

УДК 534.222.2

Исследование задач трехмерной газодинамики на примере задачи о дифракции ударной волны на трехмерном уступе

08, август 2012

Яковенко И.С.

*Студент,
кафедра «Физика»*

*Научный руководитель: Иванов М.Ф.,
доктор технических наук, профессор кафедры «Физика»*

МГТУ им. Н.Э. Баумана
bauman@bmstu.ru

Одним из актуальных направлений современной вычислительной физики является решение трехмерных задач динамики жидкостей и газов. Широкий круг проблем горения, дисперсных течений, течений в трубках и капиллярах требует трехмерного моделирования потоков жидкостей и газов. Решение трехмерных задач интересно как с точки зрения инженерных приложений, так и фундаментальных исследований динамики сплошной среды.

Анализ трехмерных задач газовой динамики на сегодняшний день является мало изученной областью науки. Решая трехмерные задачи, исследователь сталкивается с целым комплексом проблем. Вычислительные мощности ЭВМ совсем недавно достигли уровня, на котором возможно качественное моделирование трехмерных потоков жидкостей и газов. Новейшие супер ЭВМ обладают достаточным потенциалом для решения сложнейших задач, но накладывают серьезные требования на квалификацию пользователя. Для эффективного использования супер ЭВМ пользователь должен уметь максимально оптимизировать свой алгоритм, оценивать возможность распараллеливания на данном типе ЭВМ, иметь представление о различных подходах к написанию параллельных программ. Все эти требования делают само по себе использование супер ЭВМ весьма сложной задачей.

Другой важной проблемой в сфере решения трехмерных задач является сложность грамотной интерпретации полученных результатов. Большинство расчётов трехмерных задач газовой динамики посвящена инженерным приложениям различных видов течения в различных геометрических постановках, в то же время фундаментальных результатов и выводов делается значительно меньше. Проблема в большой сложности эволюции трёхмерных течений. Трёхмерные течения всегда сопровождаются возникновением неустойчивостей, вихревых структур и турбулентных течений. Стохастический характер проявлений этих эффектов затрудняет анализ течения, а в трехмерных задачах они играют важнейшую роль, и

без учета влияния этих явлений на течение невозможно построить фундаментальную теорию для трехмерных течений.

Трудоемкость построения расчетной сетки также является большой трудностью на пути к решению трехмерных задач. Сложная геометрическая структура трехмерной расчетной области требует тщательного анализа для максимально эффективного разбиения на расчетные ячейки. Построение расчетной сетки для расчетной области сложной геометрической структуры само по себе может стать сложнейшей задачей, требующей использования специальных методов и алгоритмов.

Одной из сложных трехмерных задач газовой динамики является моделирование течения среды в изогнутых трубах. Принципиальная трехмерность задачи значительно затрудняет её решение, но практическое применение изогнутых труб повсеместно. Это обуславливает практическую значимость решения такого типа задач. В ходе работы по исследованию влияния трехмерности на решение задачи был построен программный комплекс для моделирования динамики течения газа с дисперсными примесями (частицами) внутри изогнутой S-образной трубки. Пример построения расчетной сетки представлен на рисунке 1. На рисунке 2 показан результат моделирования потока. Цветом показано распределение концентрации частиц. Отчетливо видно образование разреженной зоны и зоны высокой концентрации частиц у верхней стенки изгиба. Черными ломаными обозначены линии тока.

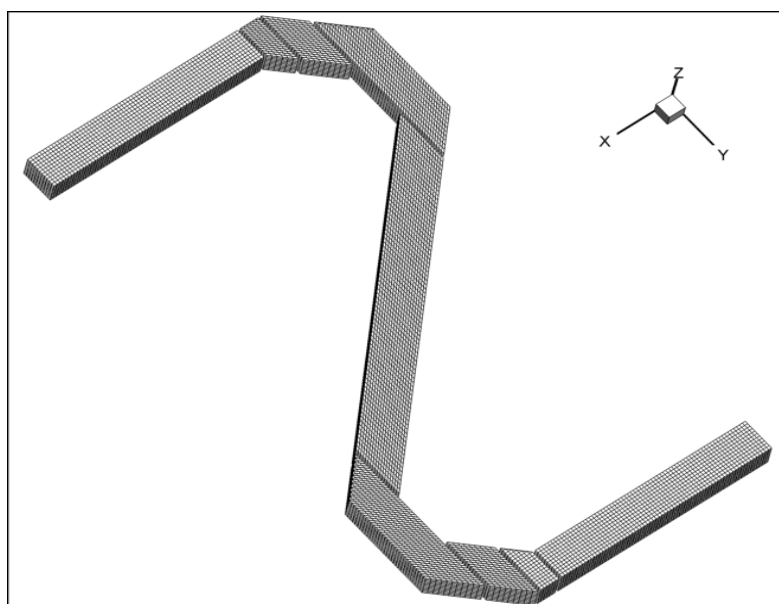


Рис. 1

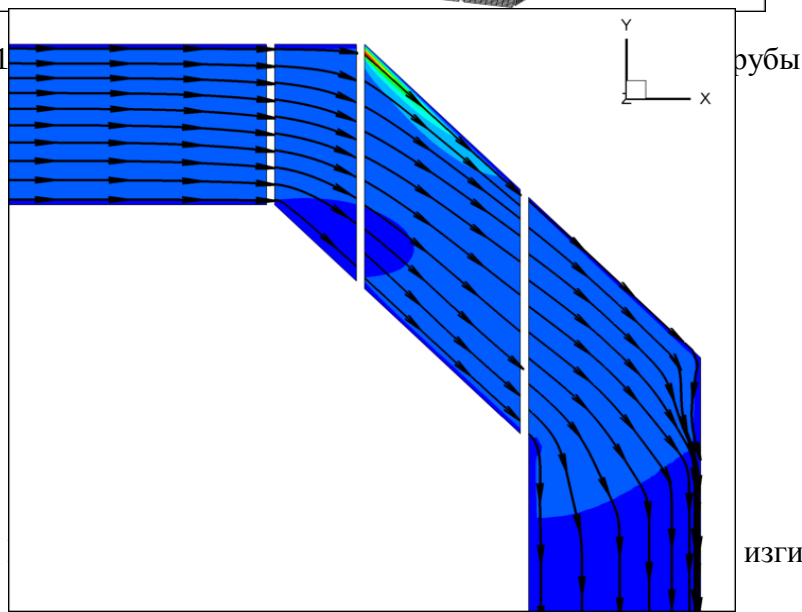


Рис. 2.

изгибе

Для дальнейшего исследования трехмерных задач газовой динамики была решена задача о дифракции ударной волны на обратном уступе. Для решения классической задачи в трехмерной постановке была использована трехмерная математическая модель вязкого газа на основе уравнений Навье-Стокса [1]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j u_i)}{\partial x_j} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial p}{\partial x_i} \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j E)}{\partial x_j} = \frac{\partial(\sigma_{jk} u_k)}{\partial x_j} - \frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j} \quad (3)$$

Для решения системы (1)-(3), дополненной уравнением состояния идеального газа $p = \rho RT$, был использован эйлерово-лагранжев метод [2] модифицированный таким образом, чтобы были устойчивы как эйлеров, так и лагранжев этапы, и расчет имел второй порядок точности по пространству.

Алгоритм модифицированного эйлерово-лагранжева метода был распараллелен для использования на кластерных супер ЭВМ. Реализация алгоритма была выполнена с помощью стандарта MPI для параллельных программ.

Постановка для трехмерной задачи изображена на рисунке 3. Цветом на рисунке обозначено давление. В начале координат расположен уступ, над которым задана зона высокого давления. Распад разрыва инициирует ударную волну. Стенки расчетной области заданы непроницаемыми, что приводит к множественным переотражениям ударных волн внутри расчетной области в трехмерном случае.

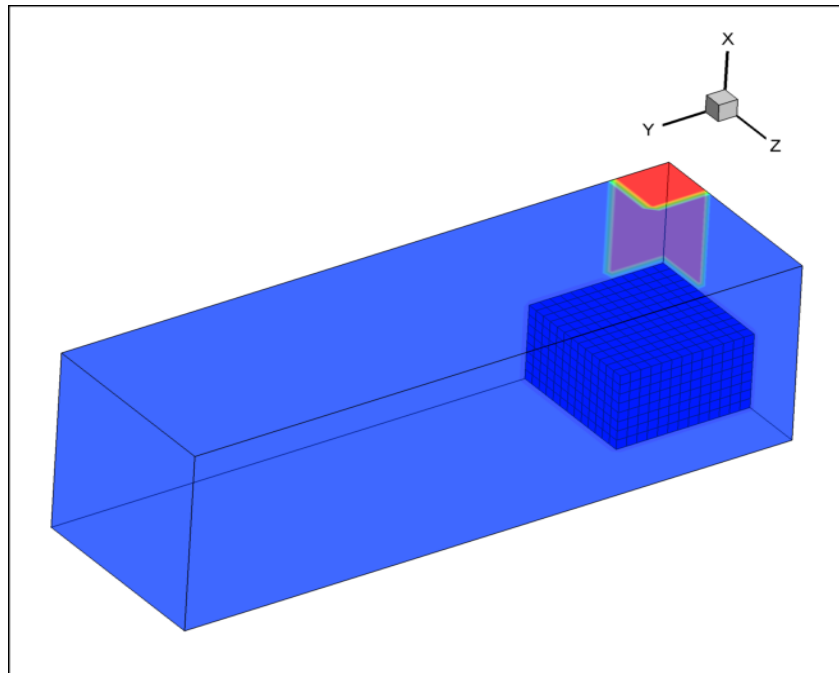


Рис. 3. Постановка задачи об обратном уступе.

Для сравнения была решена двумерная задача с такими же характеристиками разрыва и высоты уступа. На рисунках 4 и 5 приведено сравнение среза

параллельного плоскости Oxy при $z=0$ для трехмерного случая и плоскости Oxy для двумерного случая. Из распределений давления видно что фронт ударной волны в двумерном случае более выпуклый, а значение плотности на фронте больше, чем в трехмерном случае.

Вихревые структуры, образующиеся за уступом как в двумерном так и в трехмерном случае, различаются тем, что в трехмерном случае они имеют протяженную пространственную структуру, чего нельзя наблюдать при двумерных расчетах.

Графики зависимости давления от координаты y , сделанные вдоль одной и той же оси для двумерного и трехмерного случаев, приведены на рисунке 6. Из графиков видно, что в трехмерном случае скорость ударной волны ниже, чем в двумерном, а структура фронта ударной волны имеет более сложную структуру.

Решение классической задачи о дифракции ударной волны на обратном уступе наглядно показывает большое различие между двумерными и трехмерными результатами решения. Трехмерные эффекты тем сильнее начинают влиять на результат вычислительного эксперимента, чем больше асимметрия геометрии задачи. Этим нельзя пренебрегать при решении сложных трехмерных задач динамики жидкостей и газов.

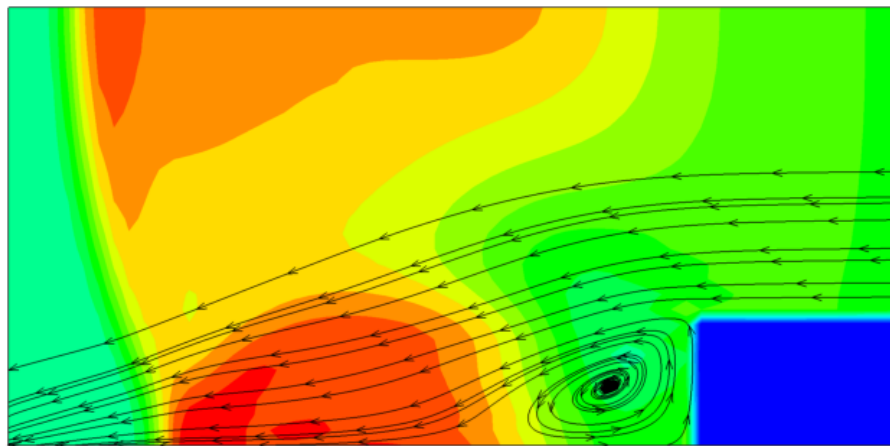


Рис. 4. Распределение давления для двумерной задачи

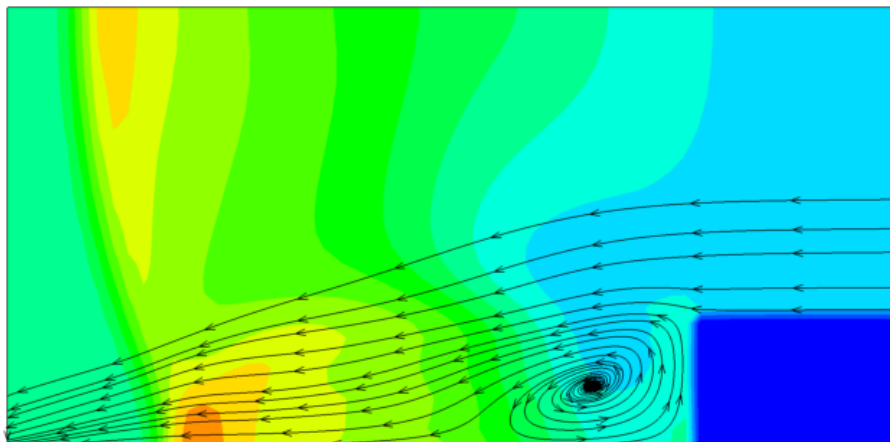


Рис. 5. Распределение давления для трехмерной задачи

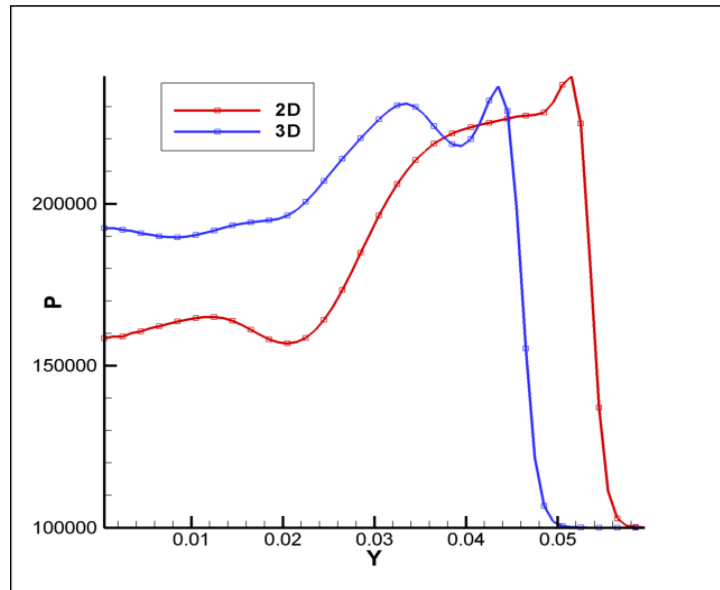


Рис. 6. Сравнение зависимостей давления от координаты $0y$ для двумерного и трехмерного случаев

Список литературы.

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика (Том 6. Гидродинамика). – М.: Физматгиз, 1988, 2001 – 736 с.
2. Белоцерковский О.М., Давыдов Ю.М. Метод крупных частиц в газовой динамике. Вычислительный эксперимент. М.: Наука, 1982. 370 с.