ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ТУРБУЛЕНТНЫХ ПЯТЕН В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ НА ПАРАБОЛИЧЕСКОМ ПРОФИЛЕ

И.В. Егоров, И.М. Илюхин

Центральный аэрогидродинамический институт, Жуковский, ivan.egorov@tsagi.ru

Переход к турбулентности в сверхзвуковом пограничном слое существенно влияет не только на коэффициент сопротивления, но и увеличивает тепловой поток на поверхности летательных аппаратов. При относительно невысоком уровне внешних возмущений и при условии, что обтекаемая поверхность гладкая, ламинарно-турбулентный переход (ЛТП) состоит из следующих этапов [1]: восприимчивость, линейная стадия роста неустойчивых возмущений, нелинейная стадия, формирование турбулентных пятен и заполнение растущими пятнами всего пограничного слоя. На осредненное распределение коэффициента трения влияют этапы, начинающиеся с нелинейной стадии ЛТП. Кроме этого, перекрытие сформировавшихся турбулентных пятен прямо связано с таким параметром, как перемежаемость [2]. Исследования турбулентных пятен в условиях сжимаемых течений остаются неполными [3], а взаимодействие пятен друг с другом в таких течениях рассматривается редко [4].

В докладе [5] представлены результаты численного моделирования развития уединённого турбулентного пятна на поверхности прямого параболического профиля с относительной толщиной 0.1. Условия обтекания соответствуют [6]: атмосферный полёт на высоте 20 км при числе Маха 3. Определены основные характеристики такого пятна: угол полураскрытия, скорости фронтов и параметр роста σ. В текущей работе рассматривается численное моделирование взаимодействия двух пятен при тех же условиях.

На рис. 1 изображено поле завихренности в пограничном слое в плоскости взаимодействия двух пятен. В отличие от одного пятна, за взаимодействующими пятнами образуется новое возмущение, не наблюдаемое в работе [4]. Та же картина наблюдается при рассмотрении поля возмущений давления на поверхности профиля (рис. 2). Новое возмущение оказывает существенное влияние

на мгновенное распределение трения, что проиллюстрировано на рис. 3.

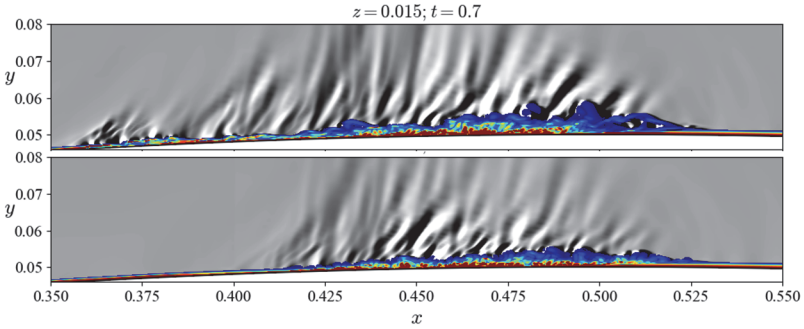

Рис. 1. Поле завихренности в пограничном слое (цветная палитра) и поле продольного градиента плотности (черно-белая палитра) в плоскости взаимодействия пятен: для двух пятен (сверху) и одного пятна (снизу)

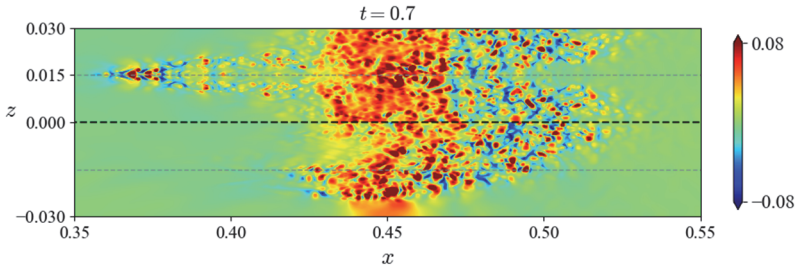

Рис. 2. Поле возмущений давления на поверхности профиля в фиксированный момент времени. На верхней полуплоскости - два перекрывающихся пятна, на нижней - половина одного пятна

Показано, что в области перекрытия пятен максимальное значение пульсаций давления снижается по сравнению с уединённым пятном. Отличий в форме взаимодействующих пятен по сравнению с суммой невзаимодействующих не обнаружено и их границы соответствуют границам невзаимодействующих пятен.

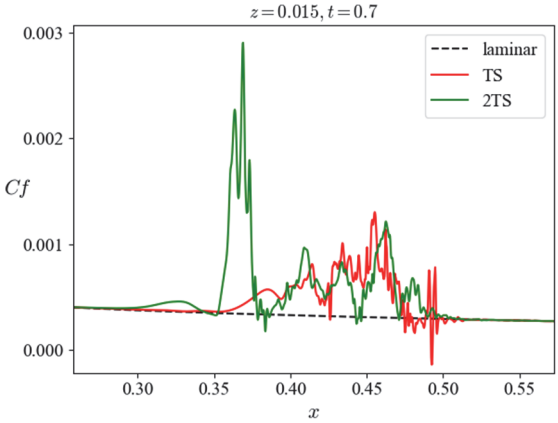

Рис. 3. Мгновенное распределение коэффициента трения для 1 пятна (TS) и двух пятен (2TS)

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект № 24-19-00256).

Литература

1. Fedorov A. Transition and Stability of High-Speed Boundary Layers. Annu. Rev. Fluid Mech., 2011, v. 43, pp. 79-95.
2. Narasimha R. The laminar-turbulent transition zone in the boundary layer. Progress in Aerospace Sciences, 1985, v. 22, no. 1, pp. 29-80.
3. Wu X. New Insights into Turbulent Spots. Annu. Rev. Fluid Mech., 2023, v. 55, no. 1, pp. 45-75.
4. Krishnan L., Sandham N.D. On the merging of turbulent spots in a supersonic boundary-layer flow. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2006, v. 27, no. 4, pp. 542-550.
5. Илюхин И.М., Егоров И.В., Федоров А.В. Турбулентное пятно на параболическом профиле в сверхзвуковом потоке. Сборник тезисов докладов XIII Всероссийского съезда по теоретической и прикладной механике, т.2, 2023, с.568-570.
6. Chuvakhov P.V., Ilyukhin I.M., Fedorov A.V. Stability of supersonic boundary layer over an unswept wing with a parabolic airfoil. Theor. Comput. Fluid Dyn., 2024, v. 38, pp. 1-13.