

УДК 532.526.3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАССИВНОГО ПОРИСТОГО ПОКРЫТИЯ НА ВОЗМУЩЕНИЯ В ГИПЕРЗВУКОВОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ. 1. ВЛИЯНИЕ ПРОТЯЖЕННОСТИ ПОРИСТОГО ПОКРЫТИЯ

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

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН,
630090 Новосибирск
E-mail: Lukashevich@itam.nsc.ru

Экспериментально исследовано влияние пассивного пористого покрытия различной протяженности на вторую моду возмущений в гиперзвуковом пограничном слое. Эксперименты проводились при обтекании под нулевым углом атаки острого конуса с полууглом раствора при вершине, равным 7° , при числе Маха набегающего потока $M_\infty = 5,8$ для пяти единичных чисел Рейнольдса. Одна половина поверхности модели вдоль образующей была покрыта пористым материалом, другая половина представляла собой сплошную поверхность. Измерены пульсации давления на поверхности модели. Обнаружено, что наличие пассивного пористого покрытия может приводить как к уменьшению, так и к увеличению амплитуды второй моды. Найдены значения протяженности пассивного пористого покрытия, соответствующие максимальной эффективности его воздействия на возмущения в потоке, и значения протяженности, при которых амплитуда второй моды увеличивается.

Ключевые слова: эксперимент, гиперзвуковой пограничный слой, вторая мода возмущений, пассивное пористое покрытие.

Введение. Создание методов управления ламинарно-турбулентным переходом является одной из важнейших задач современной гиперзвуковой аэротермодинамики. При ламинарно-турбулентном переходе на поверхности летательного аппарата значительно увеличиваются тепловые потоки и сопротивление трения. При этом возникает необходимость использования жаропрочных материалов и способов активного охлаждения поверхности, а также корректировки траектории полета, что приводит к увеличению массы гиперзвукового летательного аппарата и его стоимости.

В гиперзвуковом пограничном слое наиболее неустойчивыми являются возмущения второй моды. Для стабилизации гиперзвукового пограничного слоя предложено использовать пассивные пористые покрытия [1]. Расчеты с использованием линейной теории устойчивости [1–4] показали, что пассивное пористое покрытие частично поглощает энергию второй моды возмущений, вследствие чего протяженность ламинарного участка может увеличиться. Результаты экспериментальных исследований влияния покрытий с регулярной [1] и хаотической [5] микроструктурой на ламинарно-турбулентный переход подтвердили возможность увеличения протяженности ламинарного участка.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 12-08-31514, 12-08-00784).

© Лукашевич С. В., Морозов С. О., Шиплюк А. Н., 2013

Экспериментальные исследования развития возмущений на поверхности острого конуса с пассивным пористым покрытием проведены в [2–4, 6]. Исследовалось развитие естественных возмущений и искусственных волновых пакетов. Сравнение экспериментальных данных с расчетными показало, что они хорошо согласуются. Таким образом, экспериментально подтвержден теоретически предсказанный способ стабилизации возмущений [1–4].

Результаты экспериментальных исследований нелинейной стадии ламинарно-турбулентного перехода в гиперзвуковом пограничном слое на пористой и сплошной поверхностях конуса представлены в [7] для искусственных возмущений и в [8, 9] для естественных. Установлено, что на пористой поверхности нелинейные процессы развиваются медленнее, чем на сплошной. Это приводит к задержке ламинарно-турбулентного перехода на пористой поверхности.

В [10] экспериментально исследовано влияние толщины и степени пористости пассивного покрытия на вторую моду возмущений. Показано, что с увеличением толщины пористого покрытия до определенного значения его эффективность возрастает. Дальнейшее увеличение толщины не приводит к росту эффективности, при этом максимальная степень стабилизации второй моды для покрытий с пористостью, равной 44 и 64 %, практически одна и та же. Результаты расчетов [11], выполненных для условий эксперимента [10], хорошо согласуются с экспериментальными данными. В работе [12] представлены результаты численного исследования влияния формы и размеров пор на характер возмущений в потоке, которые также согласуются с данными эксперимента [10].

В настоящей работе приводятся результаты экспериментального исследования влияния протяженности пассивного пористого покрытия на возмущения второй моды.

Методика измерений. Эксперименты выполнены в гиперзвуковой аэродинамической трубе кратковременного действия “Транзит-М” при числе Маха $M_\infty = 5,8$ и значениях единичного числа Рейнольдса $Re_{1\infty} = (2,6 \div 13,2) \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$.

Модель представляет собой острый конус с полууглом раствора, равным 7° , длина образующей составляет 353 мм (рис. 1). Температура поверхности модели $T_w = (295 \pm 1) \text{ К}$. Угол атаки $\alpha = 0^\circ \pm 2'$.

На одной половине модели в области $67 \text{ мм} \leq x \leq 334 \text{ мм}$ расположено пористое покрытие, изготовленное из трех слоев нейлоновой сетки, размеры которой соответствуют размерам сетки с пористостью 44 %, использованной в [10]. Слои повернуты относительно друг друга на угол, равный 45° . Наиболее эффективная толщина покрытия $h = 0,18 \text{ мм}$ выбрана на основе результатов исследований [10].

Для изменения протяженности часть пассивного пористого покрытия заклеивалась тонкой клейкой лентой толщиной 30 мкм. Протяженность покрытия увеличивалась вдоль образующей конуса от точки $x_0 = 334 \text{ мм}$ к носику модели (см. рис. 1).

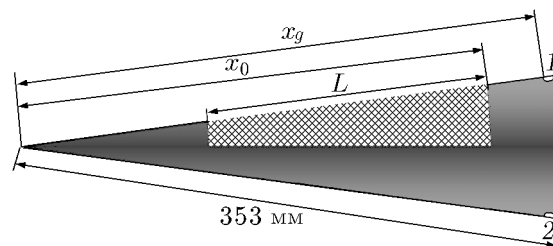


Рис. 1. Схема модели:

L — протяженность пассивного пористого покрытия, x_0 — расстояние от носика конуса до правого конца пассивного пористого покрытия, x_g — расстояние от носика до датчиков давления, 1, 2 — высокочастотные датчики давления

Для исследования естественных возмущений с помощью двух высокочастотных датчиков давления РСВ132А31 проведены измерения пульсаций давления на стенке модели в диапазоне $11 \div 1000$ кГц. Эти датчики устанавливались на сплошной поверхности и на поверхности, где расположено пористое покрытие, на расстоянии $x_g = 343$ мм от носика модели.

Погрешность измерений. Для определения погрешности измерений амплитуды максимумов второй моды получены спектры пульсаций давления для серий измерений, выполненных при различных единичных числах Рейнольдса на сплошной поверхности. В каждой серии получено 16 спектров пульсаций давления при одних и тех же параметрах набегающего потока. Вычислены значения среднеквадратичных отклонений S_n амплитуд максимумов второй моды возмущений на сплошной поверхности:

$$S_n = \left(\frac{1}{n-1} \sum_1^n (\langle P_{s \max} \rangle - P_{s \max}^i)^2 \right)^{1/2}$$

(n — количество измерений; $P_{s \max}$ — максимум амплитуды второй моды возмущений на сплошной поверхности). Для анализа результатов экспериментов более целесообразно использовать относительную величину среднеквадратичной ошибки — коэффициент вариации

$$w = \frac{S_n}{\langle P_{s \max} \rangle} \cdot 100 \text{ \%}.$$

При $Re_{1\infty} = 4,6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$ $w = \pm 5 \text{ \%}$, при $Re_{1\infty} = 6,6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$ $w = \pm 4 \text{ \%}$, при $Re_{1\infty} = 10^7 \text{ м}^{-1}$ $w = \pm 5 \text{ \%}$. Доверительной вероятности $\beta = 0,95$ соответствует доверительный интервал длиной $2w$ [13].

Результаты экспериментов. Для определения влияния протяженности пассивного пористого покрытия на возмущения в пограничном слое проводились сравнения спектральных характеристик пульсаций давления на сплошной поверхности и на поверхности с пористым покрытием.

На рис. 2 представлены спектры пульсаций давления на сплошной поверхности конуса при различных значениях единичного числа Рейнольдса, нормированные на среднее значение давления, а также показаны доверительные интервалы. Видно, что вторая мода является

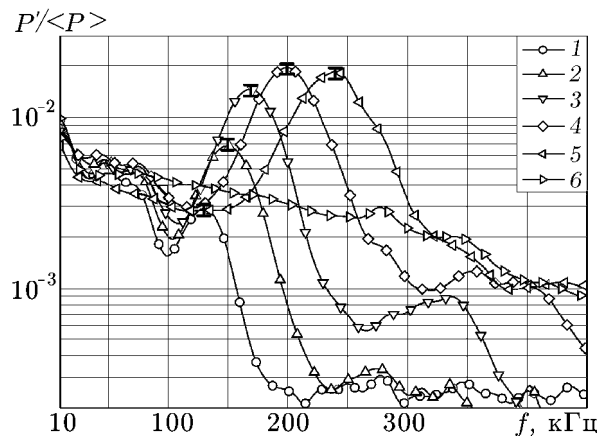


Рис. 2. Спектры пульсаций давления на сплошной поверхности конуса:
 1 — $Re_{1\infty} = 2,6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$; 2 — $Re_{1\infty} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$; 3 — $Re_{1\infty} = 4,6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$;
 4 — $Re_{1\infty} = 6,6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$; 5 — $Re_{1\infty} = 10^7 \text{ м}^{-1}$; 6 — $Re_{1\infty} = 13,6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$

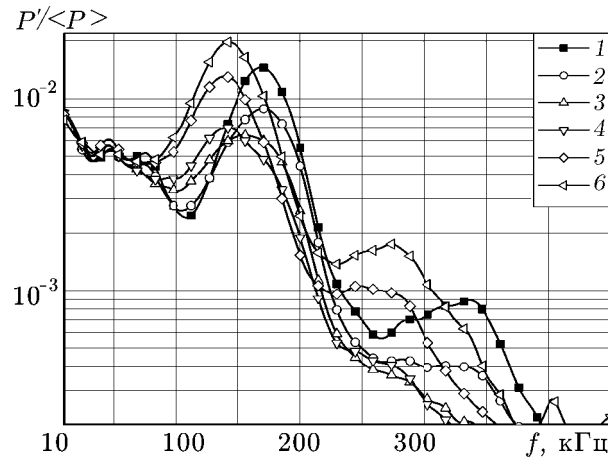


Рис. 3. Спектры пульсаций давления на поверхности конуса при $Re_{1\infty} = 4,6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$:
 1 — сплошная поверхность, 2–6 — пассивное пористое покрытие различной длины (2 — $L^* = 0,06$; 3 — $L^* = 0,17$; 4 — $L^* = 0,28$; 5 — $L^* = 0,44$; 6 — $L^* = 0,78$)

доминирующим возмущением. В точке измерения на сплошной поверхности пограничный слой является ламинарным при $Re_{1\infty} = 2,6 \cdot 10^6$; $3,6 \cdot 10^6$; $4,6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$, переходным при $Re_{1\infty} = 6,6 \cdot 10^6$; 10^7 м^{-1} и турбулентным при $Re_{1\infty} = 13,6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$. Так как в данной работе исследуется влияние пористого покрытия на вторую моду возмущений, значение $Re_{1\infty} = 13,6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$, соответствующее турбулентному пограничному слою, далее не рассматривается. Числам Рейнольдса $Re_{1\infty} = 2,6 \cdot 10^6$; $3,6 \cdot 10^6$; $4,6 \cdot 10^6$; $6,6 \cdot 10^6$; 10^7 м^{-1} соответствуют диапазоны частот второй моды возмущений $f = 100 \div 180$; $105 \div 220$; $105 \div 230$; $130 \div 270$; $150 \div 320 \text{ кГц}$.

На рис. 3 представлены спектры пульсаций давления на сплошной поверхности конуса и поверхности с пассивным пористым покрытием различной протяженности $L^* = L/x_g$ при $Re_{1\infty} = 4,6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$. Видно, что на части поверхности конуса с пористым покрытием протяженностью $L^* = 0,06 \div 0,44$ максимум амплитуды второй моды возмущений меньше, чем на сплошной поверхности. Наименьшее значение достигается при $L^* = 0,17$, а дальнейшее увеличение протяженности приводит к увеличению амплитуды второй моды: при $L^* = 0,44$ она становится практически равной амплитуде на сплошной поверхности, а при $L^* = 0,78$ превышает ее. Также видно, что частота колебаний максимума второй моды, которая на сплошной поверхности равна $f = 170 \text{ кГц}$, на пористой поверхности ($L^* = 0,28 \div 0,78$) уменьшается до значения $f = 140 \text{ кГц}$.

При $f = 340 \text{ кГц}$ на сплошной поверхности видна вторая гармоника второй моды возмущений, в то время как на пористой поверхности ($L^* = 0,06 \div 0,28$) она подавляется. При $L^* = 0,44 \div 0,78$ амплитуда второй гармоники больше, чем на сплошной поверхности, а ее частота уменьшается до значения $f = 280 \text{ кГц}$.

Зависимость относительной частоты максимальной амплитуды второй моды возмущений от протяженности пористого покрытия показана на рис. 4 ($f_{s \max}$, $f_{p \max}$ — частоты максимальной амплитуды второй моды на сплошной и пористой поверхностях соответственно). Видно, что для всех единичных чисел Рейнольдса при увеличении протяженности пористого покрытия до $L^* = 0,28$ частота второй моды уменьшается на 13–20 % и при дальнейшем увеличении протяженности практически не меняется.

На рис. 5 показана зависимость максимальной амплитуды второй моды возмущений на пористой поверхности $P'_{p \max}$, нормированной на максимальную амплитуду второй моды возмущений на сплошной поверхности $P'_{s \max}$, от протяженности пассивного пористого покрытия.

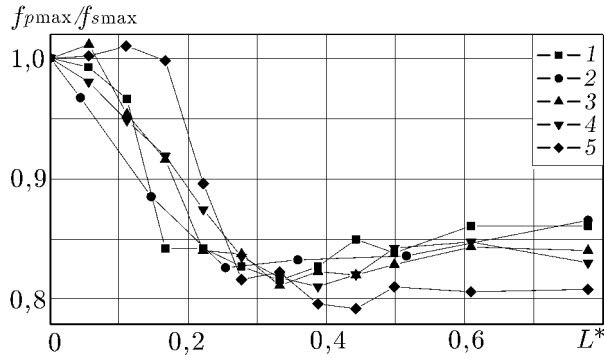


Рис. 4

Рис. 4. Зависимость относительной частоты возмущений максимальной амплитуды второй моды от протяженности пассивного пористого покрытия:

1 — $Re_{1\infty} = 2,6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$; 2 — $Re_{1\infty} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$; 3 — $Re_{1\infty} = 4,6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$; 4 — $Re_{1\infty} = 6,6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$; 5 — $Re_{1\infty} = 10^7 \text{ м}^{-1}$

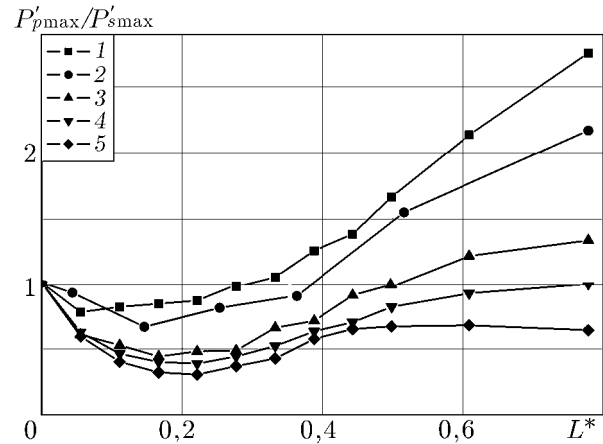


Рис. 5

Рис. 5. Зависимость максимальной амплитуды второй моды возмущений от протяженности пассивного пористого покрытия (обозначения те же, что на рис. 4)

Для единичных чисел Рейнольдса $Re_{1\infty} = 2,6 \cdot 10^6$; $3,6 \cdot 10^6$; $4,6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$, соответствующих параметрам ламинарного пограничного слоя в точке измерения, с увеличением протяженности пористого покрытия амплитуда второй моды сначала уменьшается, затем увеличивается до значений, превышающих соответствующие значения на сплошной поверхности. При этом протяженность пористого покрытия, при которой наблюдается наиболее существенное уменьшение амплитуды второй моды, с ростом единичного числа Рейнольдса увеличивается: при $Re_{1\infty} = 2,6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$ $L^* = 0,06$, при $Re_{1\infty} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$ $L^* = 0,15$, при $Re_{1\infty} = 4,6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$ $L^* = 0,17$. С ростом единичного числа Рейнольдса увеличивается также минимальная длина пористого покрытия, при котором амплитуда второй моды возмущений превышает соответствующее значение на сплошной поверхности и при $Re_{1\infty} = 2,6 \cdot 10^6$; $3,6 \cdot 10^6$; $4,6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$ составляет $L^* = 0,3$; $0,4$; $0,5$ соответственно. При этом амплитуда второй моды растет с увеличением протяженности пористого покрытия, достигая наибольшего значения при максимальной протяженности.

При значениях единичного числа Рейнольдса $Re_{1\infty} = 6,6 \cdot 10^6$; 10^7 м^{-1} , соответствующих параметрам переходного пограничного слоя в точке измерения, протяженность пористого покрытия, имеющего максимальную эффективность, не зависит от единичного числа Рейнольдса и равна $L^* = 0,22$. Следует отметить, что при любых значениях протяженности пористой поверхности амплитуда второй моды меньше, чем на сплошной поверхности. Однако при $Re_{1\infty} = 6,6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$ с увеличением протяженности до максимального значения значение $P'_{pmax}/P'_{smax} \rightarrow 1$, а при $Re_{1\infty} = 10^7 \text{ м}^{-1}$ амплитуда второй моды при $L^* \geq 0,44$ практически не меняется.

Заключение. Проведены экспериментальные исследования влияния протяженности пассивного пористого покрытия на естественные возмущения в гиперзвуковом пограничном слое на остром конусе при нулевом угле атаки, числе Маха набегающего потока $M_\infty = 5,8$, единичных числах Рейнольдса $Re_{1\infty} = 2,6 \cdot 10^6$; $3,6 \cdot 10^6$; $4,6 \cdot 10^6$; $6,6 \cdot 10^6$; 10^7 м^{-1} .

Получены спектры пульсаций давления на сплошной поверхности конуса и поверхности с пассивным пористым покрытием различной протяженности. Показано, что при выбранных условиях испытаний вторая мода возмущений является наибольшей.

Обнаружено, что эффективность стабилизации второй моды возмущений с помощью пассивного пористого покрытия зависит от его протяженности. Определена протяженность, при которой эффективность стабилизации второй моды возмущений максимальна. Показано, что наличие пористого покрытия большой протяженности может дестабилизировать вторую моду возмущений. Обнаружено, что на поверхности с пористым покрытием частота максимальной амплитуды второй моды возмущений на 20 % меньше, чем на сплошной.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Fedorov A. V., Malmuth N. D., Rasheed A., Hornung H. G.** Stabilization of hypersonic boundary layers by porous coatings // *AIAA J.* 2001. V. 39, N 4. P. 605–610.
2. **Fedorov A. V., Shipliyuk A. N., Maslov A. A., et al.** Stabilization of a hypersonic boundary layer using an ultrasonically absorptive coating // *J. Fluid Mech.* 2003. V. 479. P. 99–124.
3. **Fedorov A. V., Kozlov V. F., Shipliyuk A. N., et al.** Stability of hypersonic boundary layer on porous wall with regular microstructure // *AIAA J.* 2006. V. 44, N 8. P. 1866–1871.
4. **Maslov A. A., Shipliyuk A. N., Sidorenko A. A., et al.** Hypersonic laminar flow control using a porous coating of random microstructure. Reno, 2006. (Paper / AIAA; N 2006-1112).
5. **Бунтин Д. А., Лукашевич С. В., Маслов А. А., Шиплюк А. Н.** Влияние затупления носовой части конуса и ультразвукопоглощающего покрытия на переход в гиперзвуковом пограничном слое // *Изв. РАН. Механика жидкости и газа.* 2010. № 6. С. 74–81.
6. **Шиплюк А. Н., Буров Е. В., Маслов А. А., Фомин В. М.** Влияние пористых покрытий на устойчивость гиперзвуковых пограничных слоев // *ПМТФ.* 2004. Т. 45, № 2. С. 169–176.
7. **Chokani N., Bountin D. A., Shipliyuk A. N., Maslov A. A.** Nonlinear aspects of hypersonic boundary-layer stability on a porous surface // *AIAA J.* 2005. V. 43, N 1. P. 149–155.
8. **Бунтин Д. А., Маслов А. А., Чимытов Т. А., Шиплюк А. Н.** Статистический анализ нелинейных взаимодействий возмущений на пористой поверхности в гиперзвуковом пограничном слое // *Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Сер. Физика.* 2009. Т. 4, № 3. С. 43–49.
9. **Бунтин Д. А., Маслов А. А., Чимытов Т. А., Шиплюк А. Н.** Биспектральный анализ нелинейных процессов в гиперзвуковом пограничном слое на пористой поверхности конуса // *Изв. РАН. Механика жидкости и газа.* 2010. № 3. С. 84–90.
10. **Лукашевич С. В., Морозов С. О., Шиплюк А. Н.** Экспериментальное исследование влияния параметров пассивного пористого покрытия на развитие возмущений в гиперзвуковом пограничном слое // *Письма в ЖТФ.* 2012. Т. 38, № 23. С. 83–88.
11. **Lukashevich S. V., Maslov A. A., Shipliyuk A. N., et al.** Stabilization of high-speed boundary layer using porous coatings of various thicknesses // *AIAA J.* 2012. V. 50, N 9. P. 1897–1904.
12. **Wartemann V., Luedeke H., Sandham N.** Numerical investigation of hypersonic boundary layer stabilization by porous surfaces // *AIAA J.* 2012. V. 50, N 6. P. 1281–1290.
13. **Зайдель А. Н.** Элементарные оценки ошибок измерений. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1968.

Поступила в редакцию 25/1 2013 г.