

Математическое моделирование взаимодействия ударной волны с системой тел методом декартовых сеток*Д.А. Сидоренко^{1,2}, П.С. Уткин^{1,2}*¹Институт автоматизации проектирования РАН²Московский физико-технический институт (государственный университет)

Задача о взаимодействии ударной волны (УВ) с плоским облаком частиц является канонической при исследовании плотных высокоскоростных течений двухфазных сред [1]. Данная задача представляет интерес с нескольких точек зрения. Во-первых, она связана с рядом практических приложений, таких как ослабление взрывных волн при авариях в добывающей отрасли. Во-вторых, подобная постановка соответствует фундаментальной задаче Римана для систем уравнений, описывающих течения двухфазных сред. Формулировка математических моделей и вычислительных алгоритмов, позволяющих рассчитывать широкий спектр режимов течений двухфазных сред – от разреженных до плотных – в рамках подходов механики гетерогенных сред является сегодня очень актуальным и не до конца решенным вопросом [2].

Для прояснения особенностей процесса взаимодействия УВ с облаком частиц используется многомерное газодинамическое моделирование. В [1] двумерные газодинамические расчеты использовались для того, чтобы качественно описать многомерные эффекты при взаимодействии УВ с облаком частиц в трехмерном случае. Полученное решение использовалось как «точное» для последующего сравнения с результатами одномерных расчетов. Результаты расчетов показали важность многомерных эффектов, связанных с напряжениями Рейнольдса внутри облака частиц и в турбулентном следе.

Важным аспектом, влияющим на возможность подобного моделирования, является вычислительный алгоритм, поскольку речь идет о решении уравнений газовой динамики в многосвязной области, которую нельзя покрыть структурированной расчетной сеткой. В [1] авторы использовали сетку с квадратными расчетными ячейками и стандартный «Римановский решатель». Таким образом, границы тел являлись ступенчатыми, что могло приводить к возникновению искусственных нефизичных возмущений. Результаты, представленные в данной работе, базируются на вычислительном алгоритме метода декартовых сеток для численного интегрирования уравнений газовой динамики в областях сложной формы [3].

Постановка задачи соответствует [1]. Расчетная область представляет собой прямоугольник $[-2.5; 3.5] \times [-0.5; 0.5]$. На левой границе $X = -2.5$ задаются условия втекания потока с заданными параметрами (для случая, представленного на рис. 1 – с параметрами за УВ с числом Маха 1.67). На правой границе $X = 3.5$ – условия экстраполяции нулевого порядка (расчет продолжается до момента прихода возмущений на правую границу). На верхней ($Y = 0.5$) и нижней ($Y = -0.5$) границах задаются условия периодичности для моделирования бесконечно длинного «облака частиц». «Облако частиц» расположено между сечениями $X = -0.5$ и $X = 0.5$ и моделируется 26 цилиндрами. Как показано в [1], расположение цилиндров, представленное на рис. 1, нижняя часть, обеспечивает наиболее равномерное распределение по X усредненной по Y нормированной площади S , свободной для прохождения газа, по сравнению с рядом регулярных расположений цилиндров. В рассматриваемом расчете $S = 0.85$.

В расчетной области, полученной вычитанием из прямоугольника $[-2.5; 3.5] \times [-0.5; 0.5]$ цилиндров, решаются уравнения Эйлера. Определяющая система уравнений приведена к безразмерному виду с использованием характерных масштабов из [1]. Используется оригинальный вычислительный алгоритм метода декартовых сеток [3], основанный на идее «ячеек» [4]. Размер ячейки расчетной сетки равен $1/800$.

На начальной стадии взаимодействия падающей УВ с системой цилиндров формируется отраженная волна, состоящая из множества участков, обусловленных отражением от единичных цилиндров. Интенсивность отраженной волны по мере развития процесса увеличивается, поскольку дополнительный вклад несут возмущения, связанные с взаимодействием лидирующей

волны с цилиндрами, расположенными вниз по потоку. В итоге через некоторое время формируются практически плоская коллективная отраженная ($X \approx -1.8$ на рис. 1) и прошедшая ($X \approx 3.0$) волны. Течение в следе за облаком сильно турбулизировано, наблюдаются структуры типа «дорожек Кармана», что при использовании невязкой модели связано с наличием схемной вязкости в расчете. Для возможности использования результатов двумерного моделирования при анализе корректности одномерных расчетов в рамках механики гетерогенных сред реализована процедура усреднения газодинамических величин поперек канала. Соответствующий профиль усредненного давления представлен на Рис. 1, верхняя часть.

Работа выполнена в рамках гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых (договор № 14.W01.16.6756-МК).

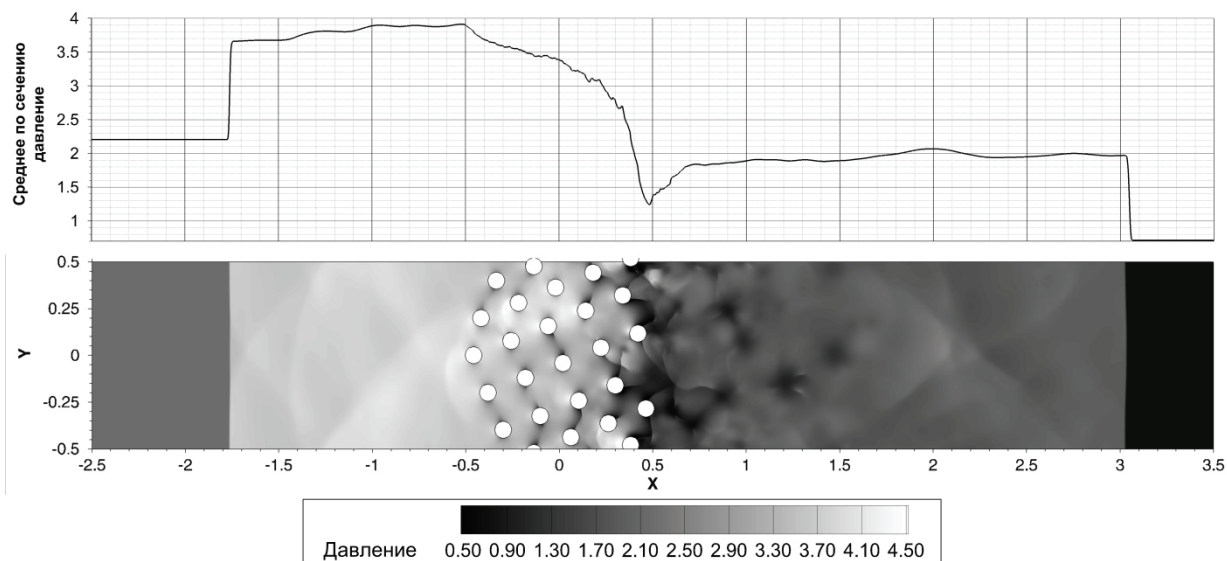


Рис. 1. Рассчитанное распределение давления после прохождения ударной волной системы тел. Нижний рисунок – двумерное распределение, верхний – среднее по сечению давление.

Литература

1. *Regele J.D. [et al.] Unsteady effects in dense, high speed, particle laden flows // Int. J. Multiphase Flow. 2014. V. 61. P. 1.*
2. *Houim R.W., Oran E.S. A multiphase model for compressible granular-gaseous flows: formulation and initial tests // J. Fluid Mech. 2016. V. 789. P. 166.*
3. *Сидоренко Д.А., Уткин П.С. Метод декартовых сеток для численного моделирования распространения ударных волн в областях сложной формы // Выч. мет. программ. 2016. Т. 17. С. 353.*
4. *Berger M., Helzel C. A simplified h-box method for embedded boundary grids // SIAM J. Sci. Comp. 2012. V. 34. P. A861.*