

ISSN: 2658–5782

Номер 4

Октябрь–Декабрь 2019

МНОГОФАЗНЫЕ СИСТЕМЫ

mfs.uimech.org





Отражение ударной волны от слоя мелкодисперсной среды малых концентраций

Баширова К.И. *, Михайленко К.И.**

*Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа

**Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа

В работе исследуется распространение ударной волны при взаимодействии с неплотно упакованной гранулированной средой. Представленная в работе континуальная двухфазная математическая модель позволяет численно описать распространение ударной волны в канале ударной трубы, достижение ударной волной слоя гранулированной засыпки и отражение волны. Показано, что гранулированная среда частично пропускает ударную волну, но по большей части отражает ее. Указанное отражение отличается от отражения ударной волны от твердой стенки. Характер отражения ударной волны существенно зависит от плотности гранул. В частности, показано, что гранулированная среда меньшей плотности за счет повышенной подвижности отдельных частиц приводит к некоторому усилению отраженной волны. Также показано, что отраженная волна в этом случае образует два выраженных пика. При этом следует отметить, что прошедшая в слой гранулированной среды волна давления наоборот оказывается тем больше, чем тяжелее частицы гранулированной среды.

Ключевые слова: многофазные системы, гранулированная среда, ударные волны, математическое моделирование, OpenFOAM

1. Введение

Ударная труба — это широко известный инструмент, организованный как длинный цилиндр, перегороденный диафрагмой из легко разрушающегося материала. С одной стороны от диафрагмы находится газ под высоким давлением. Таким образом, в начальный момент времени существуют две однородные области с существенно различными давлениями, плотностями и, возможно, температурами.

Ударные трубы появились в конце XIX в. и с тех пор являются самостоятельной экспериментальной установкой для проведения различных испытаний. Так, возможность получения нагретого до 10000 К газа используется при проведении химических экспериментов. В астрофизических исследованиях спектры звезд сравниваются со спектрами, полученными на ударных трубах.

К настоящему времени проведено множество теоретических и экспериментальных исследований распространения ударной волны. Заметная часть из них основывается на численных и аналитических моделях прохождения волны в двухфазной среде, что связано с вопросами усиления или ослабления ударных волн. Для большинства исследователей наибольший интерес представляет прохождение ударной волны через пузырьковую систему [1]. Это определяется зачастую аномальным поведением пузырьковых кластеров. Например, изучается влияние распределения газа на ослабление воздействия волны на стенку [2]. В работе [3] численно анализируется прохождение и рассеяние волн в пузырьковом слое. В частности, в этой работе показывается существенное рассеяние вблизи собственных частот пузырьков, а также нелинейные эффекты волны даже при незначительных амплитудах.

В статье [4] рассматриваются барьеры из водной пены, поглощающие взрывные волны. В работе сравниваются результаты численного модели-

рования с испытаниями ударной трубы. Исследуется влияние пены на скорость распространения ударной волны и давление после ее прохождения, распределение жидкости по пространству, заполненному средой с пеной.

На наш взгляд недостаточное внимание исследователей уделено взаимодействию ударных волн с твердыми гранулированными средами. В настоящей работе представляется математическая модель, предназначенная для вычислительного моделирования прохождения ударной волны в слой мелкодисперсной среды и ее отражение от указанного слоя.

2. Математическая модель

Математическая модель рассматриваемой двухфазной системы может быть записана в предположении о возможности континуального описания как газа, так и дисперсной среды в рамках модели взаимопроникающих многофазных сред [5].

Модель включает в себя уравнения неразрывности

$$\frac{\partial \alpha_i \rho_i}{\partial t} + \frac{\partial \alpha_i u_{ij}}{\partial x_j} = 0;$$

импульсов

$$\frac{\partial \alpha_i \rho_i u_{ik}}{\partial t} + \frac{\partial \alpha_i u_{ij} u_{ik}}{\partial x_j} = -\alpha_i \frac{\partial p}{\partial x_k} + \frac{\partial \tau_{kj}^i}{\partial x_j} + \alpha_i \rho_i g + F_i;$$

и энергии

$$\frac{\partial \alpha_i \rho_i E_i}{\partial t} + \frac{\partial \alpha_i u_{ij} E_i}{\partial x_j} = -\alpha_i \frac{\partial p u_k}{\partial x_k} + \frac{\partial \tau_{jk}^i u_k}{\partial x_j} + \alpha_i \rho_i u_j g_j.$$

Здесь использованы следующие обозначения: α_i — объемная концентрация i -ой фазы; ρ_i — полная (истинная) плотность i -ой фазы при $\alpha_i = 1$; u_{ij} — j -ая составляющая вектора скорости i -ой фазы; p — полное давление в системе; τ^i — тензор напряжений i -ой фазы; g — ускорение свободного падения; F_i — сила межфазного взаимодействия, действующая на i -ую фазу; E — удельная полная энергия i -ой фазы.

Тензоры напряжений фаз записываются аналогично работе [6], сила межфазного взаимодействия может быть записана исходя из интегрирования по объему силы Стокса для отдельной гранулы [7, 8].

Система замыкается подходящим уравнением состояния, например идеального газа.

Такой подход выглядит продуктивнее использования однофазной модели, когда гранулированная среда задается с использованием вычислительной сетки и граничных условий на стенке для описания поверхности каждой гранулы [9].



Рис. 1. Пример распределения гранулированной среды в нижней части ударной трубы

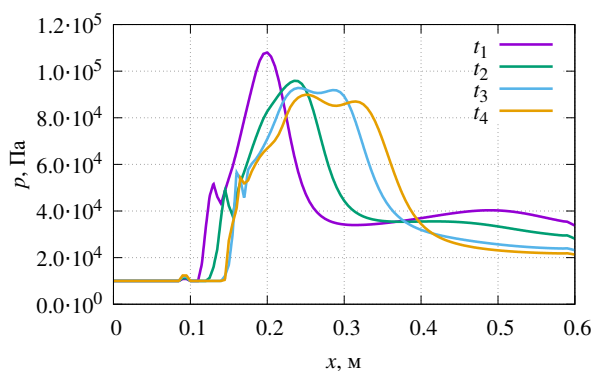
3. Численная реализация

В качестве среды для моделирования был использован пакет OpenFOAM (свободно распространяемый пакет, предназначенный для решения задач механики сплошных сред, численного моделирования в гидродинамике).

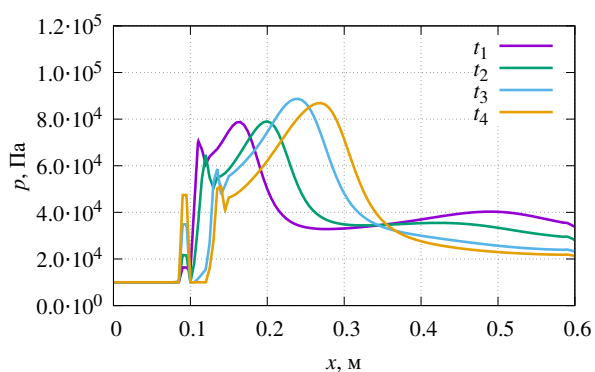
В работе рассматривается нижняя часть ударной трубы длиной 60 см и диаметром 5 см. При задании начальных условий труба разбивается на две области средствами утилиты setFields: нормально-го (10^5 Па) и низкого (10^4 Па) давлений. В нулевой момент времени область нормального давления занимает верхнюю треть от общего объема трубы. В нижних 10 см трубы размещена гранулированная среда. Объемное содержание засыпки составляет 0,2, диаметр зерна — $3 \cdot 10^{-8}$ м. При расчетах используются различные значения плотности дисперсной среды: от 1000 до 3000 кг/м³.

Схема расчетной области приведена на рис. 1.

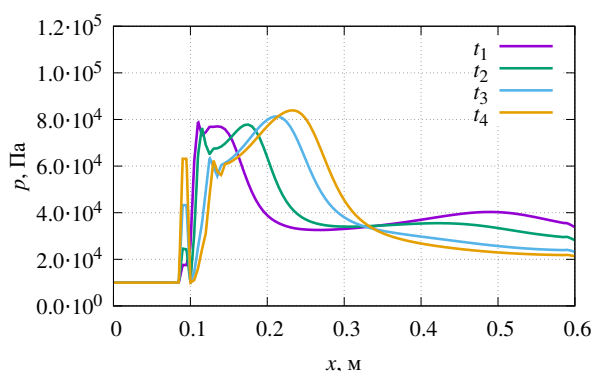
Для решения поставленной задачи использован стандартный solver twoPhaseEulerFoam пакета OpenFOAM. В качестве граничных условий заданы условие прилипания для воздуха на всех стенках трубы и условие проскальзывания для частиц на всех границах. Для давления было задано условие zeroGradient на стенках трубы.



(a)



(б)



(в)

Рис. 2. Распределение давления в некоторые одинаковые моменты времени при отражении ударной волны от слоя гранулированной среды с плотностью частиц 1000 кг/м^3 (а), 2000 кг/м^3 (б), 3000 кг/м^3 (в)

Расчеты проводились до момента времени 0.0015 с , что соответствует моменту достижения ударной волной нижнего края установки в отсутствие мелкодисперсной среды.

4. Обсуждение результатов

На рис. 2 показаны результаты расчетов представленной выше модели для трех вариантов гранулированной среды, когда полная (истинная) плотность частиц равна 1000 (рис. 2(а)), 2000 (рис. 2(б)) и 3000 кг/м^3 (рис. 2(в)).

На каждом графике приведено распределение давления в канале ударной трубы в моменты времени соответствующие $t_1 = 0.00092 \text{ с}$, $t_2 = 0.00106 \text{ с}$, $t_3 = 0.00126 \text{ с}$ и $t_4 = 0.00138 \text{ с}$.

На представленных графиках можно отметить, что характер отражения ударной волны от слоя гранулированной среды существенно зависит от плотности составляющих указанную гранулированную среду частиц. Так, для тяжелых частиц (рис. 2(в)) отражение наиболее близко к отражению от твердой стенки. Это легко объяснимо пониженной подвижностью (сильной инерцией) тяжелых частиц и тем, что при непрерывном описании дисперсной среды ее граница не отражает наличия отдельных гранул.

Для легких частиц на графике рис. 2(а) наблюдается особенность, связанная с усилением отраженной волны и разделением на две волны со скоростями больше и меньше скорости отраженной от слоя тяжелых частиц волны. Такое поведение, по-видимому, объясняется подвижностью легких частиц. Сначала гранулированный слой уплотняется, при этом образуется первая отраженная волна, имеющая скорость меньше «стандартной». Затем уже волна уплотнения гранулированной среды отражается от стенки и придает дополнительный импульс второй отраженной волне давления, которая в итоге догоняет и опережает первую волну. Подобная двухскоростная картина приводит к наблюдаемому на графике расширению волны. Также следует отметить, что подвижность частиц приводит и к увеличению амплитуды отраженных волн.

График, приведенный на рис. 2(б), следует в некоторой степени считать промежуточным случаем. Подвижность частиц еще недостаточна, чтобы образовать ярко выраженную повторную волну. Однако скорость отраженной волны оказывается повышенной, то есть дополнительный импульс волне давления в этом случае сообщается.

5. Заключение

В работе показано, что наличие слоя рыхлой гранулированной среды возле твердой поверхности приводит к отражению ударной волны, отличному от отражения от гладкой стенки. При этом характер отражения зависит от плотности вещества гранул, составляющих дисперсную среду. Также отмечено, что гранулы меньшей плотности приводят к большей амплитуде отраженной ударной волны, а также большей ее протяженности (сдвоенная волна).

Список литературы

- [1] Кедринский В.К. Ударные волны в жидкости с пузырьками газа // ФГВ. 1980. Т. 16, № 5. С. 14–25.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=29137129>
- [2] Parkin B.R., Gilmore F.R., Brode G.A. Shock waves in bubble 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] Britan A., Ben-Dor G., Shapiro H., Liverts M., Shreiber I. Drainage effects on shock wave propagating through aqueous foams // Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects. 2007. V. 309. Pp. 137–150.
[DOI: 10.1016/j.colsurfa.2007.01.018](https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2007.01.018)
- [5] Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Т. 1, 2. М.: Наука, 1987. 360 с., 464 с.
- [6] Федоров А.В., Федорченко И.А., Василишин М.С., Карпов А.Г., Иванов О.С. Расчет расширения слоя дисперсного материала при его импульсном псевдооживлении // ПМТФ. 2012. Т. 53, № 3. С. 105–116.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=17797436>
- [7] Михайленко К.И., Кулешов В.С. Математическое моделирование скоростной неравномерности потока газа за пористой преградой // Вычислительные технологии. 2015. Т. 20, № 6. С. 46–58.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=25408686>
- [8] Михайленко К.И., Валеева Ю.Р. Моделирование осаждения мелкодисперсной взвеси из воздуха при прохождении волн давления // Вычислительные методы и программирование: новые вычислительные технологии. 2013. Т. 14, № 1. С. 328–333.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=21014483>
- [9] Баширова К.И., Михайленко К.И. Трехмерное моделирование ударной трубы в пакете OpenFOAM // Вестник Башкирского университета. 2018. Т. 23, № 3. С. 621–626.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=36476517>



Shock wave reflection from a layer of a finely dispersed medium with low concentrations

Bashirova K.I.* , Mikhaylenko C.I.**

*Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia

**Mavlyutov Institute of Mechanics UFRC RAS, Ufa, Russia

The paper investigates the propagation of a shock wave when interacting with a loosely packed granular medium. The continuous two-phase mathematical model presented in this work allows one to numerically describe the propagation of a shock wave in the channel of a shock tube, the achievement of a layer of granular filling by the shock wave, and the reflection of the wave. It was shown that the granular medium partially transmits the shock wave, but mostly corresponds to it. This reflection differs from the reflection of a shock wave from a solid wall. The nature of the reflection of the shock wave depends on the density of the granules. In particular, it has been shown that a granular medium of lower density, due to the increased mobility of individual particles, leads to some amplification of the reflected wave. It is also shown that the reflected wave in this case forms two pronounced peaks. It should be noted that the pressure passed in the layer of the granular medium, on the contrary, turns out to be the greater, the heavier the particles of the granular medium.

Keywords: multiphase systems, granular media, shock waves, mathematical modeling, OpenFOAM

References

- [1] Kedrinskii V.K. Shock waves in a liquid containing gas bubbles // *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 1980. V. 16. No 5. C. 495-504.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=35463272>
- [2] Parkin B.R., Gilmore F.R., Brode G.A. Shock waves in bubble water. Memorandum RM-2795-PR. Abridged. 1961.
- [3] Gubajdullin A.A., Kutrunov A.V., Rustyumova O.Sh., Yakovleva T.N. [Some questions of the wave dynamics of a liquid with gas bubbles] *Nekotorye voprosy volnovej dinamiki zhidkosti s puzyr'kami gaza* // *Itogi issledovaniy. Tyumen*. 1994. Pp. 23–31.
- [4] Britan A., Ben-Dor G., Shapiro H., Liverts M., Shreiber I. Drainage effects on shock wave propagating through aqueous foams // *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*. 2007. V. 309. Pp. 137–150.
DOI: 10.1016/j.colsurfa.2007.01.018
- [5] Nigmatulin R.I. *Dynamics of Multiphase Media*. Vol 1 & 2. Hemisphere Publ. Corp New York, United States. 1990. 507 p.
- [6] Fedorov, A.V., Fedorchenko, I.A., Vasilishin, M.S., Karpov, A.G., Ivanov, O.S. Calculation of expansion of a packed bed of a disperse material subjected to pulsed fluidization // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2012. Vol. 53, No. 3. P. 397-407.
DOI: 10.1134/S0021894412030121
- [7] Mikaylenko C.I., Kuleshov V.S. Numerical modelling of inhomogeneity scale of a flow rate behind the porous barrier // *Computational Technologies*. 2015. V. 20, No 6. Pp. 46–58 (In Russian).
<https://elibrary.ru/item.asp?id=25408686>
- [8] Mikhaitenko C.I., Valeeva Yu.R. Highly dispersed medium sedimentation from air under pressure forces // *Numerical methods and programming*. 2013. V. 14, No 1. Pp. 328–333 (in Russian).
<https://elibrary.ru/item.asp?id=21014483>
- [9] Bashirova K.I., Mikhaylenko C.I. Three-dimensional simulation of a shock tube with OpenFOAM software // *Vestnik Bashkirskogo universiteta (Bulletin of Bashkir University)*. 2018. V. 23, No 3. Pp. 621–626 (in Russian).
<https://elibrary.ru/item.asp?id=36476517>