ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОКОЛЕБАНИЙ ПРИ СВЕРХЗВУКОВОМ ОБТЕКАНИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ТЕЛА, ОГРАНИЧЕННОГО С ТОРЦОВ ПАРАЛЛЕЛЬНЫМИ ПЛАСТИНАМИ

Е.В. Колесник, Е.В. Бабич, Е.М. Смирнов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, kolesnik_ev@mail.ru

Задачи сверхзвукового течения в каналах с препятствиями различной формы, характеризующиеся сложными эффектами вязко-невязкого взаимодействия, являются важными и актуальными как для практических приложений, например, при решении задач газовой динамики воздушно-реактивных двигателей, так в фундаментальном плане. Исследованию отрывных течений при внешнем обтекании тел посвящено большое число работ, как экспериментальных, так и численных [1-3]. С объемом исследований внутренних отрывных течений ситуация иная, вместе с тем, эффекты вязко-невязкого взаимодействия здесь играют еще большую роль [4]. Также известно, что важную роль в развитии отрывных течений в каналах играют эффекты, обусловленные развитием нестационарных явлений [4]. Настоящая работа посвящена исследованию сверхзвукового обтекания цилиндрического тела, ограниченного с торцов параллельными пластинами; в расчетах варьируется отношение высоты канала к диаметру затупления, отдельное внимание уделяется изучению возникающих нестационарных автоколебательных режимов обтекания. Задачи подобного рода возникают, в частности, при постановке экспериментальных исследований сверхзвукового обтекания различных тел, когда влияние ограничивающих стенок установки на поток может быть существенным [3].

Расчетная область для рассматриваемой задачи сверхзвукового обтекания совершенным вязким газом цилиндрического тела, расположенного между параллельными пластинами, показана на рис. 1. Размеры расчетной области $L/D = 15$, $R/D = 10$. Геометрический параметр H/D варьировался, от 4 до 2; расчеты проводились и для случая $H/D = \infty$ (в полуограниченной по z области). Число Маха набегающего потока $\mathrm{M} = 5$, единичное число

Рейнольдса Re = $7.5 \cdot 10^5$ [1/м], диаметр затупления тела $D = 0.02$ м. Полная температура набегающего потока $T_0 = 1180$ К. Рабочий газ – азот. Зависимость коэффициента вязкости от температуры определялась формулой Сазерленда. На входной границе расчетной области задавался однородный поток, на поверхности тела и горизонтальных стенках – условие прилипания. Поверхности тела и пластин поддерживались при постоянной температуре (температурный фактор $T_{\mathrm{w}}/T_{\mathrm{in}} = 1.56$). На боковых границах ставились неотражающие граничные условия, на выходе – условие нулевого градиента рассчитываемых переменных.

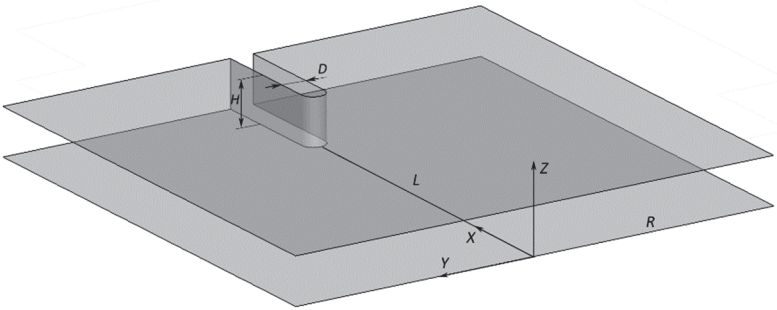

Рис. 1. Расчетная область

Численные решения трехмерных уравнений Навье-Стокса получены с применением конечно-объемного «неструктурированного» программного кода SINF/Flag-S, разрабатываемого в СПбПУ. Для проведения расчетов использовались вычислительные ресурсы суперкомпьютерного центра Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (www.scc.spbstu.ru).

Все расчеты проводились на основе нестационарной постановки, использовался метод «двойных шагов» с трехслойной схемой аппроксимации производной по времени, безразмерный шаг по времени задавался равным $\Delta t U_\infty / D = 3.5\ 10^{-3}$. Вычисление конвективных потоков на гранях контрольных объемов проводилось на основе схемы AUSM второго порядка точности. Для расчетов использовались сетки, содержащие ~15 млн ячеек.

Установлено, что в случае $H/D = \infty$ реализуется стационарный режим обтекания. Течение при $H/D = 4$ и 3 можно охарактеризовать как слабо нестационарное: небольшие колебания

наблюдаются в областях сочленения тела и пластин. При уменьшении высоты канала до $H/D = 2$ картина течения становится существенно нестационарной. На рис. 2 показаны поля числа Маха с наложенными линиями тока в средней продольной плоскости перед обтекаемым телом (для нестационарных режимов показаны осредненные по времени поля). В случае $H/D = 4$ можно наблюдать участок невязкого ядра потока в центре канала; при $Z/D = 2$ отошедший скачок уплотнения расположен на таком же расстоянии от тела, как и в случае полуограниченной области ($H/D = \infty$.) Уменьшение относительной высоты канала H/D приводит к тому, что отошедший скачок уплотнения смещается ближе к обтекаемому телу, а толщина отрывной области увеличивается. Для случая $H/D = 2$ структура осредненного течения в отрывной области существенно иная, при этом длина отрывной области уменьшена.

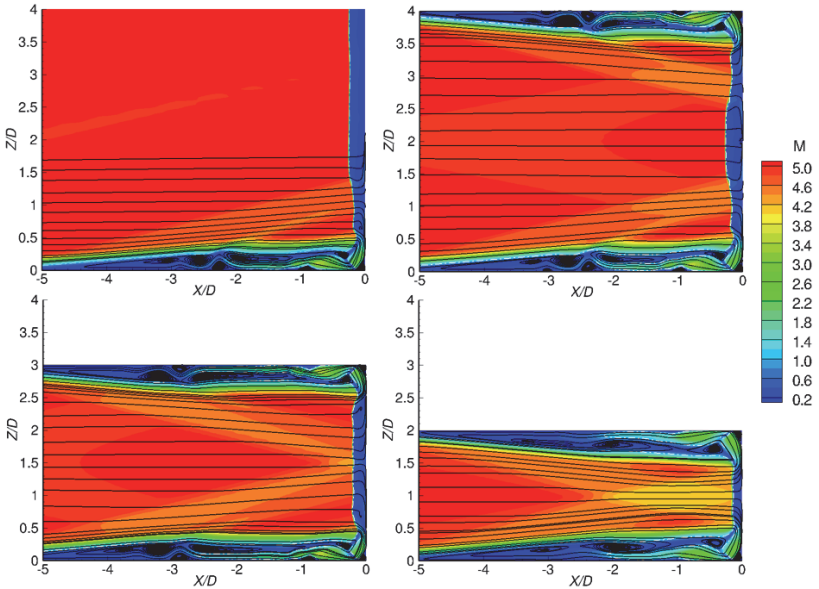

Рис. 2. Поля числа Маха (для осредненного течения) в средней продольной плоскости

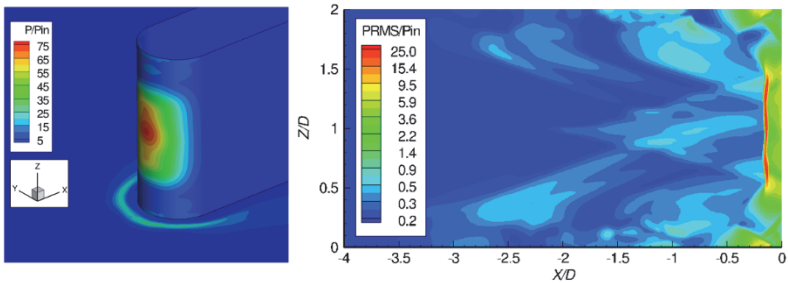

Рис. 3. Осредненное поле давление на поверхности тела и пластины (слева) и поле среднеквадратичных пульсаций давления в средней продольной плоскости перед телом (справа)

На рис. 3 для случая $H/D = 2$ иллюстрируется осредненное поле давления на поверхности тела и пластины. Максимум давления наблюдается в лобовой точке на поверхности тела в середине канала; формирующийся перед телом подковообразный вихрь приводит к возникновению выраженного локального максимума давления на пластине. На рис. 3 также приведено поле среднеквадратичных пульсаций давления в средней продольной плоскости перед телом. Хорошо прослеживаются сильные колебания отошедшего скачка уплотнения.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ №23-29-00286.

Литература

1. O.R. Tutty, G.T. Roberts, P.H. Schuricht High-speed laminar flow past a fin-body junction. J. Fluid Mech., v.737, 2013, pp.19-55.
2. Mortazavi M., Knight D. Simulation of Hypersonic-Shock-Wave–Laminar-Boundary-Layer Interaction over Blunt Fin. AIAA Journal. Vol. 57. 2019. No 8. P. 3506-3523.
3. Sabnis K., Babinsky H A review of three-dimensional shock wave–boundary-layer interactions. Progress in Aerospace Sciences. V. 143. No 1. 2023. P. 100953
4. Процессы торможения сверхзвуковых течений в каналах: монография / О.В. Гуськов, В.И. Копченов, И.И. Липатов, В.Н. Острась. Москва: Физматлит, 2008. 163 с.