

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ДЕТОНАЦИИ В ТРУБЕ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕСТРУКТУРИРОВАННЫХ РАСЧЕТНЫХ СЕТОК

А. И. Лопато¹, П. С. Уткин²

Аннотация: Разработан конечно-объемный вычислительный алгоритм второго порядка аппроксимации (ПА) для расчета двумерных течений с волнами детонации на полностью неструктурированных сетках с треугольными ячейками. С его использованием рассмотрена задача об инициировании и распространении детонации в осесимметричной трубе переменного сечения, заполненной стехиометрической водородно-воздушной смесью. Исследованы три конфигурации трубы, различающиеся степенью расширения трубы, с точки зрения давления, оказываемого волной детонации на торец трубы. Рассмотренная задача имеет отношение к проблеме утилизации отходов в установках, использующих детонационное сжигание топлива.

Ключевые слова: детонационная волна; неструктурированные расчетные сетки; математическое моделирование; труба переменного сечения

Литература

1. Левин В. А., Мануйлович И. С., Марков В. В. Инициирование и распространение многомерных волн детонации // Физика горения и взрыва, 2015. Т. 51. № 1. С. 47–56.
2. Semenov I., Utkin P., Akhmedyanov I. Mathematical modeling of detonation initiation via flow cumulation effects // Progress in propulsion physics. — EUCASS advances in aerospace sciences book ser. — Moscow: TORUS PRESS, 2016. Vol. 8. P. 389–406. doi: 10.1051/eucass/201608389.
3. Hu C., Shu C.-W. Weighted essentially non-oscillatory schemes on triangular meshes // J. Comput. Phys., 1999. Vol. 150. No. 1. P. 97–127. doi: 10.1006/jcph.1998.6165.
4. Figueira da Silva L. F., Azevedo J. L. F., Korzenowski H. Unstructured adaptive grid flow simulations of inert and reactive gas mixtures // J. Comput. Phys., 2000. Vol. 160. No. 2. P. 522–540. doi: 10.1006/jcph.2000.6470.
5. Togashi F., Lohner R., Tsuboi N. Numerical simulation of H₂/air detonation using unstructured mesh // Shock Waves, 2009. Vol. 19. No. 2. P. 151–162. doi: 10.1007/s00193-009-0197-7.
6. Shen H., Parsani M. The role of multidimensional instabilities in direct initiation of gaseous detonations in free space // J. Fluid Mech., 2017. Vol. 813. Paper R4. doi: 10.1017/jfm.2017.5.
7. Baklanov D., Desbordes D., Drobyshch V., Golovastov S., Golub V., Levin V., Mansurov Z., Markov V., Osinkin S., Thomas G., Vasil'ev A., Volodin V., Zhuravskaya T. The pulse detonation device and pirolitic technology for utilization of worn-out tires // 19th ICDERS Proceedings. — Nakone, Japan, 2003. Paper 8.
8. Левин В. А., Марков В. В., Журавская Т. А., Осинкин С. Ф. Определение критических условий распространения волн детонации в каналах сложной формы // Современные проблемы исследования быстропротекающих процессов и явлений катастрофического характера. — М.: Наука, 2007. С. 75–88.
9. Лопато А. И., Уткин П. С. Особенности математического моделирования течений с волнами детонации на неструктурированных расчетных сетках // Вычислительные методы и программирование, 2017. Т. 18. № 4. С. 348–358.
10. Khasainov B., Presles H.-N., Desbordes D., Demontis P., Vidal P. Detonation diffraction from circular tubes to cones // Shock Waves, 2005. Vol. 14. No. 3. P. 187–192. doi: 10.1007/s00193-005-0262-9.
11. Sorin R., Zitoun R., Khasainov B., Desbordes D. Detonation diffraction through different geometries // Shock Waves, 2009. Vol. 19. P. 11–23. doi: 10.1007/s00193-008-0179-1.
12. Gamezo V., Ogawa T., Oran E. Flame acceleration and DDT in channels with obstacles: Effect of obstacle spacing // Combust. Flame, 2008. Vol. 155. P. 302–315. doi: 10.1016/j.combustflame.2008.06.004.
13. Лопато А. И., Уткин П. С. Математическое моделирование пульсирующей волны детонации с использованием ENO-схем различных порядков ап-

¹Институт автоматизации проектирования Российской академии наук; Московский физико-технический институт, lopato2008@mail.ru

²Институт автоматизации проектирования Российской академии наук; Московский физико-технический институт, pavel.lutk@mail.ru

- проксимации // Компьютерные исследования и моделирование, 2014. Т. 6. № 5. С. 643–653.
14. *Chen G., Tang H., Zhang P.* Second-order accurate Go-

dunov scheme for multicomponent flows on moving triangular meshes // *J. Sci. Comput.*, 2008. Vol. 34. No. 1. P. 64–86. doi: 10.1007/s10915-007-9162-8.

Поступила в редакцию 16.01.18

MATHEMATICAL MODELING OF DETONATION PROPAGATION IN A TUBE WITH VARIABLE CROSS SECTION USING UNSTRUCTURED COMPUTATIONAL GRIDS

A. I. Lopato^{1,2} and P. S. Utkin^{1,2}

¹Institute for Computer Aided Design, Russian Academy of Sciences, 19/18 Brestskaya 2nd Str., Moscow 123056, Russian Federation

²Moscow Institute of Physics and Technology, 9 Institutsky Per., Dolgoprudny, Moscow Region 141700, Russian Federation

Abstract: The finite-volume computational algorithm of the second approximation order for the calculation of two-dimensional flows with detonation waves on fully unstructured meshes with triangular cells is developed. The problem of detonation initiation and propagation in an axisymmetric tube of variable cross section filled with the stoichiometric hydrogen–air mixture is considered. Three geometrical configurations of the tube are investigated, each with its own degree of the divergence of the tube in terms of the pressure produced by the detonation wave at the end wall of the tube. The problem solved relates to the problem of waste recycling in the devices based on the detonation combustion of the fuel.

Keywords: detonation wave; unstructured computational grids; mathematical modeling; tube with variable cross-section

References

1. Levin, V.A., I.S. Manuilovich, and V.V. Markov. 2015. Initiation and propagation of multidimensional detonation waves. *Combust. Explo. Shock Waves* 51(1):36–44. doi: 10.1134/S0010508215010037.
2. Semenov, I., P. Utkin, and I. Akhmedyanov. 2016. Mathematical modeling of detonation initiation via flow cumulation effects. *Progress in propulsion physics*. EUCASS advances in aerospace sciences book ser. Moscow: TORUS PRESS. 8:389–406. doi: 10.1051/eucass/201608389.
3. Hu, C., and C.-W. Shu. 1999. Weighted essentially non-oscillatory schemes on triangular meshes. *J. Comput. Phys.* 150(1):97–127. doi: 10.1006/jcph.1998.6165.
4. Figueira da Silva, L.F., J.L.F. Azevedo, and H. Korzenowski. 2000. Unstructured adaptive grid flow simulations of inert and reactive gas mixtures. *J. Comput. Phys.* 160(2):522–540. doi: 10.1006/jcph.2000.6470.
5. Togashi, F., R. Lohner, and N. Tsuboi. 2009. Numerical simulation of H₂/air detonation using unstructured mesh. *Shock Waves* 19(2):151–162. doi: 10.1007/s00193-009-0197-7.
6. Shen, H., and M. Parsani. 2017. The role of multidimensional instabilities in direct initiation of gaseous detonations in free space. *J. Fluid Mech.* 813. Paper R4. doi: 10.1017/jfm.2017.5.
7. Baklanov, D., D. Desbordes, V. Drobyshev, S. Golovastov, V. Golub, V. Levin, Z. Mansurov, V. Markov, S. Osinkin, G. Thomas, A. Vasil'ev, V. Volodin, and T. Zhuravskaya. 2003. The pulse detonation device and pirolitic technology for utilization of worn-out tires. *19th ICDERS Proceedings*. Hakone, Japan. Paper 8.
8. Levin, V.A., V.V. Markov, T.A. Zhuravskaya, and S.F. Osinkin. 2007. Opredelenie kriticheskikh usloviy rasprostraneniya voln detonatsii v kanalakh slozhnoy formy [Determination of the critical conditions of propagation of detonation waves in the channels of complex shape]. *Sovremennye problemy issledovaniya bystroprotekayushchikh protsessov i yavleniy katastroficheskogo kharaktera* [Modern problems of investigation of fast processes and catastrophic phenomena]. Moscow: Nauka. 75–88.
9. Lopato, A. I., and P. S. Utkin. 2017. Osobennosti matematicheskogo modelirovaniya techeniy s volnami detonatsii na nestrukturovannykh raschetnykh setkakh [Specific features of mathematical modeling of flows with detonation waves on unstructured computational grids]. *Numerical Methods Programming* 18(4):348–358.
10. Khasainov, B., H.-N. Presles, D. Desbordes, P. Dementis, and P. Vidal. 2005. Detonation diffraction from circular tubes to cones. *Shock Waves* 14(3):187–192. doi: 10.1007/s00193-005-0262-9.
11. Sorin, R., R. Zitoun, B. Khasainov, and D. Desbordes. 2009. Detonation diffraction through different geometries. *Shock Waves* 19:11–23. doi: 10.1007/s00193-008-0179-1.
12. Gamezo, V., T. Ogawa, and E. Oran. 2008. Flame acceleration and DDT in channels with obstacles: Effect of obstacle spacing. *Combust. Flame* 155:302–315. doi: 10.1016/j.combustflame.2008.06.004.
13. Lopato, A. I., and P. S. Utkin. 2014. Matematicheskoe modelirovanie pul'siruyushchey volny detonatsii s ispol'zovaniem ENO-skhem razlichnykh poryadkov aproksimatsii [Mathematical modeling of pulsating detona-

tion wave using ENO-schemes of different approximation orders]. *Computer Research Modeling* 6(5):643–653.

14. Chen, G., H. Tang, and P. Zhang. 2008. Second-order

accurate Godunov scheme for multicomponent flows on moving triangular meshes. *J. Sci. Comput.* 34(1):64–86. doi: 10.1007/s10915-007-9162-8.

Received January 16, 2018

Contributors

Lopato Alexander I. (b. 1991) — junior research scientist, Institute for Computer Aided Design, Russian Academy of Sciences, 19/18 Brestskaya 2nd Str., Moscow 123056, Russian Federation; assistant, Moscow Institute of Physics and Technology, 9 Institutsky Per., Dolgoprudny, Moscow Region 141700, Russian Federation; lopato2008@mail.ru

Utkin Pavel S. (b. 1985) — Candidate of Science in physics and mathematics, senior research scientist, Institute for Computer Aided Design, Russian Academy of Sciences, 19/18 Brestskaya 2nd Str., Moscow 123056, Russian Federation; associate professor, Moscow Institute of Physics and Technology, 9 Institutsky Per., Dolgoprudny, Moscow Region 141700, Russian Federation; pavel_utk@mail.ru