

УДК 532.526.3

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАССИВНОГО ПОРИСТОГО ПОКРЫТИЯ НА ВОЗМУЩЕНИЯ В ГИПЕРЗВУКОВОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ 2. ВЛИЯНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПОРИСТОГО ПОКРЫТИЯ

С. В. Лукашевич\*, С. О. Морозов<sup>\*,\*\*</sup>, А. Н. Шиплюк<sup>\*,\*\*\*</sup>

\* Институт теоретической и прикладной механики

им. С. А. Христиановича СО РАН, 630090 Новосибирск, Россия

\*\* Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск, Россия

\*\*\* Новосибирский государственный технический университет,  
630073 Новосибирск, Россия

E-mails: lukashevich@itam.nsc.ru, morozov@itam.nsc.ru, shipluk@itam.nsc.ru

Экспериментально исследовано влияние положения пассивного пористого покрытия на естественные возмущения в гиперзвуковом пограничном слое. Эксперименты проводились при обтекании под нулевым углом атаки острого конуса при числе Маха набегающего потока  $M_\infty = 5,8$ , температуре торможения  $T_0 = 370 \pm 5$  К и значениях единичного числа Рейнольдса  $Re_{1\infty} = 2,6 \cdot 10^6$ ;  $4,6 \cdot 10^6$ ;  $6,6 \cdot 10^6$ ;  $10^7$  м<sup>-1</sup>. С использованием линейной теории устойчивости выполнен расчет волновых характеристик пограничного слоя для параметров потока, соответствующих экспериментальным. Сравнение результатов эксперимента и расчета показало, что наличие пористого покрытия в области, где вторая мода неустойчива, приводит к уменьшению ее амплитуды в точке измерения, а наличие пористого покрытия в области, где вторая мода устойчива, — к ее увеличению.

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

DOI: 10.15372/PMTF20160514

**Введение.** При проектировании гиперзвукового летательного аппарата одной из важнейших задач является управление ламинарно-турбулентным переходом. Как известно, при ламинарно-турбулентном переходе на поверхности летательного аппарата происходит значительное увеличение сопротивления трения и величины теплового потока. В гиперзвуковом пограничном слое рост акустических возмущений обуславливает ламинарно-турбулентный переход. В работе [1] предложено использовать пассивное пористое покрытие для поглощения акустических возмущений и увеличения протяженности ламинарного участка. Расчеты, выполненные с помощью линейной теории устойчивости, показали, что пассивное пористое покрытие частично поглощает энергию второй моды возмущений [1–4].

Экспериментальные исследования влияния пористых покрытий с регулярной [1] и хаотической [5] микроструктурой на ламинарно-турбулентный переход подтвердили возможность увеличения протяженности ламинарного участка в два раза.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 12-08-31514, 12-08-00784, 13-07-00440, 14-07-00426).

© Лукашевич С. В., Морозов С. О., Шиплюк А. Н., 2016

Экспериментальные исследования развития естественных и искусственных возмущений на поверхности острого конуса с пассивным пористым покрытием проведены в [2–4, 6, 7]. Сравнение результатов экспериментов и расчетов показало, что они хорошо согласуются и, следовательно, предложенный в [1–4] способ стабилизации течения является эффективным.

В результате экспериментальных исследований нелинейной стадии развития искусственных [8] и естественных [9, 10] возмущений в гиперзвуковом пограничном слое на пористой и сплошной поверхностях установлено, что на пористой поверхности нелинейные процессы развиваются медленнее, чем на сплошной. Это приводит к задержке ламинарно-турбулентного перехода на пористой поверхности.

Экспериментальные исследования влияния толщины и степени пористости пассивного пористого покрытия на развитие второй моды возмущений проведены в работе [11]. Показано, что с увеличением толщины пористого покрытия до определенного значения его влияние возрастает. Дальнейшее увеличение толщины не приводит к увеличению эффективности, при этом максимальная степень стабилизации второй моды для покрытий со степенью пористости, равной 44 и 64 %, практически одна и та же. Результаты расчетов [12], проведенных для условий экспериментов [11], хорошо согласуются с экспериментальными данными. В [13] представлены результаты численного исследования влияния формы и размеров пор на возмущения в гиперзвуковом пограничном слое, также согласующиеся с данными эксперимента [11].

В работе [14] приведены результаты численного исследования влияния положения пористых участков на стабилизацию течения в гиперзвуковом пограничном слое. Обнаружено, что акустические возмущения дестабилизируются или стабилизируются в зависимости от наличия пористых участков перед или за точкой синхронизации, в которой фазовые скорости “быстрых” и “медленных” акустических возмущений равны.

Настоящая работа является продолжением работы [15], в которой экспериментально исследовалось влияние протяженности пассивного пористого покрытия на возмущения в гиперзвуковом пограничном слое. Максимальная эффективность стабилизации течения имела место при относительно небольшой протяженности пористого покрытия. При увеличении протяженности в направлении носика модели имело место либо уменьшение эффективности стабилизации течения, либо дестабилизация течения в зависимости от параметров набегающего потока. В данной работе экспериментально исследовано влияние положения вставки с пассивным пористым покрытием на возмущения в гиперзвуковом пограничном слое и проведено сравнение полученных результатов с результатами расчета волновых характеристик пограничного слоя с помощью линейной теории устойчивости.

**Методика измерений и расчетов.** Эксперименты проведены в гиперзвуковой аэродинамической трубе кратковременного действия “Транзит-М” при числе Маха  $M_\infty = 5,8$ , температуре торможения  $T_0 = 370 \pm 5$  К и единичных числах Рейнольдса  $Re_{1\infty} = (2,6 \div 10,0) \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$ .

Использовалась та же модель, что и в экспериментах [15], представлявшая собой острый конус с полууглом раствора, равным  $7^\circ$ , и длиной образующей, составляющей 353 мм (рис. 1). Температура поверхности модели  $T_w = 295 \pm 1$  К, угол атаки  $\alpha = 0^\circ \pm 2'$ . На одной половине модели в области  $x \geq 67$  мм расположено пористое покрытие протяженностью 286 мм со степенью пористости, равной 44 %. Подробное описание пористого покрытия приведено в [15].

Для изменения положения пористого участка часть покрытия заклеивалась тонкой клейкой лентой толщиной 30 мкм, открытой оставалась область протяженностью  $L = 38$  мм, положение которой менялось (см. рис. 1).

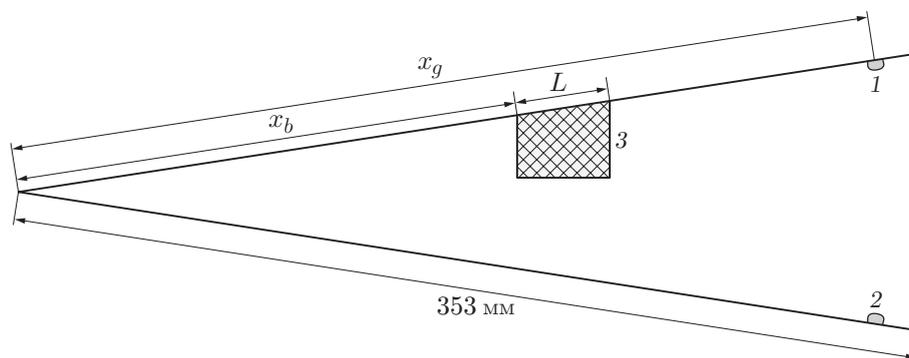


Рис. 1. Схема модели:

1, 2 — высокочастотные датчики давления, 3 — участок с пористым покрытием

Для исследования естественных возмущений проведены измерения пульсаций давления на стенке модели в диапазоне частот  $11 \div 1000$  кГц с помощью высокочастотных датчиков давления РСВ132А31. Датчики устанавливались на сплошной поверхности и на поверхности, где расположено пористое покрытие на расстоянии от носика модели  $x_g = 343$  мм. Таким образом, при неизменных параметрах набегающего потока измерения пульсаций давления в одной точке позволяли определить влияние положения пористого покрытия на вторую моду возмущений.

Доверительной вероятности  $\beta = 0,95$  соответствовал доверительный интервал измерения амплитуды пульсаций давления  $\pm 10\%$  (см. [15]).

Расчеты волновых характеристик пограничного слоя проводились в рамках линейной теории устойчивости. При этом использовалась модель идеального газа с постоянным числом Прандтля  $Pr = 0,72$ , показателем адиабаты  $\gamma = 1,4$ , зависимость динамической вязкости  $\mu$  от температуры определялась по формуле Сазерленда. Расчет стационарного течения проводился в локально-параллельном приближении. На полученное стационарное решение накладывались малые нестационарные возмущения. Для теоретического описания развития возмущений вдоль модели в гиперзвуковом пограничном слое использовалась система уравнений устойчивости Дана — Линя [16].

**Результаты экспериментов и расчетов.** Сравнение спектральных характеристик пульсаций давления на сплошной поверхности и на поверхности с пассивным пористым покрытием позволило определить влияние положения участка пористости на возмущения в гиперзвуковом пограничном слое.

На рис. 2 показаны спектры пульсаций давления на сплошной поверхности и на поверхности с пористым участком при  $Re_{1\infty} = 2,6 \cdot 10^6; 4,6 \cdot 10^6$  м<sup>-1</sup> ( $x_b^* = x_b/x_g$  — безразмерная координата начала пористого участка). Числам Рейнольдса  $Re_{1\infty} = 2,6 \cdot 10^6; 4,6 \cdot 10^6$  м<sup>-1</sup> соответствуют диапазоны частот второй моды  $f = 100 \div 175; 110 \div 250$  кГц. На рис. 2 видно, что при  $Re_{1\infty} = 2,6 \cdot 10^6$  м<sup>-1</sup>, в случае если пористый участок расположен максимально близко к носу модели ( $x_b^* = 0,31$ ), амплитуда второй моды возмущений увеличивается на 25% по сравнению с амплитудой второй моды на сплошной поверхности. При  $x_b^* = 0,53; 0,76$  максимальное значение амплитуды второй моды на поверхности с пористым участком практически равно ее значению на сплошной поверхности. Наличие пористого участка в хвостовой части модели ( $x_b^* = 0,87$ ) приводит к уменьшению максимальной амплитуды второй моды по сравнению с ее значением на сплошной поверхности. При этом с увеличением  $x_b^*$  наблюдается увеличение возмущений в диапазоне частот  $90 \div 120$  кГц. Максимум этих возмущений достигается при  $x_b^* = 0,76$ . Для  $Re_{1\infty} = 4,6 \cdot 10^6$  м<sup>-1</sup> также наблюдаются увеличение второй моды при наличии пористого участка в носовой части модели

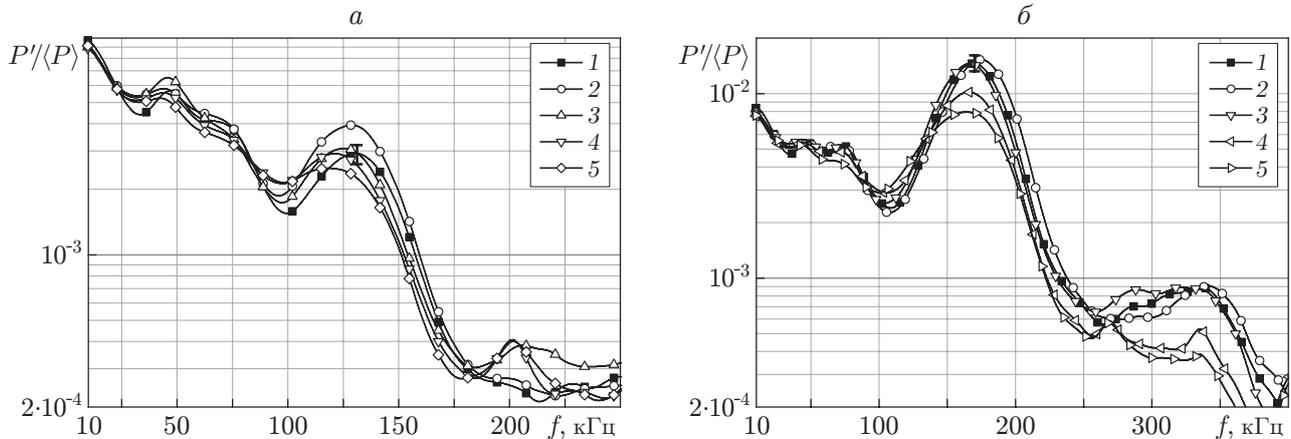


Рис. 2. Спектры пульсаций давления на поверхности модели:

$a$  —  $Re_{1\infty} = 2,6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$ ,  $b$  —  $Re_{1\infty} = 4,6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$ ; 1 — сплошная поверхность, 2–5 — пористая поверхность (2 —  $x_b^* = 0,31$ , 3 —  $x_b^* = 0,53$ , 4 —  $x_b^* = 0,76$ , 5 —  $x_b^* = 0,87$ )

( $x_b^* = 0,31$ ), отсутствие влияния на максимальное значение амплитуды второй моды возмущений, в случае если пористый участок находится в средней части ( $x_b^* = 0,53$ ), и уменьшение второй моды при наличии пористого участка в хвостовой части модели ( $x_b^* = 0,76$ ;  $0,87$ ) во всем диапазоне частот, кроме диапазона  $f = 90 \div 130 \text{ кГц}$ , в котором наблюдается рост возмущений.

Зависимость нормированной частоты, которая соответствует максимальной амплитуде второй моды возмущений, от положения пористого участка показана на рис. 3 ( $f_{s \max}$ ,  $f_{p \max}$  — значения частоты возмущений, соответствующей максимальной амплитуде второй моды на сплошной и пористой поверхностях). Видно, что наиболее существенное влияние положения пористого участка на величину  $f_{p \max}/f_{s \max}$  наблюдается при малых единичных числах Рейнольдса. Увеличение расстояния от носика конуса до пористого участка приводит к уменьшению частоты, соответствующей максимальной амплитуде второй моды возмущений, на 8 % при  $Re_{1\infty} = 2,6 \cdot 10^6$ ;  $4,6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$  и на 6 % при  $Re_{1\infty} = 6,6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$ . При  $Re_{1\infty} = 10^7 \text{ м}^{-1}$  частота практически не меняется. Следует отметить, что для  $Re_{1\infty} = 4,6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$  при  $x_b^* = 0,31$ ;  $0,42$  частота второй моды больше, чем на сплошной поверхности.

На рис. 4 представлена 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 координаты начала участка с пористым покрытием. Вертикальным отрезком показан доверительный интервал для результатов измерений амплитуды второй моды возмущений на сплошной поверхности. При значениях  $Re_{1\infty} = 2,6 \cdot 10^6$ ;  $4,6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$ , соответствующих параметрам ламинарного пограничного слоя в точке измерения, наличие пористого покрытия в носовой части модели приводит к увеличению амплитуды второй моды (при  $x_b^* = 0,31 \div 0,53$  и  $x_b^* = 0,31$  соответственно). При увеличении  $x_b^*$  амплитуда второй моды на поверхности с пористым участком уменьшается и достигает минимума при  $x_b^* = 0,87$ . При  $Re_{1\infty} = 2,6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$  максимальное уменьшение амплитуды по сравнению с амплитудой на сплошной поверхности составляет 15 %, при  $Re_{1\infty} = 4,6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$  — 50 %.

Для единичных чисел Рейнольдса  $Re_{1\infty} = 6,6 \cdot 10^6$ ;  $10^7 \text{ м}^{-1}$ , соответствующих переходному режиму течения в пограничном слое в точке измерения, вторая мода возмущений на поверхности с пористым участком больше, чем на сплошной поверхности при

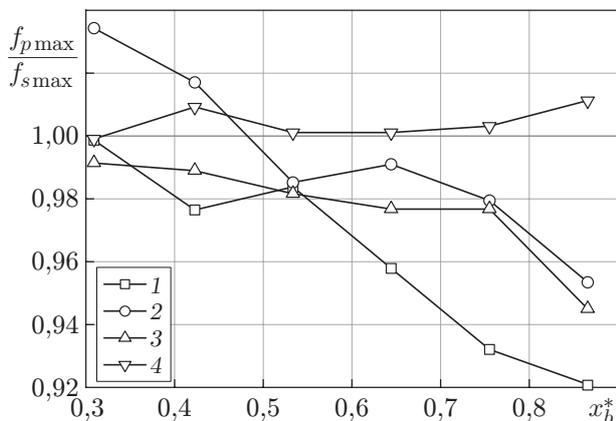


Рис. 3

Рис. 3. Зависимость частоты, соответствующей максимальной амплитуде второй моды возмущений, от положения пассивного пористого покрытия:

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

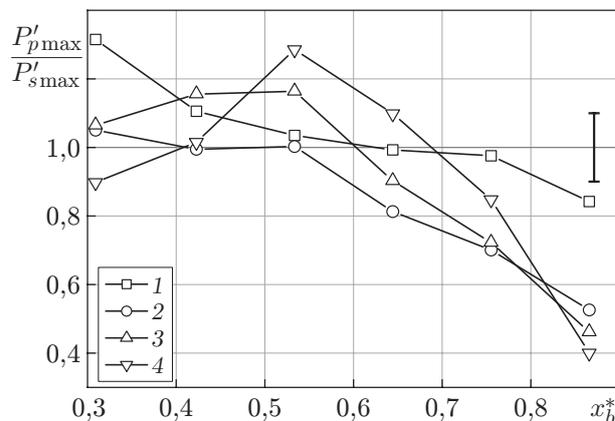


Рис. 4

Рис. 4. Зависимость максимальной амплитуды второй моды возмущений от положения пассивного пористого покрытия (обозначения те же, что на рис. 3)

$x_b^* = 0,31 \div 0,53$  и  $x_b = 0,42 \div 0,64$  соответственно. При  $Re_{1\infty} = 10^7 \text{ м}^{-1}$ ,  $x_b^* = 0,31$  амплитуда второй моды меньше, чем на сплошной поверхности. При перемещении пористого участка от носика модели вниз по потоку амплитуда второй моды увеличивается и при  $x_b^* = 0,53$  достигает максимального значения. Дальнейшее увеличение  $x_b^*$  приводит к уменьшению амплитуды второй моды, и при  $x_b^* \geq 0,64$  для  $Re_{1\infty} = 6,6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$  и  $x_b^* \geq 0,76$  для  $Re_{1\infty} = 10^7 \text{ м}^{-1}$  она становится меньше, чем на сплошной поверхности. При  $x_b^* = 0,87$  достигается минимальное значение амплитуды второй моды, причем оно приблизительно в 2,5 раза меньше, чем на сплошной поверхности. Таким образом, наличие пористого участка в носовой части модели приводит к ускоренному по сравнению со сплошной поверхностью росту второй моды возмущений. Наибольшая устойчивость течения достигается при размещении пористого участка максимально близко к хвостовой части модели.

Поскольку при проведении экспериментов отсутствовала возможность исследовать развитие возмущений вдоль модели, были проведены расчеты волновых характеристик пограничного слоя с использованием линейной теории устойчивости для единичных чисел Рейнольдса  $Re_{1\infty} = 2,6 \cdot 10^6$ ;  $4,6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$ , соответствующих ламинарному пограничному слою в точке измерения. На рис. 5 представлены зависимости  $N$ -фактора, характеризующего увеличение амплитуды возмущений определенной частоты вдоль поверхности модели, и безразмерной амплитуды второй моды на поверхности с пористым покрытием от положения пористого участка. Расчет  $N$ -фактора проводился для частоты, соответствующей максимальной амплитуде второй моды возмущений, полученной в экспериментах на сплошной поверхности. На рис. 5 видно, что стабилизация возмущений второй моды имеет место в том случае, если пористое покрытие расположено в области, соответствующей росту второй моды на сплошной поверхности. Размещение пористого участка в области, соответствующей отсутствию роста второй моды на сплошной поверхности, приводит к увеличению ее амплитуды в точке измерения.

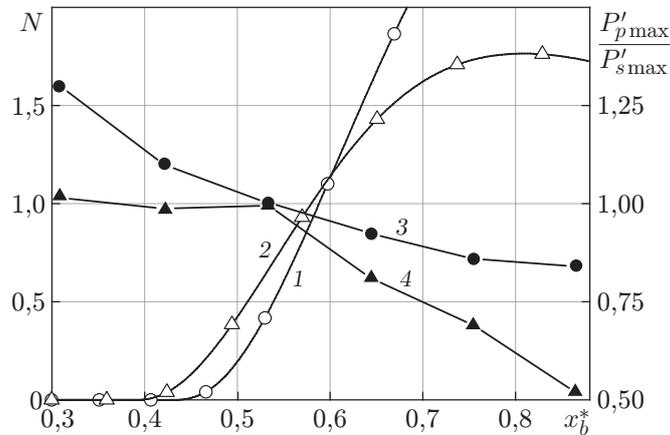


Рис. 5. Расчетная зависимость  $N$ -фактора (1, 2) и экспериментальная зависимость амплитуды второй моды возмущений (3, 4) от положения пористого участка:

1, 3 —  $Re_{1\infty} = 2,6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$ ,  $f = 130 \text{ кГц}$ , 2, 4 —  $Re_{1\infty} = 4,6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$ ,  $f = 170 \text{ кГц}$

**Заключение.** Проведены экспериментальные исследования влияния положения участка с пассивным пористым покрытием 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  $Re_{1\infty} = 2,6 \cdot 10^6 \div 10^7 \text{ м}^{-1}$ . С использованием линейной теории устойчивости проведены расчеты волновых характеристик пограничного слоя.

Получены спектры пульсаций давления в хвостовой части конуса на сплошной поверхности и поверхности с пористым покрытием. Получена расчетная зависимость  $N$ -фактора от продольной координаты для возмущений второй моды на сплошной поверхности конуса.

Показано, что при использовании пассивного пористого покрытия эффективность стабилизации второй моды возмущений зависит от положения этого покрытия на поверхности модели. Обнаружено, что наличие пористого покрытия в области, где вторая мода возмущений на сплошной поверхности устойчива, приводит к увеличению амплитуды этой моды. Для эффективной стабилизации течения необходимо размещать пористое покрытие в области неустойчивости второй моды.

## 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 and 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 ультразвукпоглощающего 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. **Wagner A., Hannemann K., Kuhn M.** Experimental investigation of hypersonic boundary-layer stabilization on a cone by means of ultrasonically absorptive carbon-carbon material // *Exp. Fluids*. 2013. V. 54, N 11. 1606.
8. **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.
9. **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.
10. **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.
11. **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.
12. **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.
13. **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.
14. **Wang X., Zhong X.** The stabilization of a hypersonic boundary layer using local sections of porous coating // *Phys. Fluids*. 2012. V. 24. 034105.
15. **Лукашевич С. В., Морозов С. О., Шиплюк А. Н.** Экспериментальное исследование влияния пассивного пористого покрытия на возмущения в гиперзвуковом пограничном слое. 1. Влияние протяженности пористого покрытия // *ПМТФ*. 2013. Т. 54, № 4. С. 68–73.
16. **Гапонов С. А., Ермолаев Ю. Г., Косинов А. Д. и др.** Влияние пористости поверхности на устойчивость и переход сверхзвукового пограничного слоя на плоской пластине // *Теплофизика и аэромеханика*. 2010. Т. 17, № 2. С. 281–290.

*Поступила в редакцию 1/VII 2015 г.,  
в окончательном варианте — 30/VII 2015 г.*

---