ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИИ ВОЛН ТОЛЛМИНА-ШЛИХТИНГА ТУРБУЛЕНТНОСТЬЮ ПОТОКА

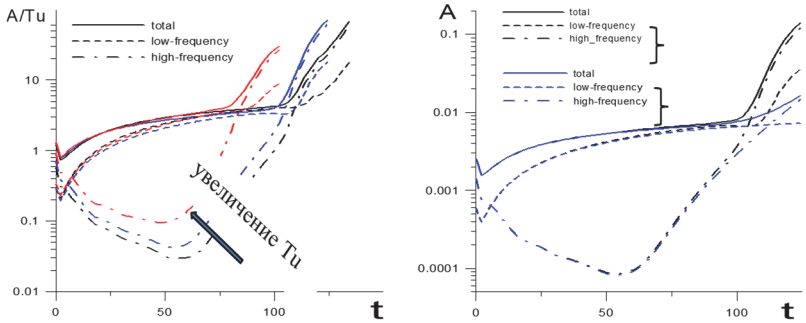
М.В. Устинов

Центральный Аэрогидродинамический институт (ЦАГИ), Жуковский, ustinov@tsagi.ru

В настоящее время имеются три альтернативных модели, описывающих генерацию волн Толлмина-Шлихтинга (ТШ) турбулентностью потока. Две из них [1, 2] утверждают, что их порождение происходит на неоднородности пограничного слоя вблизи передней кромки или вблизи точки потери устойчивости, а третья [3] считает причиной генерации волн неустойчивости нелинейное взаимодействие турбулентных пульсаций. В пользу последней модели свидетельствует нелинейная зависимость начальной амплитуды волн ТШ от степени турбулентности потока, следующая из корреляции Мэка [4]. Какая из этих моделей восприимчивости описывает реальный эксперимент условия полета до сих пор неясно. С целью ответа на этот вопрос в дан-ной работе выполнено численное моделирование ламинарно-турбулентного перехода вызванного турбулентностью потока. При этом использована упрощенная модель описывающая развитие периодических в направлениях параллельных поверхности возмущений по времени. В качестве начальных условий использованы результаты расчета развития периодической по пространству однородной изотропной турбулентности. Три состояния турбулентности с разной интенсивностью Tu = 0.1, 0.2, 0.5% и почти одинаковым интегральным масштабом использовались в описанных расчетах. В отличие от выполненных ранее исследований генерации волн неустойчивости вихревыми модами [5, 6] такой подход позволяет учесть влияние на ламинарно-турбулентный переход реального спектра турбулентных пульсаций и оценить роль нелинейных эффектов.

Расчеты показали, что турбулентность потока порождает в пограничном слое два вида возмущений: вытянутые в направлении потока полосчатые структуры и волны ТШ с заметно меньшим продольным периодом. Вначале доминируют длинноволновые

полосчатые структуры. В дальнейшем в спектрах по продольному волновому числу появляется максимум в диапазоне $\alpha=0.2\div0.4/\delta$.



(а) (б)

Рис. 1. Зависимости от времени нормированной на TU амплитуды возмущений (а), сравнение результатов расчетов в линейном (синие линии) и нелинейном (черные линии) приближении (б)

Зависимость амплитуды разных видов возмущений в пограничном слое от интенсивности начальной турбулентности показывает рис. 1. Из части (а) этого рисунка, где построены амплитуды нормированных на Tu возмущений, видно, что на линейной стадии перехода нормированные амплитуды длиннопериодических возмущений не зависят от Tu. Это означает их линейную зависимость от степени турбулентности потока. Однако кривые нарастания нормированных короткопериодических возмущений не совпадают. Это означает, что начальная амплитуда волн ТШ в пограничном слое нелинейно зависит от интенсивности исходной турбулентности. Более точно оценить роль нелинейных эффектов на разных стадиях перехода позволяет сравнение результатов расчетов развития возмущений, выполненных на основе решения полных и линеаризованных уравнений Навье-Стокса. Его результаты, показанные на рис. 1,б, наглядно демонстрируют, что нелинейность проявляется только на заключительной стадии перехода, когда суммарная амплитуда возмущений превышает 1%. Нелинейная зависимость начальной амплитуды короткопериодических возмущений от степени турбулентности потока, следующая из рис. 1,а, по всей видимости, объясняется нелинейной зависимостью амплитуды турбулентных пульсаций в соответствующем диапазоне волновых чисел

от Tu (или турбулентного числа Рейнольдса Rt). Этот спектр сильнее затухает при увеличении волновых чисел при малых Rt.

Амплитуда волны ТШ с заданным волновым числом находилась с помощью проецирования возмущений на собственную функцию уравнения Орра-Зоммерфельда. Сравнение полученных таким образом зависимостей амплитуды вынужденных возмущений с кривой нарастания рассчитанной по линейной теории устойчивости позволило локализовать место генерации волны ТШ. Такой метод показал, что она происходит, в основном, вблизи передней кромки. Вклад распределенной генерации на слабой неоднородности пограничного слоя заметно слабее. Амплитуда наиболее усиливающейся волны неустойчивости в нейтральной точке A_{TS0} зависит от степени турбулентности потока по степенному закону с показателем степени 1.5-1.9. Это соответствует линейными зависимостями N–фактора перехода от ln(Tu), аналогичным корреляции Мэка.

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

Литература

1. Goldstein M.E. The evolution of Tollmien–Schlichting waves near the leading edge//J. Fluid Mech. 1983. V.127. P. 59-81.
2. Жигулев В.Н, Федоров А.В. Исследование возбуждения волн Толлмина–Шлихтинга //Препринт СО АН СССР, 1982, с 27-33.
3. М.В. Устинов. Generation of Tollmien-Schlichting waves by free-stream turbulence// Fluid dynamics, 2014, No.4, p. 58-72.
4. Mack L.M. Transition prediction and linear stability theory // AGARD Conf. proc. CP-224. 1977. P. 1/1-22.
5. Parekh D.E., Pulin P., Wlezin R.W. Boundary layer receptivity to convected gusts and sound //Boundary Layer Stability and Transition to Turbulence FED-114/ Ed. C.L. Reda et al. N.Y.: ASME, 1991. P. 69–76.
6. Buter T.A., Reed H.L. Numerical investigations of receptivity to freestream vorticity // AIAA Paper. 1993. No. 93-0073.