

03

Экспериментальное исследование влияния параметров пассивного пористого покрытия на развитие возмущений в гиперзвуковом пограничном слое

© С.В. Лукашевич, С.О. Морозов, А.Н. Шиплюк

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича
СО РАН, Новосибирск
E-mail: morozovsergeynsk@gmail.com

В окончательной редакции 14 августа 2012 г.

Проведены экспериментальные исследования влияния толщины и степени пористости пассивного пористого покрытия на развитие естественных возмущений в гиперзвуковом пограничном слое на модели острого конуса при числе Маха $M_\infty = 6$, нулевом угле атаки и единичных числах Рейнольдса $Re_{1\infty} = (2.6, 4.6, 6.6) \cdot 10^6 \text{ m}^{-1}$. Показано, что существует оптимальная толщина пассивного пористого покрытия, соответствующая максимальной стабилизации возмущений второй моды.

Ламинарно-турбулентный переход приводит к значительному увеличению сопротивления трения и аэродинамического нагрева, поэтому одной из важнейших задач аэротермодинамики является управление ламинарно-турбулентным переходом. Наиболее перспективным методом управления при гиперзвуковых скоростях потока является использование пассивных пористых покрытий, поглощающих ультразвук.

В [1] было теоретически показано, что используя поглощающее ультразвук покрытие, представляющее из себя тонкий слой с пористой микроструктурой, возможно уменьшить степень нарастания возмущений второй моды, что должно привести к увеличению протяженности ламинарного участка. Так же расчеты показали, что эффективность поглощения пористым покрытием возмущений определенных частот максимальна при определенной толщине покрытия.

В экспериментальных исследованиях [1] по задержке ламинарно-турбулентного перехода с помощью пассивного пористого покрытия на остром конусе показали увеличение протяженности ламинарного

течения до 2 раз и более. В ИТПМ СО РАН проведены исследования влияния пассивных пористых покрытий с хаотической и регулярной микроструктурами на развитие естественных и контролируемых возмущений в гиперзвуковом пограничном слое [2–5]. Детальное сравнение волновых характеристик возмущений второй моды, полученных в экспериментах с расчетными результатами, показало хорошее количественное соответствие и подтвердило концепцию применения пассивного пористого покрытия для стабилизации гиперзвукового пограничного слоя.

В данной работе исследовалось влияние пассивного пористого покрытия различной толщины и различной степени пористости на развитие естественных возмущений в гиперзвуковом пограничном слое на остром конусе.

Эксперименты проведены в аэродинамической трубе кратковременного действия Транзит-М ИТПМ СО РАН. Число Маха набегающего потока составляло $M = 6$, число Рейнольдса $Re_{1\infty} = (2.6, 4.6, 6.6) \cdot 10^6 \text{ m}^{-1}$, температура торможения $T_0 = 360 \pm 5 \text{ K}$, температура поверхности модели $T_w = 295 \pm 1 \text{ K}$, угол атаки $\alpha = 0^\circ \pm 2'$.

Экспериментальная модель выполнена в виде острого конуса с полууглом раскрытия 7° , длиной $L = 0.42 \text{ m}$. На расстоянии 0.355 m от носика располагалась вставка протяженностью $l = 27 \text{ mm}$ с пористыми участками различной толщины, которая имела возможность поворачиваться вокруг оси модели для смены исследуемого пористого покрытия. Для экспериментального определения степеней нарастания естественных возмущений измерялись пульсации давления на поверхности модели в двух точках: до и после вставки.

Пористая поверхность состояла из нескольких слоев плетеной сетки, изготовленной из металлической проволоки. Использовались сетки двух размеров с диаметром проволоки $d = 0.025 \text{ mm}$, шириной отверстия сетки $w = 0.1 \text{ mm}$, пористостью $S = 64\%$ и с $d = 0.05 \text{ mm}$, $w = 0.1 \text{ mm}$, $S = 44\%$. Степень пористости S определялась как $S = w^2 / (d + w)^2$. Для образования пористого покрытия различной толщины сетки накладывались друг на друга, каждый слой под углом 45° относительно предыдущего. Таким образом, для сетки с пористостью $S = 64\%$ получены пористые покрытия толщиной $h_1 = 0.04, 0.07, 0.12, 0.15, 0.24, 0.34, 0.39 \text{ mm}$ и для сетки с пористостью 44% , пористые покрытия толщиной $h_2 = 0.11, 0.18, 0.27, 0.36, 0.43 \text{ mm}$.

Для измерения пульсационных характеристик пограничного слоя использовались высокочастотные датчики давления 132A31 производства РСВ (США), которые позволяют измерять пульсации давления с частотой до 1 МГц. Датчики были установлены на стенке модели до и после вставки с пористыми покрытиями ($x_1 = 0.3527$ м, $x_2 = 0.3949$ м). Данные с датчиков давления снимались с частотой дискретизации $f_d = 2$ МГц.

По результатам измерений получены спектры пульсации давления P_{x1} и P_{x2} на поверхности конуса в двух точках x_1 и x_2 . По измеренным спектрам вычислены степени роста $-\alpha_i$ по формуле:

$$-\alpha_i = \frac{\ln \frac{P_{x2}}{P_{x1}}}{2(\sqrt{\text{Re}_{x2}} - \sqrt{\text{Re}_{x1}})}.$$

Пример результатов эксперимента для числа Рейнольдса $\text{Re}_{1\infty} = 4.6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$ и пористых покрытий с $S = 64\%$ и $S = 44\%$ показан на рис. 1 в виде зависимости степеней роста от частоты. Здесь $h^* = h/\delta^*$ — безразмерная толщина пористого покрытия, нормированная на расчетную толщину вытеснения пограничного слоя δ^* . Интересующие нас возмущения второй моды, которые наиболее интенсивно нарастают в гиперзвуковом пограничном слое, вызывая ламинарно-турбулентный переход, находятся в диапазоне частот $f = (75 - 200)$ кГц. Из графиков видно, что в сравнении со сплошной поверхностью на пористых поверхностях с толщинами менее $h^* = 0.068$ для $S = 64\%$ и $h^* = 0.122$ для $S = 44\%$ наблюдается увеличение максимальных значений степеней роста и смещение пиков в сторону низких частот. Начиная с толщин $h^* = 0.068$ для $S = 64\%$ и $h^* = 0.122$ для $S = 44\%$ и более, максимальные значения степеней роста меньше, чем на сплошной поверхности, и так же смещены в сторону низких частот. Стоит отметить, что для $f < 115$ кГц значения степеней роста на пористых покрытиях почти всегда больше, чем на сплошной поверхности, а в области частот $f = (115 - 140)$ кГц меньше для пористых покрытий толщиной $h^* = 0.068$ для $S = 64\%$ и $h^* = 0.122$ для $S = 44\%$ и более. При этом в области частот $f = (140 - 210)$ кГц наблюдается значительное подавление возмущений практически для всех пористых покрытий.

На рис. 2 показаны зависимости степеней роста для частот, соответствующих диапазону частот второй моды от безразмерной толщины пористого покрытия для $\text{Re}_{1\infty} = 4.6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$. Нулевая толщина соответствует сплошной поверхности. Видно, что практически для всех при-

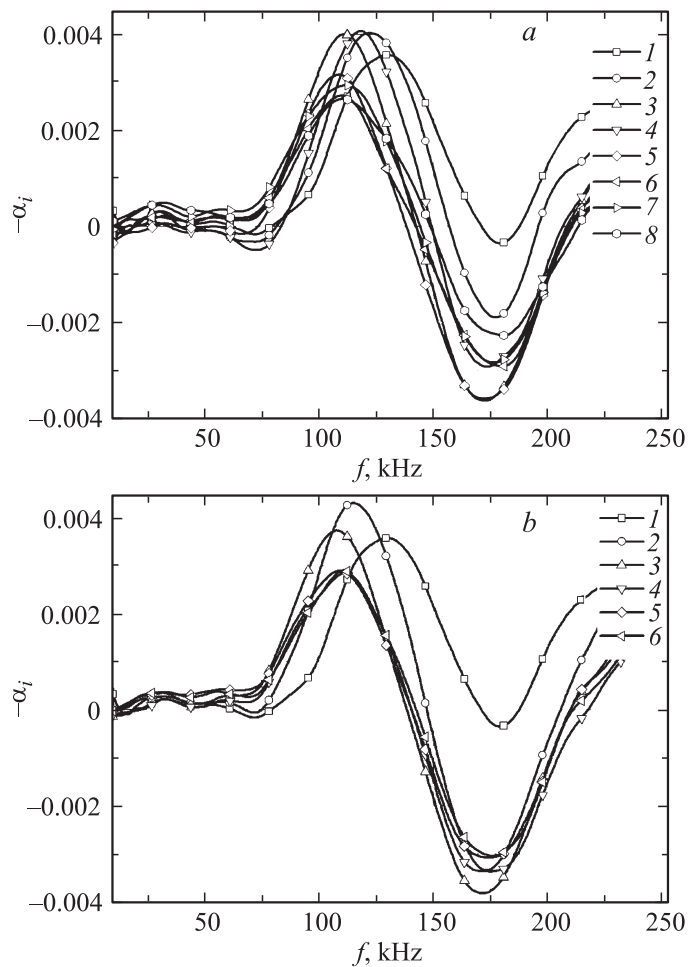


Рис. 1. Степени роста для $Re_{1\infty} = 4.6 \cdot 10^6 \text{ m}^{-1}$. *a*: 1 — сплошная поверхность, 2–8 — пористая поверхность ($S = 64\%$), $h^* = 0.018, 0.032, 0.055, 0.068, 0.109, 0.155, 0.177$ соответственно; *b*: 1 — сплошная поверхность, 2–6 — пористая поверхность ($S = 44\%$), $h^* = 0.05, 0.081, 0.122, 0.164, 0.195$ соответственно.

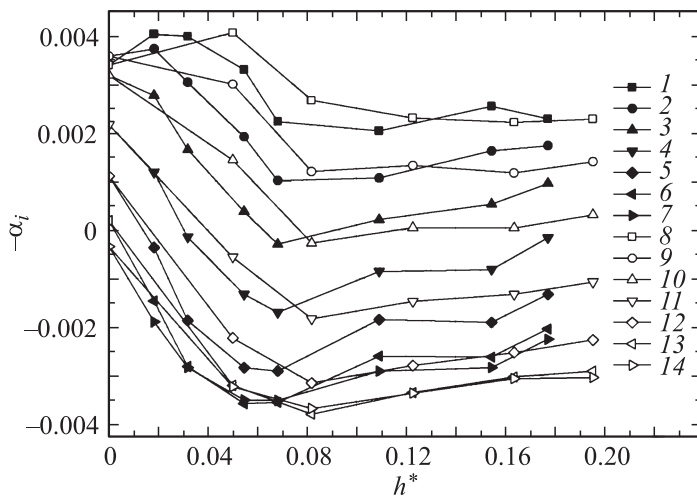


Рис. 2. Степени роста для $Re_{1\infty} = 4.6 \cdot 10^6 \text{ m}^{-1}$. 1, 8 — 122 kHz; 2, 9 — 131 kHz; 3, 10 — 140 kHz; 4, 11 — 150 kHz; 5, 12 — 159 kHz; 6, 13 — 168 kHz; 7, 14 — 178 kHz. Закрашенные символы $S = 64\%$, пустые символы $S = 44\%$.

веденных частот минимум степеней роста для исследованных толщин достигается при толщине пористого покрытия $h^* = 0.068$ для $S = 64\%$ и $h^* = 0.081$ для $S = 44\%$. При дальнейшем увеличении толщины пористого покрытия значения степени роста немного возрастают и практически не зависят от толщины пористости. Таким образом, можно говорить о существовании оптимальной толщины пористого покрытия, при которой происходит максимально эффективная стабилизация возмущений второй моды.

Для оценки эффективности пористых покрытий вычислены изменения степеней роста в зависимости от толщины покрытия. Результаты приведены на рис. 3 для частот, соответствующих максимальной амплитуде возмущений второй моды. Видно, что для исследования толщин при $Re_{1\infty} = 2.6 \cdot 10^6 \text{ m}^{-1}$ оптимальной является толщина пористого покрытия $h^* = 0.05 \div 0.08$ для $S = 64\%$ и $h^* = 0.06 \div 0.09$ для $S = 44\%$, при $Re_{1\infty} = 6.6 \cdot 10^6 \text{ m}^{-1}$ $h^* = 0.079$ для $S = 64\%$ и $h^* = 0.142$ для $S = 44\%$. При этом максимальное уменьшение степени роста для $S = 64\%$ и $S = 44\%$ практически одинаково.

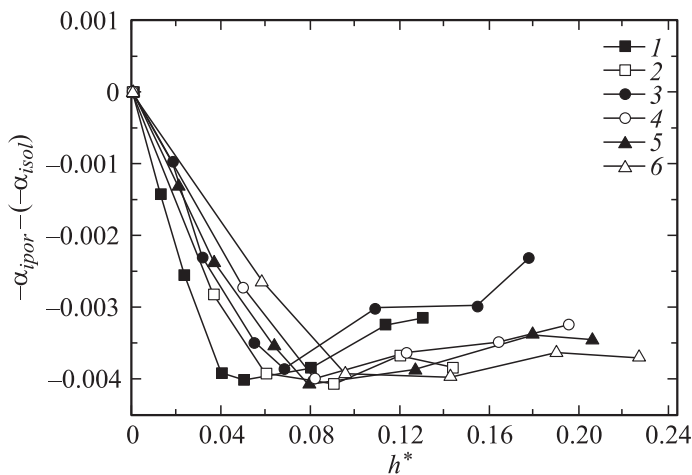


Рис. 3. Изменение степеней роста на пористой поверхности. 1, 2 — $Re_{1\infty} = 2.6 \cdot 10^6 \text{ m}^{-1}$, $f = 115 \text{ kHz}$; 3, 4 — $Re_{1\infty} = 4.6 \cdot 10^6 \text{ m}^{-1}$, $f = 150 \text{ kHz}$; 5, 6 — $Re_{1\infty} = 6.6 \cdot 10^6 \text{ m}^{-1}$, $f = 180 \text{ kHz}$. Закрашенные символы $S = 64\%$, пустые символы $S = 44\%$.

Таким образом, экспериментально получены оптимальные значения толщины пассивных пористых покрытий с различной степенью пористости. Показано, что при дальнейшем увеличении толщины эффективность пористого покрытия немного уменьшается и выходит на постоянный уровень.

Список литературы

- [1] Fedorov A.V., Malmuth N., Rasheed A., Hornung H.G. // AIAA Journal. 2001. V. 39. N 4. P. 605.
- [2] Fedorov A.V., Shipliyuk A.N., Maslov A.A., Burov E.V., Malmuth N.D. // Journal of Fluid Mechanics. 2003. V. 479. P. 99.
- [3] Fedorov A.V., Kozlov V.F., Shipliyuk A.N., Maslov A.A., Sidorenko A.A., Burov E.V., Malmuth N.D. // AIAA Paper 2003-4147, 2003.
- [4] Maslov A.A., Shipliyuk A.N., Sidorenko A.A., Polivanov P., Fedorov A.V., Kozlov V.F., Malmuth N.D. // AIAA Paper 2006-1112, 2006.
- [5] Бунтин Д.А., Лукашевич С.В., Маслов А.А., Шиплюк А.Н. // Изв. РАН. МЖГ. 2010. № 6. С. 74.