

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОСПРИИМЧИВОСТИ СВЕРХЗВУКОВОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ К ЭНТРОПИЙНЫМ И ВИХРЕВЫМ ВОЗМУЩЕНИЯМ

Н.В. Пальчеховская^{1,2}

¹*Московский физико-технический институт, Долгопрудный,
palchekovskaia.nv@mipt.ru*

²*Центральный аэрогидродинамический институт им. проф.
Н.Е. Жуковского (ЦАГИ), г. Жуковский, МО*

Ламинарно-турбулентный переход (ЛТП) в среде с низким уровнем возмущений связан с возбуждением неустойчивых нормальных мод с малыми начальными амплитудами. Эти моды экспоненциально растут до критической амплитуды в соответствии с линейной теорией устойчивости (LST) и вызывают нелинейный распад. Целостное моделирование этих стадий ЛТП обеспечивается прямым численным моделированием (DNS). Летательные аппараты (ЛА) движутся на крейсерском режиме, как правило, на малых положительных углах атаки. Явления, связанные с ЛТП на подветренной стороне ЛА, представляются чрезвычайно важными, но в то же время мало изученными. В данной работе рассматривается восприимчивость пограничного слоя к энтропийным и вихревым возмущениям в случае перехода с преобладанием второй моды.

Ранее проводились исследования взаимодействия внешних возмущений с ударной волной на плоской пластине [1]. Восприимчивость к энтропийным и вихревым возмущениям, которые проходят через веер волн разрежения, выходящий из передней кромки тела, еще не исследовалась. Чтобы восполнить этот пробел, проведен DNS восприимчивости пограничного слоя на пластине к энтропийным волнам и волнам завихренности и роста неустойчивости для пограничного слоя на острой плоской пластине в свободном потоке с числом Маха $M = 6$ при различных углах атаки (AoA). Пограничный слой возмущается энтропийными волнами и волнами завихренности, проходящими через: ударную волну, вызванную телом при $AoA = -5^\circ$, слабую ударную волну, вызванную вязко-невязким взаимодействием при $AoA = 0^\circ$, и веер волн разрежения при $AoA = 5^\circ$. В отличие от

вышеупомянутых исследований DNS [1], расчеты проводятся для больших N-факторов ($N \sim 8.4$), имеющих отношение к переходу в слабо возмущенной среде. В работе рассмотрены случаи, когда доминирующая неустойчивость связана с плоскими волнами второй моды Мэка [2].

Численное моделирование проводилось с помощью решения системы уравнений Навье-Стокса в двумерной постановке. Уравнения решаются численно с использованием оригинального пакета программ [3], который реализует неявный метод конечного объема с аппроксимацией второго порядка по пространству и времени. Внешнее возмущение проникает в пограничный слой и возбуждает дискретные моды, включая моды F и S. Последние распространяются вниз по потоку, взаимодействуя между собой из-за эффекта непараллельности среднего потока, связанного с ростом толщины пограничного слоя. На некотором расстоянии вниз по потоку от передней кромки мода S становится неустойчивой, и ее амплитуда растет по экспоненте. В работе было проведено прямое численное моделирование (DNS) этого процесса, выделены моды S и F из DNS-решений с помощью метода декомпозиции и далее численные результаты сравнивались с теоретическими предсказаниями на основе двухмодового приближения (ТМА).

Целью работы является изучение физических механизмов, лежащих в основе восприимчивости и усиления неустойчивых режимов пограничного слоя на пластине в сверхзвуковом потоке газа. Для этого рассматривается случай сверхзвукового числа Маха ($M = 6$) и холодной стенки, в которой доминируют двумерные неустойчивые волны второй моды. На поверхности пластины задавались условия прилипания для скорости и изотермическое условие для температуры с температурным фактором $t_w = 0.3$. Сначала решалась задача установления течения над пластиной со свободным потоком с числом Маха $M = 6$, температурой $T_\infty = 80$ К, числом Рейнольдса $Re_\infty = 3 \cdot 10^7$. На полученное стационарное поле накладывались возмущения в виде энтропийной волны или волны завихренности с малой амплитудой $\epsilon = 10^{-5}$.

Используя начальные амплитуды F и S мод, можно предсказать распространение возмущений в пограничном слое вниз по потоку. На рис. 1 поле возмущений давления для случая

$\text{AoA} = 5^\circ$ и энтропийной волны показывает, что выше по течению от верха волн разрежения возмущения практически отсутствуют, но ниже по течению видны волновые колебания давления, связанные с энтропийными волнами. Этот факт согласуется с LST: за верхом разрежения или ударной волной генерируются все три вида малых возмущений, включая акустические.

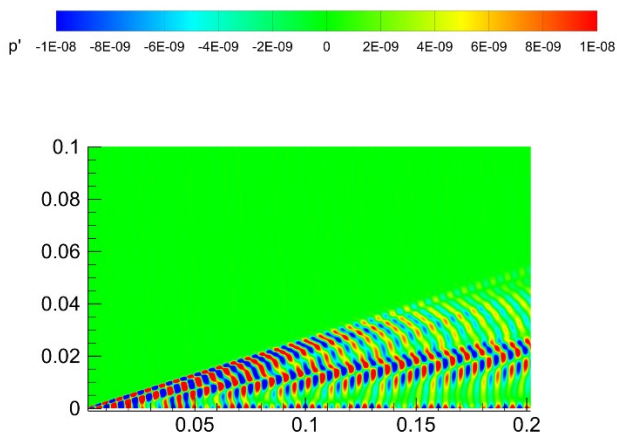


Рис. 1. Поле возмущений давления вблизи передней кромки для случая $\text{AoA}=5^\circ$ и энтропийных возмущений

Работа выполнена в Московском физико-техническом институте при поддержке гранта Российского научного фонда (проект N.21-79-00041).

Литература

1. Егоров И.В., Судаков В.Г., Федоров А.В. Численное моделирование восприимчивости сверхзвукового пограничного слоя к акустическим возмущениям. // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. 2006. N.1. с.42–53.
2. Mack L.M. Linear stability theory and the problem of supersonic boundary layer transition // AIAA J. 1975. V. 13. P.278–289.
3. Егоров И.В., Новиков А.В. Прямое численное моделирование ламинарно-турбулентного обтекания плоской пластины при гиперзвуковых скоростях потока // ЖВММФ. 2016. Т.56, N.6, с.145–162.