

УДК 519.6

Численное моделирование взрывов в воздухе с выделением ударной волны

Веселова Е. А., Дерюгин Ю. Н., Зеленский Д. К., Ктиторов В. М.

ФГУП «РФЯЦ - ВНИИЭФ»

Аннотация: В работе представлена параллельная методика расчета двумерных задач газовой динамики на геометрически адаптивных неструктурированных сетках. Подобный подход позволяет значительно снизить вычислительную сложность алгоритмов за счёт детализированного моделирования особенностей ударной волны. Методика применена к решению нескольких задач имеющих аналитическое решение, на которых показала высокую эффективность и достоверность результатов.

Ключевые слова: численные методы, газовая динамика, геометрически адаптивные неструктурированные сетки, ударная волна.

В ряде приложений возникает необходимость моделировать ударную волну на больших временах и расстояниях от места взрыва, когда на форму и скорость ударной волны влияют различные факторы [1–5]. В принципе, расчет распространения ударных волн возможен по любому многомерному газодинамическому коду. Однако в большинстве созданных кодов, расчет ударных волн проводится «сквозным» методом, который требует либо построения сеточной модели для всей области распространения волны, либо разработке специализированных алгоритмов адаптации сетки к области, где находится волна. Все это приводит к большим затратам вычислительных ресурсов. В работах [6, 7] был развит подход, основанный на выделении ударной волны в сочетании с адаптивной сеткой, подстраиваемой под ее движение. На основе такого подхода был создан ряд двумерных и трехмерных расчетных методик на блочных структурированных сетках.

В данной работе представлена параллельная методика расчета двумерных задач газовой динамики на геометрически адаптивных неструктурированных сетках. Геометрическая адаптация связана с выделением в решении основных особенностей, таких как ударные волны и контактные разрывы. Скорость движения разрывов и параметры на разрывах определяются из решения задачи Римана о распаде разрыва. Смещение внутренних узлов сетки определяется методом интерполяции по смещению граничных узлов. Разностные уравнения получены дискретизацией исходных уравнений в интегральной форме квадратурными формулами прямоугольников. При решении уравнений Эйлера численные конвективные потоки определяются на основе решения задачи о распаде разрыва. Для повышения точности моделирования предраспадные параметры потока определяются с использованием линейной либо квадратичной реконструкции решения. В задачах со сферической симметрией с целью уменьшения немоноктонности в численном решении применяется алгоритм доворота вектора скорости у предраспадных параметров потока. Методики реализованы в рамках параллельного пакета программ ЛОГОС [3]. Расчетная методика проверена на ряде тестовых и модельных задач принятых, для тестирования двумерных методик [4, 5].

Возможности методики иллюстрируются на трех задачах. В первой задаче рас-

считается распространение ударной волны от мгновенного взрыва сферического заряда ВВ на большие расстояния. Для близких расстояний результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментальными данными, представленными в [8]. Для больших расстояний получена аппроксимационная зависимость избыточного давления от пройденного расстояния. Определена структура потока за волной, которая с некоторого расстояния принимает универсальную форму N-волны.

Во второй задаче численно исследуется развитие двумерных возмущений в сильном взрыве. Такая задача рассматривалась в работах [3, 4], где для идеального газа построено автомодельное решение и показано, что при значениях показателя адиабаты газа, близких к единице, на фронте волны реализуется неустойчивость типа Релея-Тейлора [3]. В работе [4] был найден критерий устойчивости и определены инкременты наиболее быстро растущих гармоник. По созданной методике были проведены расчеты эволюции двумерных возмущений для различных гармоник и показателей адиабаты. Результаты расчетов сравниваются с автомодельным решением из работы [4]. Отмечается хорошее согласование результатов численных расчетов с аналитическим решением.

В третьей задаче численно исследуется искривление фронта ударной волны, распространяющейся по среде, включающей канал из другого вещества. Для такой задачи в работе [5] на основе автомодельного решения было построена зависимость коэффициента возмущения фронта волны в канале. Численно были проведены расчеты модельной задачи об искривлении фронта волны при вариации плотности вещества в канале. Результаты расчетов сравниваются с аналитическим решением из работы [5]. Здесь также отмечается хорошее согласование результатов численных расчетов с аналитическим решением.

Литература

1. Броуд Г. Сб. Механика № 3. Расчеты взрывов на ЭВМ. Подземные взрывы. М.: Мир, 1975-164с.
2. Зайдель Р.М. Влияние начальной разноплотности на движение ударной волны // Изв. АН. СССР, МЖГ. 1968. 4. 152-162.
3. Vishiac E.T. Astrophysics J. 1983. 278. 1071.
4. Ктиторov В.М. ВАНТ. Сер. ТиПФ. 1984г. №2(2). 28.
5. Ктиторov В.М. Движение ударной волны в присутствии слабо выделенного канала // ВАНТ. Сер. ТиПФ. 1990. №2(2). С. 10-11.
6. Годунов С.К., Забродин А.В., Прокопов Г.П. Разностная схема для двумерных нестационарных задач газовой динамики и расчет обтекания с отошедшей ударной волной // ЖВМиМФ. 1, 36. 1020-1050.
7. Годунов С.К., Забродин А.В., Иванов М.Я., Крайко А.Н., Прокопов Г.П. Численное решение многомерных задач газовой динамики. М.: Наука, 1976. 400 с.
8. Физика взрыва. Том 1. Под редакцией Л.П. Орленко. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. 824 с.

MSC 76D05, 76M12

Numerical simulation of explosions in the air with the release of a shock wave

E. A. Veselova, Yu. N. Deryugin, D. K. Zelensky, V. M. Ktitorov

FSUE «RFNC - VNIIEF»

Abstract: The paper presents a parallel method for calculating two-dimensional problems of gas dynamics on geometrically adaptive unstructured grids. This approach makes it possible to significantly reduce the computational complexity of algorithms due to detailed modeling of shock wave features. The technique is applied to solving several problems with an analytical solution, on which it has shown high efficiency and reliability of the results.

Keywords: numerical methods, gas dynamics, geometrically adaptive unstructured grids, shock wave.

References

1. G. Broad, *Sat. Mechanics* No. 3. Calculations of explosions on a computer. Underground explosions, Moscow, Mir, 1975, 164 p.
2. R.M. Zaidel, The effect of the initial density difference on the motion of the shock wave, *Izv. A.N.SSSZR, MZhG*, 1968, 4, P. 152-162.
3. E.T. Vishiac, *Astrophysics J.*, 1983, 278, 1071.
4. V.M. Ktitorov, *VANT, Ser. TiPF*, 1984, No. 2(2), 28.
5. V.M. Ktitorov, Shock wave motion in the presence of a weakly isolated channel, *VANT, Ser. TiPF*, 1990, No. 2(2), P. 10-11.
6. S.K. Godunov, A.V. Zabrodin, G.P. Prokopov, Difference scheme for two-dimensional unsteady problems of gas dynamics and calculation of flow with a receding shock wave, *ZHVMIMF*, 1, 36 1020-1050.
7. S.K. Godunov, A.V. Zabrodin, M.Ya. Ivanov, A.N. Kraiko, G.P. Prokopov, Numerical solution of multidimensional problems of gas dynamics, M., Nauka, 1976, 400 p.
8. Explosion physics, Volume 1, Edited by L.P. Orlenko, M., FIZMATLIT, 2002, 824 p.