

Комплекс программ HSFlow.

Моделирование ламинарно-турбулентного перехода с применением диссипативных численных схем

Егоров И.В., Новиков А.В., Образ А.О., Пальчеховская Н.В., Чувахов П.В.

ЦАГИ, МФТИ

Монотонные схемы сквозного счёта диссипативны. Это позволяет устойчиво рассчитывать течения с ударными волнами, отрывными областями, пограничными слоями и другими особенностями с учётом их взаимодействия. Избыточная диссипация приводит к численному затуханию малых возмущений. Однако темпы роста возмущений в неустойчивых пограничных слоях могут заметно превосходить эффекты, связанные с численной диссипацией. В докладе демонстрируется успешное применение монотонной схемы второго порядка точности по пространству и времени для моделирования ламинарно-турбулентного перехода сверхзвукового пограничного слоя на плоской пластине, число Маха 3. Результаты моделирования в деталях сопоставляются с аналогичными результатами, полученными с применением значительно менее диссипативного метода [1], который основан на схеме четвёртого порядка точности по продольному и нормальному к поверхности направлениям, и спектрального метода в боковом направлении; интегрирование по времени проводится по методу Рунге–Кутты четвёртого порядка аппроксимации. Установлено, что диссипативные численные схемы пригодны для моделирования процесса ламинарно-турбулентного перехода и надёжного воспроизведения интегральных характеристик течения, таких как коэффициенты трения и средние профили газодинамических переменных.

В линейном режиме результаты, полученные с помощью диссипативной схемы, хорошо согласуются с результатами [1]. В развитом нелинейном режиме избыточная диссипативность схемы может приводить к недостаточно детальному воспроизведению мелкомасштабных структур, что можно компенсировать путём измельчения расчётной сетки. Для более аккуратного моделирования ламинарно-турбулентного перехода можно понижать диссипативность схемы там, где она не требуется (например, в пограничном слое).

Выполнено прямое численное моделирование взаимодействия падающей волны Маха со сверхзвуковым пограничным слоем при обтекании плоской пластины с острой передней кромкой. Численные результаты удовлетворительно согласуются с данными эксперимента [2]. Показано, что среднеквадратичное значение пульсаций массового расхода в пограничном слое в случае обтекания плоской пластины с острой передней кромкой достигает величины 2.5%.

Неровности на стенке приводят к появлению пары слабых ударных волн, называемых N-волнами. В результате статистической обработки данных и Фурье-анализа пульсаций обнаружено, что внешние слабые ударные волны приводят к появлению дополнительной области нелинейности пульсаций, а в спектрах – к возбуждению низкочастотных возмущений. Главная часть энергии пульсаций принадлежит области низких (до 3 кГц) частот, что также согласуется с результатами экспериментов работы [2]. Внутри пограничного слоя пульсации массового расхода выше, чем вне пограничного слоя, но во всех областях амплитуды пульсаций массового расхода достаточно малы и находятся, приблизительно, на уровне точности численного решения.

Литература

1. Christian S. J. Mayer, Dominic A. von Terzi, and Hermann F. Fasel. DNS of Complete Transition to Turbulence Via Oblique Breakdown at Mach 3 // AIAA 2008-4398, 2008.
2. Ваганов А.В., Ермолаев Ю.Г., Колосов Г.Л., Косинов А.Д., Панина А.В., Семёнов Н.В. О воздействии падающей волны Маха на поле пульсаций в пограничном слое при обтекании плоского дельта крыла // Вестн. НГУ. Сер. Физика. 2014. Т. 9, № 1. С. 29–38.