

УДК 532.526.3

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ И ВОСПРИИМЧИВОСТИ ГИПЕРЗВУКОВЫХ ПОГРАНИЧНЫХ СЛОЕВ

© 2011 г.

В.Г. Судаков, А.В. Новиков, А.В. Федоров

Центральный аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского, г. Жуковский

vit_soudakov@mail.ru

Поступила в редакцию 16.05.2011

Проведено численное моделирование восприимчивости и устойчивости гиперзвуковых пограничных слоев. Рассматривается несколько конфигураций (пластина, острый и затупленный конус, угол сжатия, волнообразная стенка) и разные типы вводимых возмущений (быстрые и медленные акустические волны, волны завихренности и энтропии, температурные пятна, локальный периодический вдув–отсос, температурная неоднородность поверхности). Для пластины результаты расчетов сравниваются с теоретическими результатами. Рассмотрена возможность подавления высокочастотных возмущений в гиперзвуковом пограничном слое с помощью пористых покрытий.

Ключевые слова: восприимчивость, устойчивость, гиперзвуковой пограничный слой, численное моделирование.

Предсказание ламинарно-турбулентного перехода является важной задачей для проектирования высокоскоростных летательных аппаратов. Соответствующие экспериментальные исследования в гиперзвуковых аэродинамических трубах весьма ограничены. Прямое численное моделирование может восполнить этот пробел и дать детальную информацию о поле возмущений.

С помощью метода прямого численного моделирования, описанного в [1], было получено стационарное решение уравнений Навье – Стокса при числах Маха 5–6, которое удовлетворяет невозмущенным граничным условиям. Для исследования восприимчивости и устойчивости пограничного слоя начальные двумерные возмущения вводятся с помощью граничных условий (локальный периодический вдув–отсос на стенке, быстрые и медленные акустические волны, энтропийная или вихревая волна, температурные пятна в потоке или температурная неоднородность поверхности). Рассматриваются следующие геометрии: плоская пластина, острый и затупленный конус, угол сжатия, пластина с волнистой поверхностью.

Для случая плоской пластины результаты расчетов восприимчивости к акустическим волнам сравниваются с теоретической моделью восприимчивости около передней кромки, объединенной с двухмодовым приближением развития возмущений в пограничном слое. В этой теории возмущения пограничного слоя выра-

жаются как сумма возмущений двух мод F и S . Амплитудные коэффициенты этих мод подчиняются системе двух обыкновенных дифференциальных уравнений, которые учитывают взаимодействие между модами из-за эффекта непараллельности пограничного слоя. Начальные значения амплитудных коэффициентов определяются с использованием аналитического решения задачи восприимчивости около передней кромки. Затем численно решается задача Коши для коэффициентов. Рассмотрены различные углы наклона быстрой и медленной акустических волн. Сравнение показало хорошее соответствие расчетных и теоретических данных.

Вычисления при больших начальных амплитудах возмущения показывают нелинейное насыщение амплитуды основной гармоники, которое сопровождается быстрым ростом амплитуд второй и третьей гармоник. Около поверхности при этом образуются локальные отрывные зоны.

Исследовано влияние скачка температуры поверхности на развитие возмущений в гиперзвуковом пограничном слое. Такое граничное условие моделирует, например, стык разных материалов теплозащитного покрытия. Рассмотрены различные положения скачка на поверхности, как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения температуры.

Проведено аналогичное численное моделирование распространения возмущений в сверхзвуковом пограничном слое на остром конусе с

углом полураствора 7° при параметрах потока, соответствующих экспериментам [2], которые были проведены в аэродинамической трубе Т-326 ИТПМ СО РАН при числе Маха 5.95. Численное моделирование показывает, что амплитуда возмущений соответствует экспериментальным данным.

Рассмотрено сверхзвуковое течение около угла сжатия при числе Маха 5.373. Эта конфигурация напоминает стык поверхностей в канале воздухозаборника, отклонение управляющих поверхностей (таких, как балансировочные закрылки) и т.д. На рис. 1 показано мгновенное возмущение давления Δp_w на сплошной стенке. В отрывной области амплитуда возмущений резко падает, т.е. отрыв стабилизирует возмущение рассмотренной частоты. Вниз по потоку от точки присоединения возмущения быстро растут. Этот рост связан с неустойчивостью второй моды.

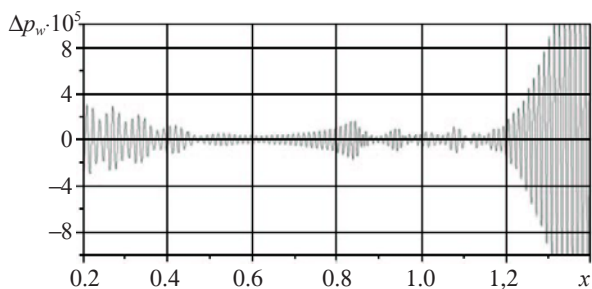


Рис. 1

Чтобы исключить этот рост, рассмотрена устойчивость отрывного сверхзвукового пристенного течения около волнообразной стенки. Возмущения типа вдув–отсос вводятся в пограничный слой выше по потоку от волнообразной области поверхности.

Вверх по потоку от первой отрывной области возмущения ведут себя подобно случаю плоской пластины. Затем они стабилизируются на волнообразной поверхности, которая трансформирует пограничный слой в слои смешения, соединяющие близлежащие впадины. Ниже по потоку от последней точки присоединения возмущения в пограничном слое ведут себя, как и в случае плоской пластины. Численное моделирование показывает, что амплитуда возмущений высокочастотной второй моды может быть уменьшена с помощью волнообразной стенки.

Теория устойчивости и эксперимент показывают, что в высокоскоростном, преимущественно двумерном пограничном слое может доминировать первая или вторая мода возмущений. При достаточно больших местных числах Маха вторая мода становится доминирующей. Так как температура поверхности типичного высокоскоростного

летательного аппарата существенно ниже температуры теплоизолированной стенки, неустойчивость первой моды подавляется естественным образом, тогда как вторая мода нарастает быстрее и может вызвать относительно ранний переход к турбулентности. В этих случаях для увеличения ламинарного участка обтекания необходимо стабилизировать возмущения второй моды, например, с помощью пассивных пористых покрытий, поглощающих ультразвук.

В настоящей работе исследовано влияние пористого покрытия на распространение возмущений различных мод пограничного слоя с помощью метода прямого численного моделирования. Граничные условия на пористой поверхности сформулированы на основе теоретической модели, которая объединяет возмущения нормальной компоненты скорости с возмущениями давления. Пористое покрытие эффективно снижает инкременты роста высокочастотных возмущений. В частности, амплитуда возмущений на пластине уменьшается в два раза на поверхности, покрытой слоем с 20% пористости. Для случая конуса расчеты показали, что пористое покрытие уменьшает амплитуду возмущений в пограничном слое до 4 раз, что соответствует экспериментальным данным [2]. В случае угла сжатия пористое покрытие позволило существенно уменьшить инкременты нарастания возмущений в присоединенном пограничном слое. Амплитуда возмущений уменьшилась при этом в 9 раз. На рис. 2 показано распределение Δp_w для случая пористой стенки. Численные исследования подтверждают возможность эффективной стабилизации второй моды гиперзвукового пограничного слоя посредством пористых покрытий.

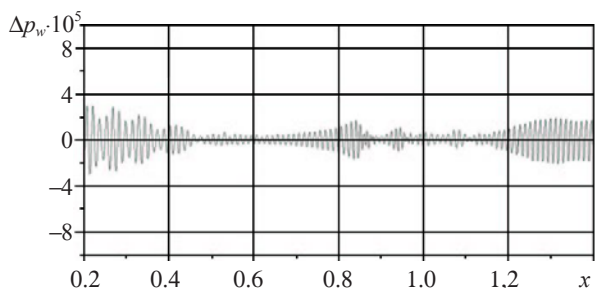


Рис. 2

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 09-08-00472).

Список литературы

1. Egorov I.V., Fedorov A.V., Soudakov V.G. Direct numerical simulation of disturbances generated by perio-

dic suction-blowing in a hypersonic boundary layer // Theoret. Comput. Fluid Dynamics. 2006. Vol. 20, No 1. P. 41–54.

2. Fedorov A.V. et al. Stability of hypersonic boundary layer on porous wall with regular microstructure // AIAA Paper No 2003-4147. 2003.

NUMERICAL SIMULATION OF STABILITY AND RECEPTIVITY OF HYPERSONIC BOUNDARY LAYERS

V.G. Soudakov, A.V. Novikov, A.V. Fedorov

Direct numerical simulation of receptivity and stability of hypersonic boundary layers is carried out. Several configurations (flat plate, sharp and blunt cone, compression corner, wavy wall) and different types of induced disturbances (fast and slow acoustic waves, vorticity and entropy waves, temperature spottiness, local periodic blowing–suction, temperature irregularity of the surface) are considered. The results predicted by numerical simulations are compared with theoretical ones. Possibility of suppression of high-frequency disturbances in the hypersonic boundary layer by porous coatings is considered.

Keywords: receptivity, stability, hypersonic boundary layer, direct numerical simulation.