

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРОХОДЯЩЕЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ СО СЛОЕМ ЧАСТИЦ МЕТОДОМ ДЕКАРТОВЫХ СЕТОК*

Д. А. Сидоренко¹, П. С. Уткин²

Аннотация: Представлены результаты прямого численного моделирования задачи о взаимодействии скользящей ударной волны (УВ) со слоем подвижных и взаимодействующих частиц на непроницаемой поверхности. Математическая модель основана на двумерных уравнениях Эйлера, которые решаются в области с изменяющейся границей методом декартовых сеток. При описании движения цилиндрических частиц учитываются силы и моменты сил давления газа, а также контактные силы, возникающие при взаимодействии частиц. Для описания столкновений частиц используется стереомеханическая теория удара. Постановка задачи близка рассмотренной в работе Косински и Хоффмана (2005). В прямом моделировании получены эффекты опускания границы слоя частиц за УВ, деформации фронта падающей УВ, а также ее преломления и переотражения в слое, подъема частиц. Получена динамика изменения угловой скорости вращения частиц в количественном выражении, что может быть использовано для анализа влияния силы Магнуса на процесс подъема частиц за УВ.

Ключевые слова: численное моделирование; ударная волна; слой частиц; уравнения Эйлера; метод декартовых сеток; столкновения; угловая скорость

DOI: 10.30826/CE20130207

Литература

1. Борисов А. А., Любимов А. В., Козарко С. М., Козенко В. П. О неустойчивости поверхности сыпучей среды при скольжении по ней ударных и детонационных волн // *Физика горения и взрыва*, 1967. Т. 3. № 1. С. 149–151.
2. Бойко В. М., Папырин А. Н. О динамике образования газовзвеси за ударной волной, скользящей вдоль поверхности сыпучей среды // *Физика горения и взрыва*, 1987. Т. 23. № 2. С. 122–126.
3. Gerrard J. H. An experimental investigation of the initial stages of the dispersion of dust by shock waves // *Brit. J. Appl. Phys.*, 1963. Vol. 14. No. 4. P. 186–192. doi: 10.1088/0508-3443/14/4/306.
4. Fletcher B. The interaction of a shock with a dust deposit // *J. Phys. D Appl. Phys.*, 1976. Vol. 9. No. 2. P. 197–202. doi: 10.1088/0022-3727/9/2/009.
5. Klemens R., Zydak P., Kaluzny M., Litwin D., Wolanski P. Dynamics of dust dispersion from the layer behind the propagating shock wave // *J. Loss Prevent. Proc.*, 2006. Vol. 19. No. 2-3. P. 200–209. doi: 10.1016/j.jlp.2005.05.012.
6. Киселев С. П., Киселев В. П. Подъем частиц пыли за отраженной ударной волной, скользящей над слоем частиц // *Прикладная механика и техническая физика*, 2001. Т. 42. № 5. С. 8–15.
7. Korobeinikov V. P., Semenov I. V., Menshov I. S., Klemens R., Wolanski P., Kosinski P. Modelling of flow and combustion behind shock waves propagating along dust layers in long ducts // *J. Phys. IV*, 2002. Vol. 12. No. 7. P. 113–119. doi: 10.1051/jp4:20020273.
8. Федоров А. В., Федорова Н. Н., Федорченко И. А., Фомин В. М. Математическое моделирование подъема пыли с поверхности // *Прикладная механика и техническая физика*, 2002. Т. 43. № 6. С. 113–125.
9. Kosinski P., Hoffmann A. C., Klemens R. Dust lifting behind shock waves: Comparison of two modeling techniques // *Chem. Eng. Sci.*, 2005. Vol. 60. No. 19. P. 5219–5230. doi: 10.1016/j.ces.2005.04.035.
10. Kosinski P., Hoffman A. C. Modelling of dust lifting using the Lagrangian approach // *Int. J. Multiphas. Flow*, 2005. Vol. 31. P. 1097–1115. doi: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2005.07.003.
11. Khmel T., Fedorov A. Numerical simulation of dust dispersion using molecular-kinetic model for description of particle-to-particle collisions // *J. Loss Prevent. Proc.*, 2015. Vol. 36. P. 223–229. doi: 10.1016/j.jlp.2015.02.006.
12. Houim R. W., Oran E. S. A multiphase model for compressible granular-gaseous flows: Formulation and initial tests // *J. Fluid Mech.*, 2016. Vol. 789. P. 166–220. doi: 10.1017/jfm.2015.728.
13. Shimura K., Matsuo A. Two-dimensional CFD–DEM simulation of vertical shock wave-induced dust lifting pro-

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Москвы (проект № 19-38-70002).

¹ Институт автоматизации проектирования Российской академии наук, sidr1234@mail.ru

² Институт автоматизации проектирования Российской академии наук, pavel_utk@mail.ru

- cesses // *Shock Waves*, 2018. Vol. 28. No. 6. P. 1285–1297. doi: 10.1007/s00193-018-0848-7.
14. *Regele J. D., Rabinovitch J., Colonius T., Blanquart G.* Unsteady effects in dense, high speed, particle laden flows // *Int. J. Multiphas. Flow*, 2014. Vol. 61. P. 1–13. doi: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2013.12.007.
 15. *Бедарев И. А., Федоров А. В.* Прямое моделирование релаксации нескольких частиц за проходящими ударными волнами // *Инженерно-физический ж.*, 2017. Т. 90. № 2. С. 450–457.
 16. *Nourgaliev R. R., Dinh T. N., Theofanous T. G., Koning J. M., Greeman R. M., Nakafuji G. T.* Direct numerical simulation of disperse multiphase high-speed flows. AIAA Paper No. 2004-1284, 2004. doi: 10.2514/6.2004-1284.
 17. *Sen O., Gaul N. J., Choi K. K., Jacobs G., Udaykumar H. S.* Evaluation of kriging based surrogate models constructed from mesoscale computations of shock interaction with particles // *J. Comput. Phys.*, 2017. Vol. 336. P. 235–260. doi: 10.1016/j.jcp.2017.01.046.
 18. *Patankar N. A., Ko T., Choi H. G., Joseph D. D.* A correlation for the lift-off of many particles in plane Poiseuille flows of Newtonian fluids // *J. Fluid Mech.*, 2001. Vol. 445. P. 55–76. doi: 10.1017/S0022112001005274.
 19. *Schneiders L., Meinke M., Schroder W.* Direct particle–fluid simulation of Kolmogorov-length-scale size particles in decaying isotropic turbulence // *J. Fluid Mech.*, 2017. Vol. 819. P. 188–227. doi: 10.1017/jfm.2017.171.
 20. *Jiang M., Liu Z.* A boundary thickening-based direct forcing immersed boundary method for fully resolved simulation of particle-laden flows // *J. Comput. Phys.*, 2019. Vol. 390. P. 203–231. doi: 10.1016/j.jcp.2019.03.047.
 21. *Ugarte U. J., Houim R. W., Oran E. S.* Examination of the forces controlling dust dispersion by shock waves // *Phys. Rev. Fluids*, 2017. Vol. 2. No. 7. P. 074304. doi: 10.1103/PhysRevFluids.2.074304.
 22. *Сидоренко Д. А., Уткин П. С.* Численное моделирование релаксации тела за проходящей ударной волной // *Математическое моделирование*, 2018. Т. 30. № 11. С. 91–104.
 23. *Сидоренко Д. А., Уткин П. С.* Численное моделирование взаимодействия ударной волны с подвижным цилиндром // *Горение и взрыв*, 2018. Т. 11. № 3. С. 79–86. doi: 10.30826/CE18110310.
 24. *Sidorenko D. A., Utkin P. S.* Parallel computational algorithm of a Cartesian grid method for the simulating the interaction of a shock wave and colliding bodies // *Parallel computational technologies* / Eds. L. Sokolinsky, M. Zimbler. — Communications in computer and information science ser. — Springer, 2019. Vol. 1063. P. 323–334. doi: 10.1007/978-3-030-28163-2_23.
 25. *Goldsmith W.* Impact: The theory and physical behavior of colliding solids. — London: Edward Arnold, 1960. 379 p.
 26. *Chertock A., Kurganov A.* A simple Eulerian finite-volume method for compressible fluids in domains with moving boundaries // *Commun. Math. Sci.*, 2008. Vol. 6. No. 3. P. 531–556. doi: 10.4310/CMS.2008.v6.n3.a1.
 27. *Drikakis D., Ofengeim D., Timofeev E., Voionovich P.* Computation of non-stationary shock wave/cylinder interaction using adaptive-grid methods // *J. Fluid. Struct.*, 1997. Vol. 11. No. 6. P. 665–692. doi: 10.1006/jfls.1997.0101.
 28. *Sidorenko D., Utkin P., Boiko V.* 2019. Dynamics of motion of a pair of particles in a supersonic flow // 32nd Symposium (International) on Shock Waves Proceedings. — Singapore, 2019. P. 1753–1760. Paper No. OR-15-0049. doi: 10.3850/978-981-11-2730-4_0049-cd.
 29. *Suzuki T., Sakamura Y., Adachi T.* Experimental study on the initial mechanism of particle liftup by a shock passage // *T. Jpn. Soc. Aeronaut. S.*, 1995. Vol. 38. No. 121. P. 243–250.
 30. *Doi K., Men'shov I., Nakamura Y.* Numerical simulation of interaction between moving shock wave and solid particle layer. AIAA Paper No. 2002-3180. doi: 10.2514/6.2002-3180.

Поступила в редакцию 05.01.2020