

Численное моделирование обтекания системы тел за проходящей ударной волной*

И.А. БЕДАРЕВ

А.В. ФЕДОРОВ

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН

e-mail: bedarev@itam.nsc.ru, fedorov@itam.nsc.ru

Численно промоделировано прохождение ударной волны сквозь систему цилиндров и сфер. Изучены режимы обтекания системы тел сверхзвуковым потоком за ударной волной. Проведен параметрический анализ изучаемого явления. Получена карта режимов в зависимости от числа Маха набегающего потока и расстояния между телами.

Введение. Для построения математических моделей механики гетерогенных сред важно знать локальные характеристики взаимодействия газовой фазы и частиц, составляющих твердую фазу. При прохождении ударной волны через облако частиц такие локальные характеристики, как сопротивление частицы, ее теплообмен с окружающей средой будут зависеть от того, является ли скорость обтекания до- или сверхзвуковой. Режим обтекания частиц будет зависеть от того, сформировался ли коллективный скачек перед облаком частиц или частицы обтекаются индивидуально [1], [2]. Целью работы было изучение взаимодействия проходящей ударной волны с системой неподвижных тел, а также исследование различных режимов обтекания этой системы сверхзвуковым потоком за проходящей ударной волной. Моделирование выполнено в расчетном пакете ANSYS Fluent. Использована математическая модель осредненных по Фавру уравнений Навье-Стокса, дополненная SST модификацией $k - \omega$ модели турбулентности. Решено несколько смежных задач:

- 1) расчет прохождения ударной волны сквозь решетку поперечно расположенных цилиндров в двумерной постановке при различных числах Маха и различных расстояниях между цилиндрами;
- 2) сверхзвуковое обтекание системы из поперечно расположенных цилиндров в двумерной постановке при различных числах Маха и различных расстояниях между цилиндрами;
- 3) сравнение сверхзвукового обтекания поперечно расположенного цилиндра и сферы в двумерной постановке и сравнение невязкого и вязкого обтекания сверхзвуковым потоком сферы;
- 4) сверхзвуковое обтекание системы из сфер в трехмерной постановке при различных числах Маха и различных расстояниях между сферами.

1. Расчет прохождения ударной волны сквозь решетку поперечно расположенных цилиндров в двумерной постановке. В двумерных нестационарных расчетах использовалась четырехугольная сетка, которая сгущалась к поверхности тела

*Работа выполнена при поддержке АВЦП РНП ВШ (проект 2.1.1/11316) и Программ специализированных отделений РАН.

и динамически адаптировалась по градиенту плотности к газодинамическим особенностям течения.

На рис. 1 показано прохождение ударной волны с числом Маха $M_0 = 3$ (за ударной волной число Маха $M_1 = 1.36$) через "решетку" цилиндров. Шаг "решетки" $\lambda = l/d = 10$. Приведены поля статического давления в различные моменты времени. Сплошной линией на рисунке выделена звуковая линия. Верхняя и нижняя граница области являются линиями симметрии.

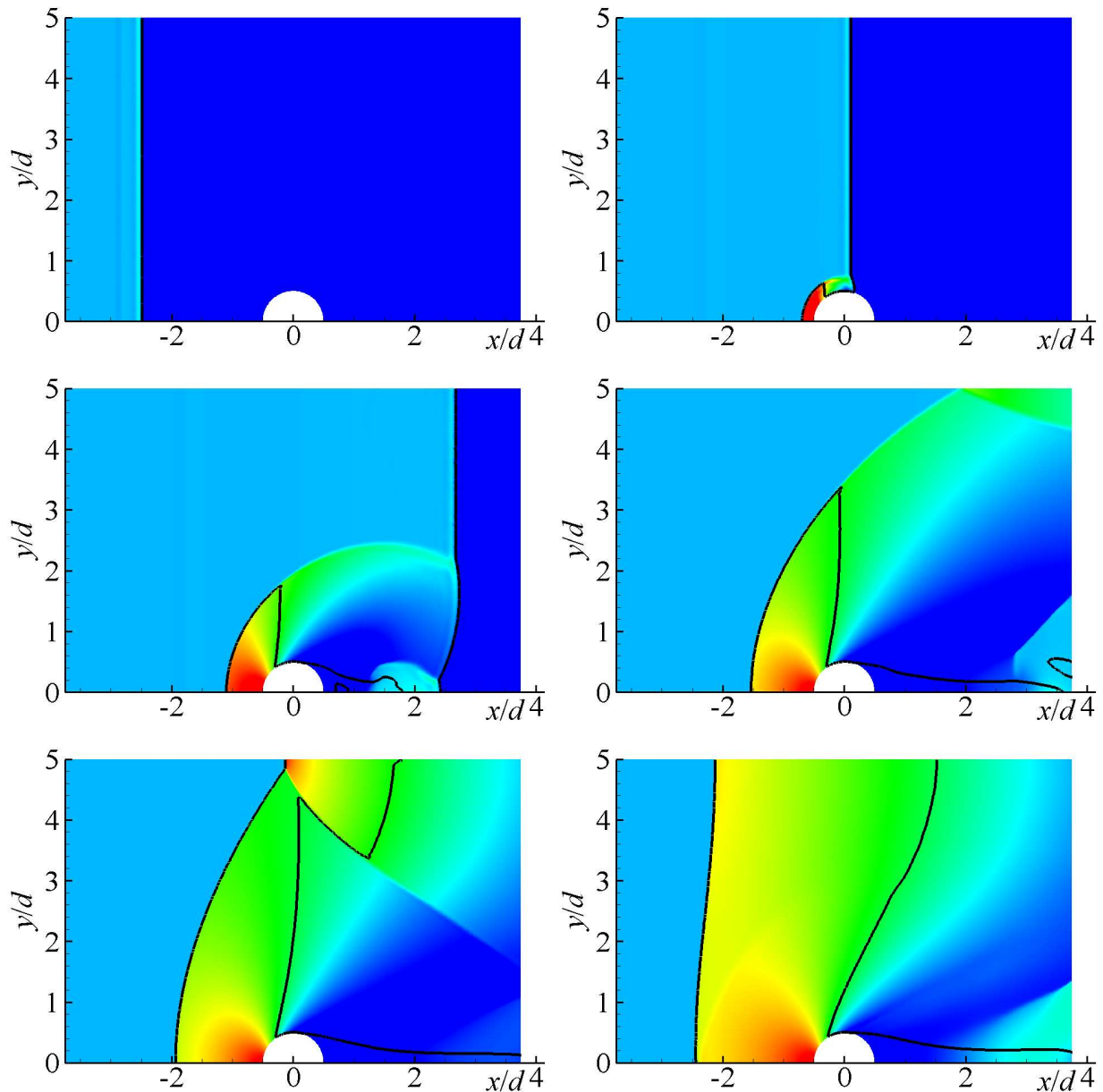


Рис. 1. Поля давления в различные моменты времени при $M_0 = 3$ и $\lambda = 10$

Полученная волновая картина взаимодействия показывает, что в случае близкого расположения тел, режим течения последовательно переходит от регулярного взаимодействия ударных волн (рис. 1d) к маховскому (рис. 1e), а затем коллективному обтеканию тел (рис. 1f). В случае, если тела расположены на большем расстоянии, при

формировании ударных волн могут наблюдаться только один или два начальных этапа (регулярное или маховское взаимодействие ударных волн).

Для параметрического анализа течения удобно рассмотреть обтекание системы цилиндров установившимся сверхзвуковым потоком за ударной волной.

2. Сверхзвуковое обтекание двух поперечно расположенных цилиндров сверхзвуковым потоком за ударной волной. Проведено исследование сверхзвукового обтекания системы из поперечно расположенных цилиндров в двумерной постановке при различных числах Маха и различных расстояниях между цилиндрами. На рис. 2 показаны поля статического давления для двух цилиндров при $M_1 = 1.5$ и различных расстояниях между цилиндрами. Нижняя граница области является линией симметрии. Из рисунка можно видеть различные режимы обтекания при изменении расстояния между телами. При расстоянии между цилиндрами $\lambda = 10$ (а) наблюдается коллективная ударная волна, при $\lambda = 20$ (б) цилиндры обтекаются индивидуально с маховским взаимодействием ударных волн, а при $\lambda = 50$ (в) регулярным взаимодействием ударных волн.

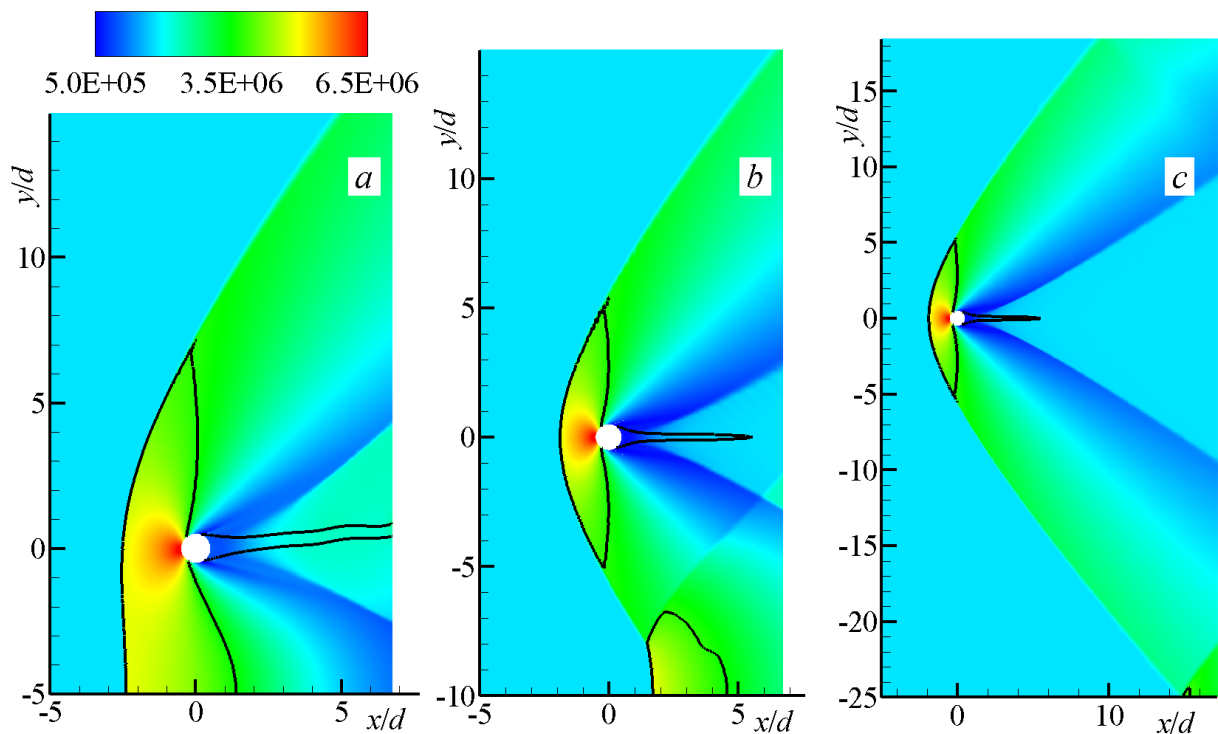


Рис. 2. Поля статического давления для цилиндра при $M_1 = 1.5$. Переход от коллективного обтекания при $\lambda = 10$ (а) к индивидуальному с маховским при $\lambda = 20$ (б) и регулярным взаимодействием при $\lambda = 50$ (с)

На рис. 3 приведена карта режимов обтекания системы поперечных цилиндров в зависимости от числа Маха за ударной волной и расстояния между телами. Рисунок позволяет выделить нейтральные кривые, разделяющие границы областей различных режимов взаимодействия. Видно, что при низких числах Маха ($M < 1.3$) индивидуальное обтекание цилиндров наблюдается только при значительном их удалении ($\lambda > 40$) друг от друга. Сравнение с экспериментом [2], в котором исследовались режимы обтекания сверхзвуковым потоком двух сфер, показывает, что в расчете для цилиндров переход

от коллективного к индивидуальному обтеканию происходит при гораздо больших расстояниях между телами. Это объясняется тем, что картины сверхзвукового течения около поперечно расположенного цилиндра и сферы существенно отличаются друг от друга. Для иллюстрации этого факта проведем расчет сверхзвукового обтекания сферы и сравним картины обтекания цилиндра и сферы.

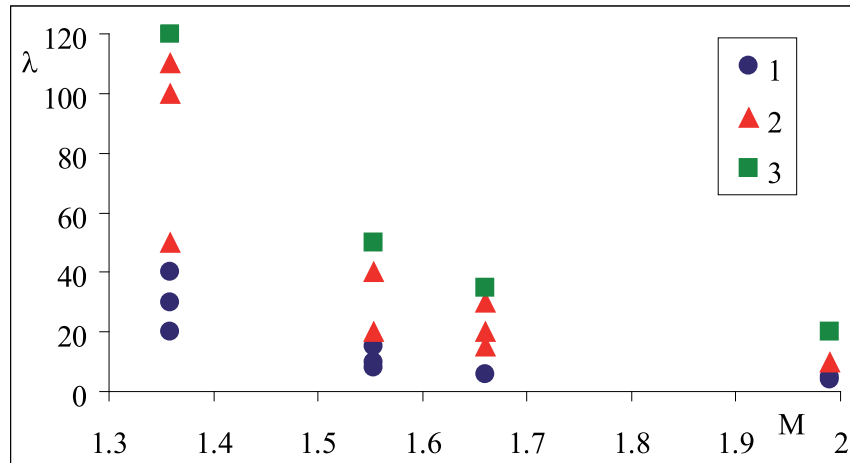


Рис. 3. Расчетные режимы обтекания двух цилиндров в зависимости от числа Маха и расстояния между цилиндрами (1 - коллективная волна, 2 - маховское взаимодействие ударных волн, 3 - регулярное взаимодействие ударных волн)

3. Сверхзвуковое обтекание поперечно расположенного цилиндра и сферы. Моделирование обтекания сферы сделано в двумерной осесимметричной постановке. На рис. 4 приведены изолинии числа Маха и поля статического давления при числе Маха набегающего потока $M_1 = 2$. Сравнение обтекания сверхзвуковым потоком сферы и цилиндра показывает существенное отличие волновой картины течения около этих тел. Ударная волна при обтекании сферы отходит от тела на меньше расстояние и имеет существенно меньший угол наклона. Таким образом, для того чтобы адекватно моделировать режимы обтекания сферических частиц необходимо проводить трехмерные расчеты этой задачи.

4. Сверхзвуковое обтекание системы из сфер в трехмерной постановке при различных числах Маха и различных расстояниях между сферами. Расчет трехмерного обтекания двух сфер был проведен с использованием тетраэдральных сеток в большей части расчетной области. Только в окрестности сферы строилась гексагональная сетка, сгущающаяся к поверхности сферы. Также проводилась адаптация сетки по градиенту плотности к газодинамическим особенностям течения. Нижняя граница области являлась плоскостью симметрии.

На рис. 5 показаны поля статического давления для сферы при $M_1 = 1.5$. На рисунке можно наблюдать все типы волновых структур, возникающих при обтекании системы сфер. Видно, что при увеличении расстояния между сферами, происходит переход от коллективного обтекания при $\lambda = 2.5$ (a) к индивидуальному с маховским при $\lambda = 4.0$ (b) и регулярным взаимодействием при $\lambda = 5.5$

На рис. 6 представлено сравнение расчетных и экспериментальных режимов обтекания двух сфер в зависимости от числа Маха и расстояния между сферами. Круги 1 и 4 соответствуют расчетным и экспериментальным режимам с единым волновым

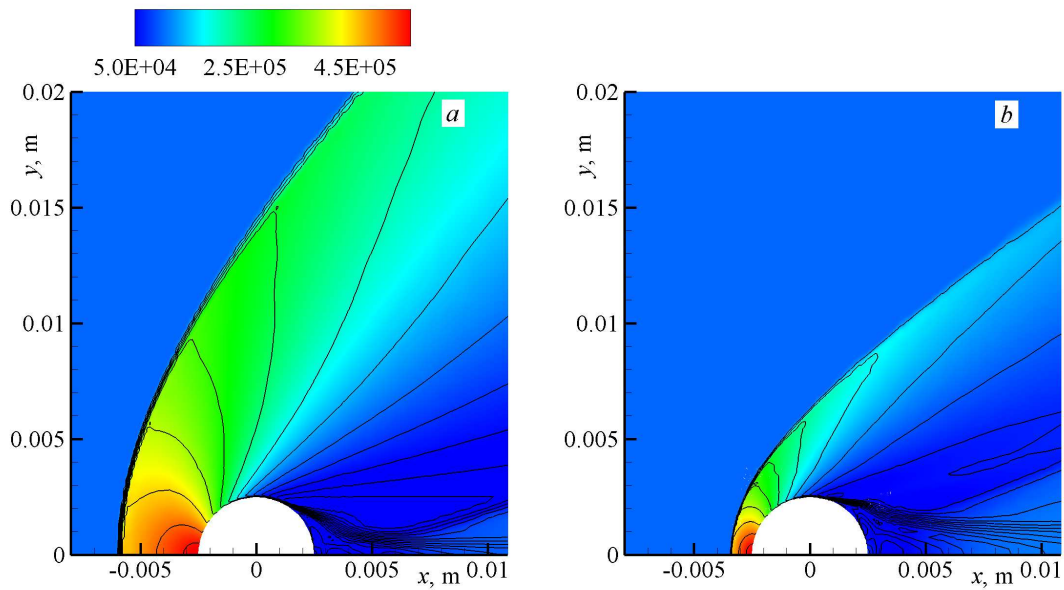


Рис. 4. Поля статического давления и изолинии числа Маха для цилиндра (a) и сферы (b) при $M_1 = 2$

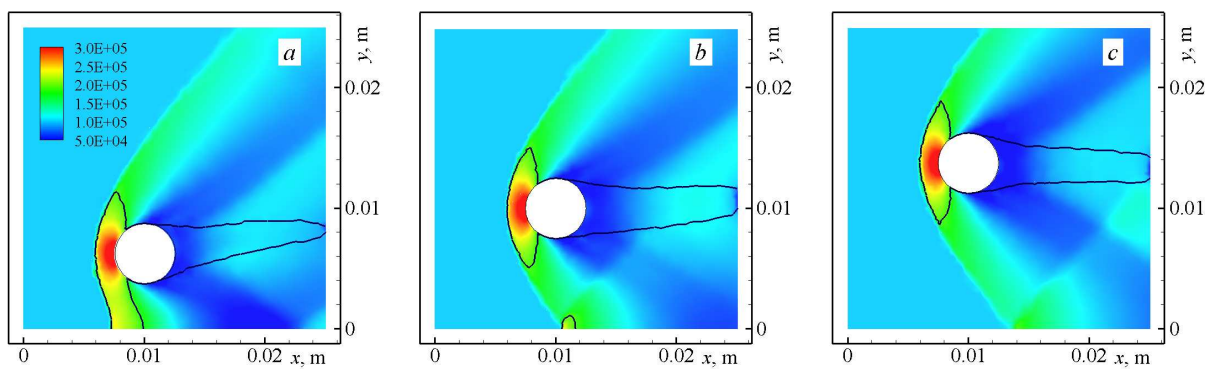


Рис. 5. Поля статического давления для сферы при $M_1 = 1.5$. Переход от коллективного обтекания при $\lambda = 2.5$ (a) к индивидуальному с маховским при $\lambda = 4.0$ (b) и регулярным взаимодействием при $\lambda = 5.5$ (c)

фронтом, треугольники 2 и 5 соответствуют маховскому взаимодействию, а квадраты 3 и 6 — регулярной интерференции ударных волн. Из рисунка можно сделать вывод о согласии расчетных и экспериментальных данных.

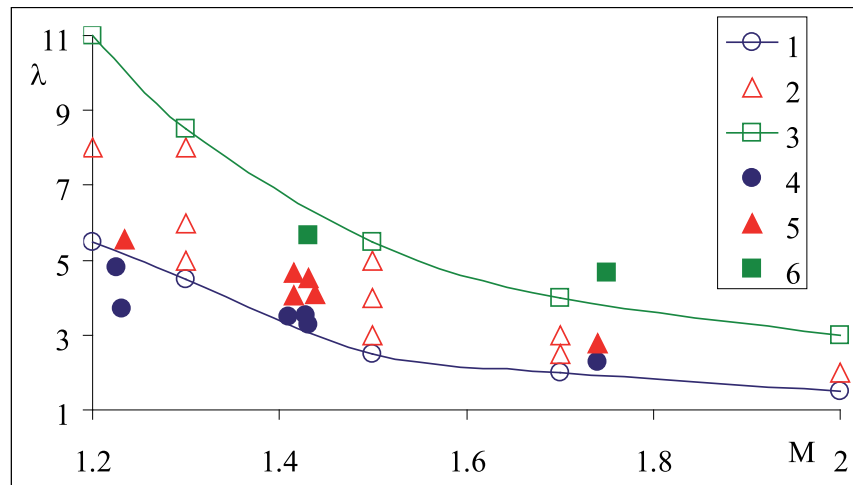


Рис. 6. Сравнение расчетных и экспериментальных режимов обтекания двух сфер в зависимости от числа Маха и расстояния между сферами (1, 4 - коллективная волна, 2, 5 - маховское взаимодействие ударных волн, 3, 6 - регулярное взаимодействие ударных волн)

Заключение. В результате расчетов показано, что при увеличении расстояния между телами происходит переход от коллективного обтекания частиц к индивидуальному, в начале с маховским, а затем с регулярным взаимодействием между ударными волнами. Получена волновая картина взаимодействия проходящей ударной волны с поперечно расположенными цилиндрами в различные моменты времени. Обнаружено, что в случае близкого расположения тел, режим обтекания тел последовательно переходит от регулярного к маховскому, а затем коллективному взаимодействию ударных волн. Построена карта режимов обтекания системы поперечных цилиндров и системы сфер в зависимости от числа Маха и расстояния между телами. Проведенное сравнение расчетов с экспериментальными данными показало хорошее их соответствие.

Список литературы

- [1] Бойко В.М., Клинков 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
- [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