

ПРЯМОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЛАКСАЦИИ МИКРОННЫХ ЧАСТИЦ ЗА ПРОХОДЯЩЕЙ УДАРНОЙ ВОЛНОЙ

И.А. Бедарев, А.В. Федоров

*Институт теоретической и прикладной механики
им. С.А. Христиановича СО РАН
630090, г. Новосибирск, Россия.*

Построение математических моделей механики реагирующих/инертных гетерогенных сред требует точного представления о локальных параметрах поля течения, возникающего при взаимодействии газовой фазы и мелких частиц дискретной фазы [1]. При моделировании прохождения ударной волны через облако частиц скоростная и тепловая релаксация определяется значениями таких характеристик, как коэффициенты сопротивления и теплообмена, которые в свою очередь сильно зависят от режима обтекания частиц в облаке.

Задача о взаимодействии ударных и детонационных волн с облаками инертных/реагирующих частиц в основном исследуется в приближении континуальных или дискретно-континуальных моделей. Детальному изучению газодинамики процесса на микроуровне посвящено несколько работ. В частности, в [2] был сформулирован качественно критерий существования коллективной волны перед совокупностью частиц в виде выполнения требования о смыкании дозвуковых зон перед ними. Были даны также некоторые оценки данного явления, основанные на численных данных в задаче об обтекании тел несферической формы. В [3] представлены результаты исследования динамики и физических условий формирования коллективного головного скачка перед сферами с линией центров, расположенной поперек сверхзвукового потока за проходящей ударной волной. В экспериментах зарегистрированы два типа ударно-волновых структур, с необходимостью предшествующих установлению общего скачка и соответствующих регулярному и Маховскому отражению головных скачков каждой сферы друг от друга. На основании локальной теории интерференции газодинамических разрывов определены количественные критерии существования этих режимов и перехода их в общий головной скачок. Полученные критерии подтверждены в серии экспериментов на переходных режимах. В [4] в двумерной постановке проведено моделирование воздействия проходящей ударной волны на совокупность частиц. Основное внимание в этой работе уделено сравнению данных, полученных в различных столкновительных моделях течения газозвесей. Показано, что влияние газодинамических сил на столкновение крупных (диаметром 1 мм) частиц незначительно, по сравнению с влиянием сил столкновения. Учет наличия индивидуальной ударной волны в потоке взаимодействующих континуумов был осуществлен, например, в [5], где показано влияние режима обтекания на время задержки воспламенения частицы угля. В [6] выявлены три типа движения микронных частиц в поле течения воздуха и продуктов детонации в ближней зоне при взрыве взрывчатого вещества. В частности показано, что крупные частицы (25 мкм) могут опережать ударную волну.

В [7] представлено численное моделирование распространения ударной волны в воздухе над частицей и массивом частиц алюминия для чисел Маха до 10. Особенностью математической модели и численного алгоритма является то, что проводился сквозной расчет в газовой фазе и внутри частиц. Вычисляется нестационарный коэффициент лобового сопротивления в зависимости от времени и показано, что максимальный коэффи-

ент сопротивления уменьшается с увеличением числа Маха. Представлены результаты для массива частиц. Показано, что по мере прохождения ударной волны, она усиливается на каждой последующей частичке и возрастает максимум коэффициента сопротивления. Приведен нормализованный коэффициент сопротивления для последней частицы в зависимости от расстояния между частицами для двух чисел Маха. Показано существование расстояния между частицами, где величина нормализованного коэффициента сопротивления является максимальной.

В [8] проведено 2-D моделирование взаимодействия между ударной волной и плотным облаком дисперсной фазы. Частицы считаются неподвижными. Рассмотрены различные варианты распределения частиц в облаке. Показана важность многомерных эффектов и необходимость проверки результатов в 3-D постановке. Показано существование проходящей, отраженной УВ и веера волн разряжения в облаке частиц. Контактный разрыв образуется на задней кромке облака, когда ударная волна выходит из облака. Этот разрыв имеет конечную ширину и не является контактный разрыв в обычном смысле. 2-D моделирование демонстрирует сильные нестационарные эффекты. Показано, что внутри облака частиц и за ним незамкнутые напряжения Рейнольдса в уравнении импульса сравнимы со статическим давлением. Кинетической энергия турбулентности в этой области равна по величине кинетической энергии потока. Показано, что при построении точечных осредненных (континуальных) моделей нельзя пренебрегать в уравнениях незамкнутым членом Рейнольдсовых напряжений при моделировании плотных состояний дискретной фазы. Это позволяет правильно описать положение проходящей и отраженной ударных волн, но градиент давления внутри и на выходе из облака частиц рассчитывается неправильно.

Интересный многомасштабный подход для вычисления динамики многофазных потоков под действием УВ разработан в [9]. Исследована эволюция облака частиц, показано влияние на движение облака газодинамического взаимодействия частиц. Данные о силах, действующих на частицы в облаке, полученные путем прямого моделирования с помощью невязкого подхода, переданы искусственной нейронной сети (ИНС). Обученная ИНС используется для моделирования поведения на макро-масштабе потока запыленного газа под воздействие УВ. Данная модель предсказывает некоторые данные о движении частиц и другие явления в согласии с экспериментальными наблюдениями.

Целью настоящей работы было численное изучение количественных характеристик взаимодействия проходящей ударной волны с системой тел для определения влияния режима обтекания на коэффициент сопротивления, время тепловой и скоростной релаксации частиц. В качестве математической модели использовались осредненные по Фавру нестационарные уравнения Навье-Стокса, дополненные SST модификацией $k-\omega$ модели турбулентности и уравнением состояния идеального газа. Для аппроксимации по времени задействована неявная схема второго порядка, а для аппроксимации по пространству невязких потоков использована схема расщепления AUSM третьего порядка точности. В двумерных нестационарных расчетах использовалась четырехугольная сетка, которая сгущалась к поверхности тела и динамически адаптировалась по градиенту плотности к газодинамическим особенностям течения (ударным волнам, контактными разрывам, волнам разрежения). При построении сетки контролировался параметр y^+ на поверхности частицы, который во всех расчетах не превышал единицы.

Решена задача об обтекании системы неподвижных и релаксирующих частиц при их продольном и поперечном взаимном расположении. Рассчитана волновая картина взаимодействия проходящей ударной волны с поперечно и продольно расположенными частицами в различные моменты времени. Показано, что при поперечном расположении частиц режим обтекания слабо влияет на коэффициент сопротивления, а при продольном

расположение взаимное влияние частиц сохраняется вплоть до 20 калибров. Оценки времени скоростной и тепловой релаксации частиц в зависимости от числа Рейнольдса показали, что основной прогрев частицы будет происходить на дозвуковом участке относительной скорости и после окончания этапа скоростной релаксации.

В рамках пакета инженерного анализа ANSYS Fluent с применением решателя 6DOF создана вычислительная технология прямого численного моделирования скоростной и тепловой динамики массива частиц. Выполнен расчет движения двух и трех частиц под воздействием проходящей ударной волны. Для учета столкновений использована модель упругого взаимодействия частиц. На рис. 1 показана динамика трех частиц при прохождении ударной волны с числом Маха 3. Представлены экспериментальные теневые снимки [10] и расчетные поля плотности и изолинии давления в различные моменты времени. Сравнение картин показывает хорошее качественное согласование результатов.

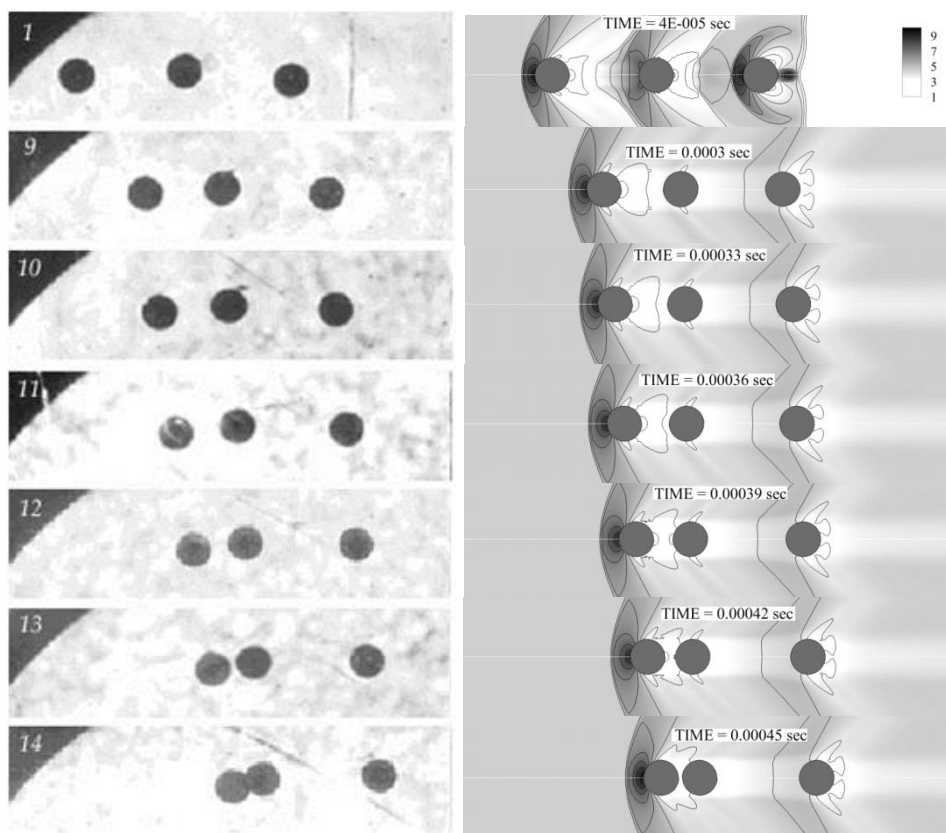


Рис. 1 Экспериментальные и расчетные поля плотности и изолинии давления

На рис. 2 представлены экспериментальные (1, 2) и расчетные (3, 4) траекторные характеристики в виде изменений расстояний между частицами от времени для первой и второй (1, 3) и второй и третьей (2, 4). Сопоставление расчетных и экспериментальных данных [10] показывает хорошее их соответствие.

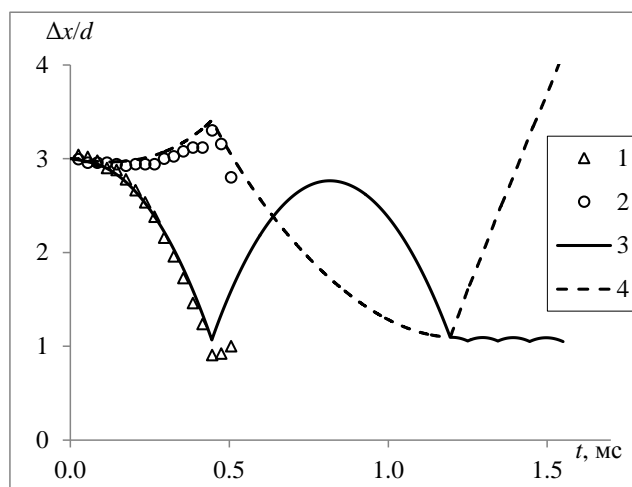


Рис. 2 Изменение расстояния между частицами от времени для первой и второй (1, 3) и второй и третьей (2, 4) 1, 2 – эксперимент, 3, 4 – расчет

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 15-08-01947, № 15-08-01723, Министерства образования и науки РФ, проект № 211, ЗАДАНИЕ № 2014/140.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федоров А.В., Фомин В.М., Гостеев Ю.А. Динамика и воспламенение газозвесей. НГТУ, 2006. С. 342.
2. Благосклонов В.И., Кузнецов В.М., Минайлос А.Н., Стасенко А.Л., Чеховский В.Ф. О взаимодействии гиперзвуковых неоднородных течений // ПМТФ. 1979. №5. С.59-67
3. Бойко В.М., Клинов К.В., Поплавский С.В. Коллективный головной скачок перед поперечной системой сфер в сверхзвуковом потоке за проходящей ударной волной // Известия РАН. МЖГ. 2004. № 2. С.183-192.
4. Nourgaliev R.R., Dinh T.N., Nguyen L., Theofanous T.G. Treatment of Particle Collisions in Direct Numerical Simulations of High Speed Compressible Flows // Proceedings of an IUTAM Symposium on Computational Approaches to Disperse Multiphase Flow, S.Balachandar and A.Prospertti (eds), Springer, pp.247-259, Dordrecht, 2006.
5. Федоров А. В., Хмель Т. А. Математическое моделирование гетерогенной детонации угольной пыли в кислороде с учетом стадии воспламенения // ФГВ. 2005. № 1. С. 89-99
6. Федоров А.В., Тетенев Е.В., Вессьер Б. Воспламенение газозвеси частиц металлов при реальном взрыве. // Физика горения и взрыва. 1991. Т. 27. № 5. С. 16–28.
7. P. Sridharan, T. L. Jackson, J. Zhang, and S. Balachandar. Shock interaction with one-dimensional array of particles in air // Journal of Applied Physics 117, 2015.
8. J.D. Regele, J. Rabinovitch, T. Colonius, G. Blanquart Unsteady effects in dense, high speed, particle laden fows // International Journal of Multiphase Flow 61, 2014, pp. 1–13.
9. Lu , S. Sambasivan , A. Kapahi, and H. S. Udaykumar Multiscale modeling of shock interaction with a cloud of particles using an artificial neural network for model representation // Proceeding IUTAM 3, 2012, pp. 25–52.
10. V. M. Boiko, K. V. Klinkov, S. V. Poplavski On a mechanism of intraphase interaction in non-relaxing two-phase flow // 11th International Conference on Methods of Aerophysical Research ICMAR'2002: Proceedings, 28 June - 3 July 2004, Russia, Novosibirsk. -Novosibirsk, 2002.- С.24-27