

УДК 519.6

Методы численного моделирования многомерных газодинамических течений, используемые во ВНИИЭФ

Приводится краткий обзор подходов к конструированию методов математического моделирования двумерных и трехмерных газодинамических течений, используемых во ВНИИЭФ.

**В. Ф. Спиридонов, С. М. Бахрах,
С. В. Величко, В. И. Делов,
Ю. В. Янилкин, С. С. Соколов,
О. И. Бутнев, А. М. Стенин,
В. В. Змушко, Б. Л. Воронин,
А. Н. Быков**

Введение

Областью применения разрабатываемых во ВНИИЭФ газодинамических методик является расчет многомерных нестационарных течений неоднородной сплошной среды с учетом разнообразных физических процессов: газодинамики, упругопластичности, вязкости, детонации ВВ, чистой теплопроводности и др.

Характерными особенностями моделируемых задач являются наличие в изучаемых системах многих веществ и большие деформации контактных границ между ними.

Численное моделирование таких течений, особенно в трехмерном случае, как известно, сопряжено с большими трудностями. Эти трудности порождаются двумя противоречивыми требованиями к численным методикам: возможностью расчета течений с большими деформациями контактных границ в "безавостном" режиме (что особенно важно при проведении расчетов в многопроцессорном режиме) и необходимостью обеспечения высокой (диктуемой конкретными прикладными задачами) точности расчетов.

Разнообразие подходов к преодолению этих трудностей, на основе компромисса между точностью и "безавостностью", привело к созданию во ВНИИЭФ ряда различных конечно-разностных методов и методик, отличающихся типами используемых счетных сеток (регулярных, нерегулярных, лагранжевых, лагранжево-эйлеровых и эйлеровых) и методов выделения контактных границ.

Методики ДМК [1] и МЕДУЗА [2] базируются на использовании неструктурированных лагранжевых сеток. В методике МЕДУЗА существует возможность изменения топологии сетки

в процессе решения задач (в том числе и в окрестности контактных границ) и соответствующего пересчета величин согласно конвективным потокам.

В регулярной лагранжевой методике Д [3, 4] используется локальная коррекция фрагментов лагранжевой сетки при больших деформациях средствами автоматического исправления "плотных" точек трехмерной лагранжевой сетки и пересчета сеточных величин на исправленную сетку. При исправлении точек на границах раздела различных веществ используется методика расчета "смешанных" ячеек, основанная на введении адаптивных сеток в ячейках, содержащих несколько веществ.

В ряде методик ВНИИЭФ, использующих регулярную счетную сетку, часть (или все) контактных поверхностей со сложной топологической структурой или сильно деформируемых в процессе счета рассчитывается на сетке, линии которой с ними не совпадают. Такие расчеты производятся с помощью разработанного во ВНИИЭФ метода концентраций [5] для расчета появляющихся в этом случае так называемых "смешанных" ячеек. Такой подход используется в эйлеровых методиках ЭГАК [5] и ТРЭК [6], лагранжево-эйлеровых методиках ЛЭГАК-2D [7,8,9] и ЛЭГАК-3D [10], МИМОЗА [11,12], РАМЗЕС-КП [13,14]. Реализация метода концентраций в перечисленных методиках отличается моделями и алгоритмами расчета смешанных ячеек на лагранжевом и эйлеровом (расчет конвективных потоков величин) этапах. Так, например, в методике РАМЗЕС-КП используется алгоритм локализации контактной границы внутри счетной ячейки, предложенный Янгсом [15]. Кроме того, перечисленные методики отличаются топологией используемых регулярных сеток и конечно-разностными схемами. Алгоритмы, присущие методу концентраций, используются также и в нерегулярной методике МЕДУЗА.

Для повышения точности разностной аппроксимации конвективных потоков однородного вещества на эйлеровом этапе вычислений в методиках, использующих регулярную счетную сетку, широкое распространение получил метод РРМ [16] и его модификации. Такой подход в сочетании с методом концентраций в "смешанных" ячейках используется в методиках ЭГАК, ТРЭК, ЛЭГАК, РАМЗЕС-КП. В методике МИМОЗА используется модифицированный метод предельной линейной реконструкции.

Среди подходов "подсеточного" описания контактных границ, развиваемых во ВНИИЭФ, следует назвать метод адаптивных дробных сеток, используемый, например, в методике ЭГАК++ [17], и метод явного выделения контактных границ, не совпадающих с линиями регулярной счетной сетки – метод выделения контактных линий [18], развиваемый в настоящее время в рамках методике ЛЭГАК. В методе адаптивных дробных сеток вводится более подробная (чем основная) счетная сетка в окрестности контактных границ и других особенностей решения. Метод выделения контактных границ как линий, движение которых рассчитывается особым образом, восходит к работам Ноха [19]. Точки, описывающие контактные границы, расположены независимо от точек счетной сетки.

Еще одним подходом к конструированию численных алгоритмов во ВНИИЭФ является реализация дискретного метода сглаженных частиц (методика SPH) [20].

Список литературы

1. Sofronov I. D., Rasskasova V. V., Nesterenko L. V. The Use of Nonregular Nets to Solving Two-Dimensional Nonstationary Problems in Gas Dynamics // Numerical Methods in Fluid Dynamics; ed Yanenko N. N., Shokin Yu. I., M.: Mir, 1984, P. 82–121.

2. Глаголева Ю. П., Жогов Б. М., Софронов И. Д. и др. Основы методики Медуза численного расчета двумерных нестационарных задач газодинамики // Численные методы механики сплошной среды. 1972. Т. 3, № 2.
3. Дмитриев Н. А., Дмитриева Л. В., Малиновская Е. В., Софронов И. Д. Методика расчета нестационарных двумерных задач газовой динамики в лагранжевых переменных // Теоретические основы и конструирование численных алгоритмов задач математической физики, Под ред. Бабенко К. И. М.: Наука. 1979. С. 175–200.
4. Артемьев А. Ю., Делов В. И., Дмитриева Л. В. Методика расчета трехмерных нестационарных задач газодинамики в переменных Лагранжа // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 1989. Вып. 1. С. 30–39.
5. Бахрах С. М., Глаголева Ю. Г., Самигулин М. С. и др. Расчет газодинамических течений на основе метода концентраций // ДАН. 1981. Т. 257, № 3. С. 566–569.
6. Yanilkin Yu. V., Tarasov V. I., Stadnik A. L. et al. Program System TREK for Numerical Simulation of 3D Multi-component Medium Flows // Proceedings of workshop "New Models and Numerical Codes for Shock Wave Processes in Condensed Media". Oxford. 1997. P. 413–422.
7. Бахрах С. М., Спиридонов В. Ф., Шанин А. А. Метод расчета газодинамических течений неоднородной среды в лагранжево-эйлеровых переменных // ДАН СССР. 1984. Т. 276, № 4. С. 429–433.
8. Бахрах С. М., Спиридонов В. Ф. Метод концентраций расчета нестационарных течений сплошной среды // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 1999. Вып. 4. С. 32–36.
9. Бахрах С. М., Величко С. В., Спиридонов В. Ф. Безавостная технология расчета течений сплошной среды по методике ЛЭГАК на многопроцессорных ЭВМ // Там же. 2003. Вып. 3. С. 14–21.
10. Бахрах С. М., Величко С. В., Спиридонов В. Ф. и др. Методика ЛЭГАК–3D расчета трехмерных нестационарных течений многокомпонентной сплошной среды и принципы ее реализации на многопроцессорных ЭВМ с распределенной памятью // Там же. 2004. Вып. 4. С. 41–50.
11. Софронов И. Д., Афанасьева Е. А., Винокуров О. А., Воропинов А. И. и др. Комплекс программ МИМОЗА для решения двумерных и трехмерных задач газовой динамики // Сб. научных трудов под ред. Г.П. Воскресенского, В.В. Забродина. Конструирование алгоритмов и решение задач математической физики. М.: ИПМ АН СССР. 1989. С. 277–303.
12. Змушко В. В., Плетенев Ф. А., Сараев В. А., Софронов И. Д. Методика решения трехмерных уравнений газовой динамики в смешанных лагранжево-эйлеровых координатах // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Методики и программы численного решения задач математической физики. 1988. Вып. 1. С. 22–27.
13. Воронин Б. Л., Скрыпник С. И., Софронов И. Д. Эйлерово-лагранжева методика численного решения трехмерных нестационарных задач газовой динамики с учетом теплопроводности // Там же. 1988. Вып. 3. С. 3–8.
14. Софронов И. Д., Воронин Б. Л., Скрыпник С. И., Быков А. Н., Козуб А. Г. Методика и комплексы программ РАМЗЕС, РАМЗЕС-КП // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 1999. Вып. 4.
15. Youngs D. L. Time dependent Multi-material flow with large distortion // Numerical Methods for Fluid Dynamics. Ed. By K. W. Morton and I. H. Baines. Academic Press. 1982.

16. Woodward P., Colella Ph. The numerical simulation of two-dimensional fluid flow with strong shocks // Journal of Computational Physics 1984. Vol. 54, № 1. P. 115–173.
17. Yanilkin Yu. V., Belyaev S. P., Tarasov V. I. et al. Adaptation of the EGAK code for numerical simulations of 2d flows with adaptive built-in refined computational mesh. – Physical model and code development for deflagration, deflagration-to-detonation transition and detonation of hydrogen containing mixtures // ISTC- Project #436-97. Proceeding of the Project Meeting, held at the GRS, Cologne-Germany. May 17–19. 2000.
18. Стенин А. М., Бондаренко Ю. А., Матвеев Ю. М., Сараев В. А., Трофимова Л. Я. Методика расчета газодинамических течений с выделением контактных границ между веществами, не совпадающих с линиями сетки // Харитоновские научные чтения. Международный семинар "Супер-вычисления и математическое моделирование": Тезисы докладов / ВНИИЭФ. Саров. 1998.
19. Нох В.Ф. СЭЛ – совместный эйлерово-лагранжев метод для расчета нестационарных двумерных задач // Вычислительные методы в гидродинамике. М.: Мир. 1967. С. 128–184. Fundamental Methods in Hydrodynamics. Academic Press. 1964. Vol. 3.
20. Башуров В. В., Пятянина А. В. Численный метод сглаженных частиц в трехмерной постановке для моделирования физических процессов на примере задач столкновений и пробивания // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 1998. Вып. 4.

Numerical Simulation Methods for Multidimensional Gas Dynamic Flows Used at VNIIEF

V. F. Spiridonov, S. M. Bakhrakh, S. V. Velichko, V. I. Delov, Yu. V. Yanilkin,
S. S. Sokolov, O. I. Butnev, A. M. Stenin, V. V. Zmushko, B. L. Voronin,
A. N. Bykov

The paper includes a brief overview of approaches to designing numerical simulation methods for 2D and 3D gas dynamic flows used at VNIIEF.