделей в моменты времени  $t = 0.00035$  с (а);  $t = 0.0005$  с (б);  $t = 0.00065$  с (в).

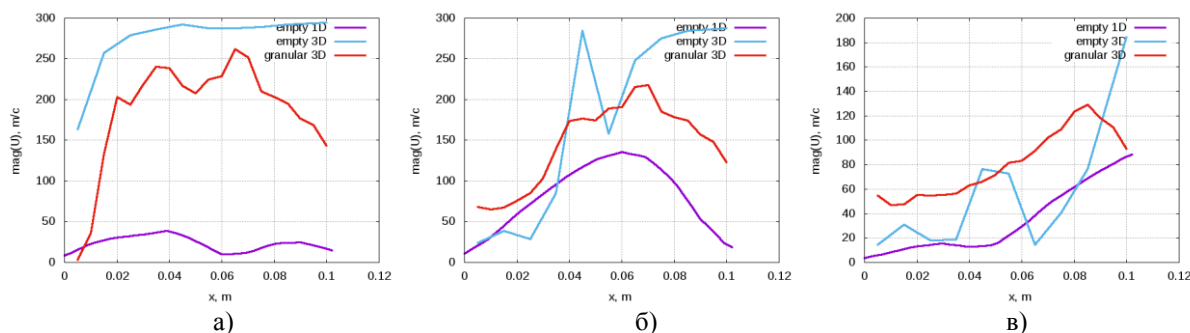


Рис. 4. Распределение модуля скорости в нижней области ударной трубы для трех рассматриваемых моделей в моменты времени  $t = 0.00035$  с (а);  $t = 0.0005$  с (б);  $t = 0.00065$  с (в).

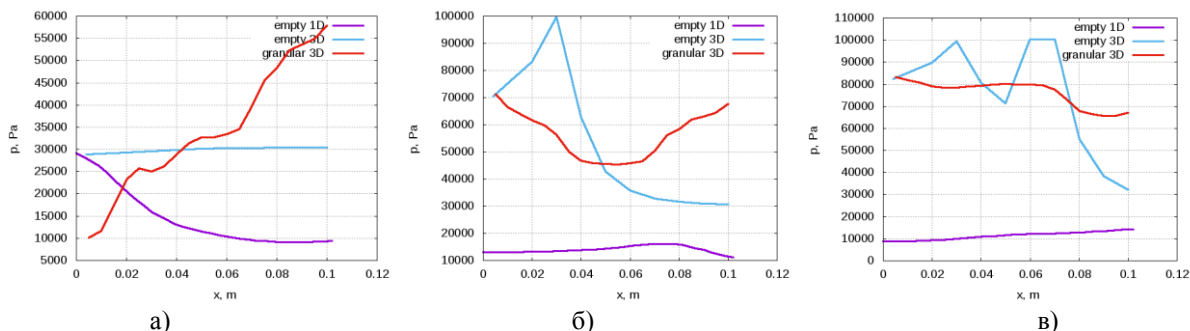


Рис. 5. Распределение давления в нижней области ударной трубы для трех рассматриваемых моделей в моменты времени  $t = 0.00035$  с (а);  $t = 0.0005$  с (б);  $t = 0.00065$  с (в).

Следует отметить значительное отличие результатов, полученных для одномерной модели, от трехмерного случая, что можно объяснить существенным влиянием стенок ударной трубы, несмотря на поставленное условие проскальзывания.

На рис. 4 представлены зависимости модуля скорости от расстояния. На рис. 4(а) видно, что модуль скорости в трехмерных трубах изменяется похожим образом, тогда как на рис. 4(б) наблюдается резкий скачок скорости в полой трубе. Это объясняется отражением волны от нижнего конца трубы. В модели с гранулированной средой в это время наблюдается более сглаженное движение за счет рассеяния волны. Отображенные на рис. 4(в) скачки волны в полой трубе возникают из-за столкновения первоначальной и отраженной волн. В трехмерной трубе с гранулированной средой подобных скачков не наблюдается из-за перераспределения волны.

Графики модуля скорости иллюстрируют прохождение волны сквозь дисперсную среду и последующее отражение от нижней стенки трубы. В момент времени  $t = 0.00035$  можно заметить уменьшение модуля скорости при входе волны в область с гранулированной засыпкой.

На рис. 5(а) можно увидеть резкое увеличение давления в трехмерной трубе с гранулированной средой. Напротив, на рис. 5(б) видно плавное и незначительно уменьшение давления в этой трубе, тогда как в полой трубе видны резкие скачки давления из-за отражения. На рис. 5(в) происходит значительное падение давления в полой трубе, и

плавное увеличение в трубе с гранулированной средой.

Таким образом, можно сделать вывод, что результаты значений, полученные на одномерной модели, существенно отличаются от аналогичных результатов трехмерных моделей. Гранулированная среда дает существенные скачки значений. Значительно увеличивается температура. Модуль скорости и давления значительно сглаживаются и рассеиваются при прохождении волны сквозь область с гранулированной средой.

### Заключение

В работе продемонстрированы результаты моделирования ударной трубы.

Рассмотрены одно- и трехмерный случаи, а также трехмерная модель с наличием гранулированной среды в нижней части ударной трубы. Произведенные в пакете OpenFOAM вычислительные эксперименты показали существенное различие в результатах для одномерной и трехмерной моделей. В то же время наличие гранулированной засыпки приводит лишь к такому различию в результатах, которое может быть объяснено многократным переотражением волн давления внутри гранулированной среды.

Однако представленный подход, когда гранулированная среда задается с помощью конечно-разностной сетки нельзя считать удачным. Его применение связано с существенными затратами вычислительных ресурсов, напрямую связанными объемной концентрацией гранулированной среды.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кедринский В. К. Ударные волны в жидкости с пузырьками газа // ФГВ. 1980. Т. 16, №5. С. 14–25.
2. Parkin B. R., Gilmore F. R., Brode H. L. Shock waves in bubbly water. Memorandum RM-2795-PR. Abridged. 1961.
3. Губайдуллин А. А., Кутрунов А. В., Рустюмова О. Ш., Яковлева Т. Н. Некоторые вопросы волновой динамики жидкости с пузырьками газа // В сб.: Итоги исследований. Тюмень. 1994. С. 23–31.
4. Miksis M. J., Ting L. Effects of bubbly layers on wave propagation // J. Acoust. Soc. Amer. 1989. V. 86, 6, P. 2349–2385.
5. Carroll B. F., Dutton J. C. Characteristics of multiple shock wave/turbulent boundary-layer interactions in rectangular ducts // J. Propul. Power 6. 1990. P. 186–193.
6. Kim D. W., Kim T. H., Kim H. D. A study on characteristics of shock train inside a shock tube // Theoretical & Applied Mechanics Letters 7. 2017. P. 366–371.
7. Matsuo K., Kage K., Kawagoe S. The interaction of a reflected shock wave with the contact region in a shock tube, Bull. Japan Soc. Mech. Eng. 18. 1975. P. 681–688.
8. Zhang G., Setoguchi T., Kim H. D. Numerical simulation of flow characteristics in micro shock tube, J. Therm. Stresses 24. 2015. P. 246–253.
9. Михайленко К. И., Кулешов В. С. Математическое моделирование скоростной неравномерности потока газа за пористой преградой // Вычислительные технологии. 2015. Т. 20. №6. С. 46–58.
10. Донцов В. Е., Накоряков В. Е. Волны давления в газожидкостной среде с расслоенной структурой жидкость—пузырьковая смесь // ПМТФ. 2003. Т. 44, №4. С. 102–107.
11. Hasegawa T., Fujiwara T. Detonation in oxyhydrogen bubbled liquids // Proc. 19th Intern. Symp. on Combustion. Haifa, 1982.
12. Михайленко К. И. К моделированию вихревой трубы: подготовка гексагональной сетки для вычислительных экспериментов в среде OpenFOAM // Труды Института механики им. Р. Р. Мавлютова УНЦ РАН. 2016. Т. 11, №1. С. 112–118.

*Поступила в редакцию 14.09.2018 г.*

### THREE-DIMENSIONAL SIMULATION OF A SHOCK TUBE WITH OPENFOAM SOFTWARE

© K. I. Bashirova<sup>1</sup>, K. I. Mikhaylenko<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>*Ufa State Aviation Technical University  
12 Karl Marx Street, 450008 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia.*

<sup>2</sup>*Mavlyutov Institute of Mechanics, Ufa Federal Research Center of RAS  
71 Oktyabrya Avenue, 450054 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia.*

*Phone: +7 (347) 292 14 10.*

*\*Email: const@uimech.org*

In the OpenFOAM software prepared one- and three-dimensional models of the shock tube. The processes of absorption of a shock wave by a dispersed medium were considered. The granular medium was specified as a stl-model, which defined the grid generated by the snappyHexMesh utility. Thus, the model described the dynamics of a single-phase gas, whereas a granular medium was specified by the boundary conditions on the corresponding walls. A grid with a size of up to 125.000 nodes was generated. Calculations were performed using the sonicFoam solver. The influence of granular backfilling on the processes of propagation of the shock wave is shown. Numerical simulations were performed that describe the processes of absorption and redistribution of the shock wave by a granular medium that has different concentrations and different grain sizes. Comparisons of results of calculations for one- and three-dimensional models were given. There is a significant difference in modeling results between one- and three-dimensional models. This difference is observed for all the physical quantities under consideration: pressure, temperature, and velocity. This effect can be explained, when the influence of the walls is taken into account. The effects of propagation of shock waves, observed in the presence of a granular medium, can be explained by their repeated reflection from the grains. The conclusion was drawn that the approach with modeling by the formation of a granular medium through a grid is too demanding in terms of computational resources.

**Keywords:** numerical simulation, shock tube, multiphase systems, granular medium, OpenFOAM.

Published in Russian. Do not hesitate to contact us at bulletin\_bsu@mail.ru if you need translation of the article.

### REFERENCES

1. Kedrinskii V. K. FGV. 1980. Vol. 16, No. 5. Pp. 14–25.
2. Parkin B. R., Gilmore F. R., Brode H. L. Shock waves in bubbly water. Memorandum RM-2795-PR. Abridged. 1961.
3. Gubaidullin A. A., Kutrunov A. V., Rustyumova O. Sh., Yakovleva T. N. V sb.: Itogi issledovaniy. Tyumen'. 1994. Pp. 23–31.
4. Miksis M. J., Ting L. J. Acoust. Soc. Amer. 1989. Vol. 86, 6, Pp. 2349–2385.
5. Carroll B. F., Dutton J. C. J. Propul. Power 6. 1990. Pp. 186–193.
6. Kim D. W., Kim T. H., Kim H. D. Theoretical & Applied Mechanics Letters 7. 2017. Pp. 366–371.
7. Matsuo K., Kage K., Kawagoe S. The interaction of a reflected shock wave with the contact region in a shock tube, Bull. Japan Soc. Mech. Eng. 18. 1975. Pp. 681–688.
8. Zhang G., Setoguchi T., Kim H. D. Numerical simulation of flow characteristics in micro shock tube, J. Therm. Stresses 24. 2015. Pp. 246–253.
9. Mikhailenko K. I., Kuleshov V. S. Vychislitel'nye tekhnologii. 2015. Vol. 20. No. 6. Pp. 46–58.
10. Dontsov V. E., Nakoryakov V. E. PMTF. 2003. Vol. 44, No. 4. Pp. 102–107.
11. Hasegawa T., Fujiwara T. Proc. 19th Intern. Symp. on Combustion. Haifa, 1982.
12. Mikhailenko K. I. Trudy Instituta mekhaniki im. R. R. Mavlyutova UNTs RAN. 2016. Vol. 11, No. 1. Pp. 112–118.

*Received 14.09.2018.*