

УДК 532.526

**УСТОЙЧИВОСТЬ СВЕРХЗВУКОВОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ
НА ПОРИСТОЙ ПОВЕРХНОСТИ**

© 2011 г.

С.А. Гапонов, Б.В. Смородский

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

gaponov@itam.nsc.ru

Поступила в редакцию 16.05.2011

Теоретически исследована линейная и нелинейная стадии развития возмущений на непроницаемой и пористой поверхностях при числах Маха $M = 2$ и 6 . Важным результатом проведенных теоретических исследований является то, что путем сдвига фазы между возмущениями давления и нормальной компоненты скорости можно управлять началом ламинарно-турбулентного перехода пограничного слоя. Экспериментально и теоретически исследовано влияние проницаемости поверхности на устойчивость и ламинарно-турбулентный переход сверхзвукового пограничного слоя при $M = 2$. Получено хорошее количественное согласование данных линейной теории устойчивости и эксперимента для развития как естественных, так и искусственных (контролируемых) возмущений.

Ключевые слова: устойчивость, ламинарно-турбулентный переход, сверхзвуковой пограничный слой, пористая поверхность, естественные возмущения, числа Маха.

Известно, что использование разного рода волнистых и пористых поверхностей, щелевого отсоса, нагреваемых и охлаждаемых стенок сильно влияет на характер развития возмущений в пограничных слоях. Влияние это двоякое: оно может работать как на подавление возмущений определенного состава или природы, затягивая ламинарные участки течения, так и вызывать ускоренную турбулизацию пограничного слоя и интенсификацию обменных процессов. Заметим, что при исследованиях высокоскоростных потоков сжимаемого газа, кроме рассмотрения возмущений скорости, необходимо учитывать возмущения температуры и плотности. При высоких числах Маха, помимо вихревых колебаний (волны Толлмина – Шлихтинга (Т–Ш) или возмущения первой моды), необходимо рассматривать неустойчивые возмущения акустических мод, из которых в диапазоне наиболее быстро нарастающей является вторая мода [1]. Исследованы линейная и нелинейная стадии развития возмущений на непроницаемой и пористой поверхностях при числах Маха, примерно равных $M = 2$ и 6 , с учетом этих двух типов возмущений.

**1. Основные соотношения
и методы решения**

При моделировании рассматривается возмущенное поле скоростей u, v, w , плотности ρ_0 ,

давления p_0 и температуры T_0 сжимаемого газа в безразмерной декартовой системе координат [2]. Каждая из этих величин представляется в виде суммы: $q_0 = Q(Y) + \varepsilon q'$. За характерный линейный размер взята толщина пограничного слоя $\delta = (x\nu_e/U_e)^{1/2}$, где ν – кинематическая вязкость; индекс e соответствует параметрам на внешней границе пограничного слоя. Величины со штрихами и без штрихов – пульсационные и средние компоненты соответствующих величин; $\varepsilon \ll 1$. Все параметры потока отнесены к соответствующим значениям на внешней границе; числа Рейнольдса и Маха определяются соотношениями: $Re = (xU_e/\nu_e)^{1/2}$, $M = U_e/a_e$ (a – скорость звука). Решение строится методом разложения по малому параметру ε и двухмасштабному разложению продольной координаты x . Помимо «быстрого» масштаба X , вводится «медленный» масштаб $\xi = \varepsilon X$, они характеризуют изменения фазы и амплитуды возмущений соответственно. Решения для волн ищутся в виде $q' = A(\xi)q(Y)\exp(i\theta)$, $\theta = \int \alpha dX + \int \beta dZ - \omega t$. Здесь A – медленно меняющаяся амплитуда $\alpha = \alpha^r + i\alpha^i$, α^i – инкремент; волновые числа α, β и частота ω связаны дисперсионным соотношением линейной теории $\alpha = \alpha(\beta, \omega)$. Нелинейные уравнения задачи имеют вид:

$$\begin{aligned} & [\rho(Gu + U_Y v) + i\alpha p / (\gamma M^2)] - \\ & - (\mu / Re) u_{YY}] \exp(i\theta) = -F_u, \\ & [\rho Gw + i\beta p / (\gamma M^2)] - (\mu / Re) w_{YY}] \exp(i\theta) = -F_w, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 [\rho G v + p_Y / (\gamma M^2)] \exp(i\theta) &= -F_v, \\
 [G \zeta + \rho_Y v + p(i\alpha u + v_Y + i\beta w)] \exp(i\theta) &= -F_p, \\
 [\rho(G\Theta + T_Y v) + (\gamma - 1)(i\alpha u + v_Y + \\
 + i\beta w) - \mu\gamma / (\sigma \text{Re}) \Theta_{YY}] \exp(i\theta) &= -F_\Theta, \\
 \zeta &= \rho(p/P - \Theta/T), \quad G = i(-\omega + \alpha U).
 \end{aligned}$$

Здесь левая часть – уравнения Дана-Линя [2], умноженные на $\exp(i\theta)$, а F_q – нелинейные члены.

Задача рассматривается в рамках модели взаимодействия трех волн, синхронизованных по фазе $\theta_1 = \theta_2 + \theta_3$. Соответствующие амплитудные уравнения имеют вид:

$$\begin{aligned}
 dA_1 / d\xi &= -\alpha_1^i A_1 + S_{2,3}^j A_2 A_3 \exp(i\Delta), \\
 dA_2 / d\xi &= -\alpha_2^i A_2 + S_{1,3}^k A_1 A_3^* \exp(i\Delta), \\
 dA_3 / d\xi &= -\alpha_3^i A_3 + S_{1,2}^l A_1 A_2^* \exp(i\Delta),
 \end{aligned}$$

где $\Delta = \int (\alpha_2 + \alpha_3 - \alpha_1) dX$.

Для возмущений ставятся следующие краевые условия: $u, v, w, \theta = 0$ при $Y = \infty$, а на стенке – $u, w, \theta = 0$ и $v(0) = Kp(0)$, предложенные в [2]. На непроницаемой поверхности $K = 0$. Заметим, что K зависит от размера пор r и пористости n .

2. Результаты и обсуждения

На рис. 1 приведены изолинии степеней пространственного усиления в плоскости: фаза и амплитуда акустической проводимости K ($M = 2.0$, $\text{Re} = 600$, $F = 50 \cdot 10^{-6}$, $\chi = 0$). Видно, что устойчивость существенно зависит от фазы K .

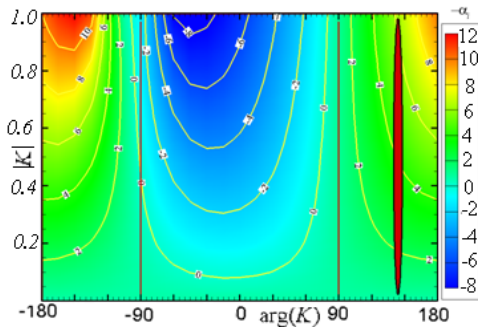


Рис. 1

Для модели пористого покрытия [2] параметр K изменяется в узкой полосе вблизи $\arg(K) = 140^\circ$. Из рис. 1 следует, что пористое покрытие при $M = 2$ будет дестабилизировать течение в пограничном слое. Этот вывод подтверждается рис. 2, где показана зависимость степеней пространственного усиления от $\chi = \text{arctg}(\beta/\alpha')$ для разных значений размера пор и пористости $n = 0.5$. С увеличением размера пор степени усиления увеличиваются, а их значения становятся слабо зависящими от ориентации волны при $\chi < 50^\circ$.

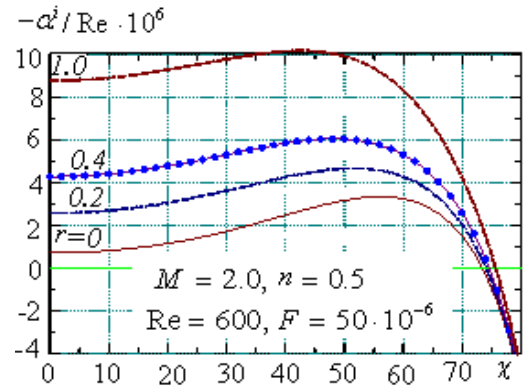


Рис. 2

На рис. 3 показаны инкременты пространственного роста двумерных (2D) и трехмерных (3D) волн при числе Маха $M = 5.35$ в зависимости от частоты для теплоизолированной пористой и непроницаемой поверхности. Максимальные значения инкрементов в области больших F соответствуют второй (акустической) моде. Второй максимум в области низких частот соответствует первой вихревой моде. Инкременты вихревых волн увеличиваются (течение в пограничном слое дестабилизируется), как и при $M = 2$, а акустические возмущения стабилизируются на пористой поверхности.

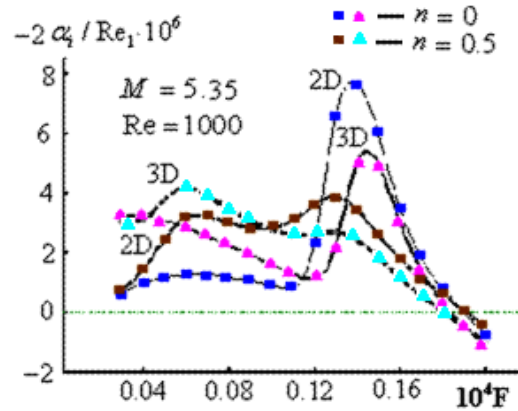
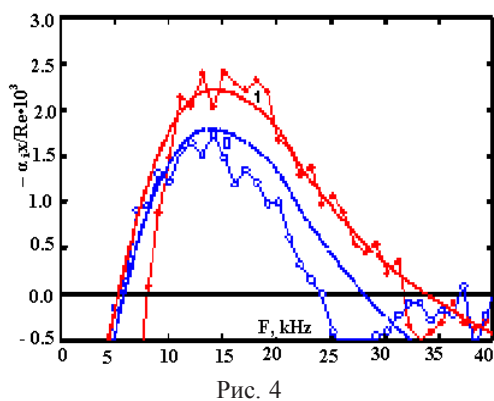


Рис. 3

Выводы относительно нелинейных волн в целом согласуются с выводами линейной теории. Дана более подробная информация о результатах теоретических исследований линейной и нелинейной устойчивости высокоскоростных течений в пограничном слое, включая течения на охлаждаемых поверхностях.

В заключение приведено сопоставление теоретических данных с экспериментальными результатами, полученными для естественных возмущений при $M = 2$. В качестве модели использовалась теплоизолированная плоская пластина с вставками: 1) непроницаемой – вставка 0), 2) пористой

($n = 0.39$, диаметром пор 10 мкм) – вставка 1.



На рис. 4 показаны экспериментальная и расчетная зависимости степеней нарастания возмущений от частоты возмущения. Дополнительные результаты показывают, что имеется хорошее со-

гласование теории и эксперимента как по скоростям роста возмущений, так и по кривым нарастания. Для более полного и детального сопоставления данных теории и опыта проведены эксперименты в контролируемых условиях с возбуждением искусственных возмущений в пограничном слое на пористой поверхности.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект 11-01-00047-а.

Список литературы

1. Гапонов С.А., Маслов А.А. Развитие возмущений в сжимаемых потоках. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-е, 1980.
2. Гапонов С.А., Терехова Н.М. Трехволновые взаимодействия возмущений в гиперзвуковом пограничном слое на непроницаемой и пористой поверхностях // Изв. РАН. МЖГ. 2009. №3. С. 36–46.

STABILITY OF A SUPERSONIC BOUNDARY LAYER ON A POROUS SURFACE

S.A. Gaponov, B.V. Smorodsky

The linear and nonlinear stage of the disturbances development on impenetrable and porous surfaces is investigated theoretically at Mach numbers of $M = 2$ and 6. The important result of this theoretical study is that using the phase shift between disturbances of pressure and normal velocity component it is possible to control the beginning of laminar-turbulent transition of a boundary layer. The effect of permeability of a surface on the stability and laminar-turbulent transition of a supersonic boundary layer at $M = 2$ is investigated experimentally and theoretically. Good quantitative agreement of the data of the linear stability theory and the experiment is achieved both for natural and artificial (controllable) disturbance.

Keywords: stability, laminar-turbulent transition, supersonic boundary layer, the porous surface, natural disturbances, Mach numbers.