

УДК 532.51;519.8

ПРЯМОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНОГО СВЕРХЗВУКОВОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ НА ПЛОСКОЙ ПЛАСТИНЕ

© 2011 г.

Д.В. Хотяновский, А.Н. Кудрявцев

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск

khotyanovsky@itam.nsc.ru

Поступила в редакцию 15.06.2011

На основе полных нестационарных уравнений Навье–Стокса сжимаемого газа проводится прямое численное моделирование (DNS) линейных и нелинейных стадий ламинарно-турбулентного перехода в пограничном слое на плоской пластине при числе Маха набегающего потока $M = 2$.

Ключевые слова: сверхзвуковой пограничный слой, переход к турбулентности, прямое численное моделирование.

На основе полных нестационарных уравнений Навье – Стокса сжимаемого газа проводится прямое численное моделирование (DNS) линейных и нелинейных стадий ламинарно-турбулентного перехода в пограничном слое на плоской пластине при числе Маха набегающего потока $M = 2$. Данная работа является частью исследовательского проекта, посвященного изучению нестационарных явлений, возникающих при отрыве пограничного слоя на плоской пластине, индуцированного падающей косой ударной волной. Численное моделирование проводится при параметрах потока, соответствующих экспериментам [1], выполненным в аэродинамической трубе Т-325 ИТПМ. Как показано в работе [1], начальные стадии ламинарно-турбулентного перехода на плоской пластине при $M = 2$ определяются ростом неустойчивых наклонных возмущений, распространяющихся под углом 50–60 градусов к направлению среднего течения. Данные результаты хорошо согласуются с предсказаниями линейной теории устойчивости. Нелинейные стадии перехода до сих пор плохо изучены. Результаты временного DNS [2, 3] указывают на то, что развивающиеся наклонные волны неустойчивости приводят к образованию в пограничном слое продольных, почти параллельных потоку, вихрей. Дальнейшие стадии перехода и формирования турбулентного течения предположительно связаны со своего рода вторичной неустойчивостью сдвиговых слоев [3], генерируемых этими квазипродольными вихрями. Недавние исследования, посвященные пространственному DNS [4], предлагают для описания механизма пе-

рехода так называемый сценарий «наклонного взрыва» (oblique breakdown) [5].

Цель данной работы – детальное исследование линейных и нелинейных стадий перехода в пограничном слое при $M = 2$. Наибольший интерес вызывают нелинейное развитие трехмерных возмущений, образование и развитие продольных вихревых структур и механизм вторичной неустойчивости. Интересным вопросом, который ранее не был исследован, является возможное резонансное взаимодействие наклонных волн возмущений.

Численные расчеты выполнены с помощью явной по времени программы для решения уравнений Навье – Стокса, основанной на WENO схеме высокого порядка точности. Моделирование проводится в предположении пространственного развития волн неустойчивости, что более физически обосновано, чем временное DNS. Граничные условия задают на входной границе автомодельное основное течение с наложенными на него флуктуациями, зависящими от времени. Для возбуждения волн на входе используются собственные функции неустойчивых возмущений линейной теории. Численное моделирование проводится, как правило, для случая двух симметричных фундаментальных волн неустойчивости, распространяющихся под углами χ и $-\chi$ к направлению основного течения. Результаты DNS демонстрируют значительное влияние начальной амплитуды возмущений во входном сечении. В численных расчетах наблюдается конкуренция двух процессов: роста неустойчивых возмущений в продольном направлении и изменения характеристик

устойчивости возмущения данной частоты в связи ростом толщины пограничного слоя. При малых начальных амплитудах (порядка $A = 1 \cdot 10^{-4}$) возмущения претерпевают фазу линейного роста и стабилизируются ниже по потоку. Характеристики возмущений малой амплитуды хорошо согласуются с результатами линейной теории устойчивости. Для возмущений достаточно большой начальной амплитуды ($A = 1 \cdot 10^{-3}$ и более) на нелинейной стадии наблюдается трансформация трехмерных волн неустойчивости в продольные вихревые структуры. Ядра продольных вихрей содержат области сдвиговой неустойчивости, в которых происходит нарастание многомасштабных трехмерных флуктуаций, что на больших расстояниях ниже по потоку приводит в конечном итоге к ламинарно-турбулентному переходу.

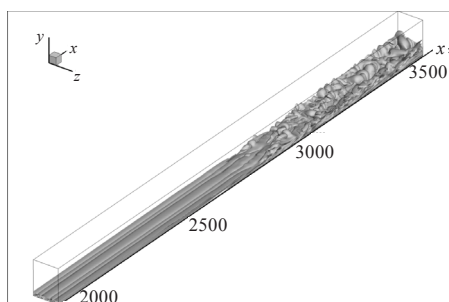


Рис. 1

Это проявляется в быстром изменении характеристик среднего течения: профилей скорости, поверхностного трения и т.д.

Продольные вихревые структуры и переход к турбулентности в пограничном слое на плоской пластине при числе Маха потока $M = 2$ показаны на рис. 1.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект №09-01-00524.

Список литературы

1. Kosinov A.D., Maslov A.A., Shevelkov S.G. Experiments on the stability of supersonic laminar boundary layers // J. Fluid Mech. 1990. Vol. 219. P. 621–633.
2. Sandham N.D., Adams N.A. Numerical simulation of boundary layer transition at Mach two // Applied Scientific Research. 1993. Vol. 51. P. 371–375.
3. Sandham N.D., Adams N.A., Kleiser L. Direct simulation of breakdown to turbulence following oblique instability waves in a supersonic boundary layer // Applied Scientific Research. 1995. Vol. 54. P. 223–234.
4. Von Terzi D., Mayer C., Fasel H. The late nonlinear stage of oblique breakdown to turbulence in a supersonic boundary layer // 7th IUTAM Symposium on Laminar-Turbulent transition, June 23–26, 2009, Stockholm, Sweden.
5. Fasel H., Thumm A., Bestek H. Direct numerical simulation of transition in supersonic boundary layers // Oblique breakdown. ASME-FED 151, 1993.

DIRECT NUMERICAL SIMULATION OF THE TRANSITIONAL SUPERSONIC BOUNDARY LAYER ON A FLAT PLATE

D.V. Khotyanovsky, A.N. Kudryavtsev

On the basis of full unsteady Navier–Stokes equations of compressible gas the direct numerical simulation of linear and non-linear stages of laminar-turbulent transition in the flat-plate boundary layer is performed at flow Mach number $M = 2$.

Keywords: supersonic boundary layer, transition to turbulence, direct numerical simulation.