

532.526.3

**Экспериментальное исследование влияния малых углов атаки и затупления носика конуса на стабилизацию гиперзвукового пограничного слоя пассивным пористым покрытием\***

С.О. Морозов<sup>1</sup>, С.В. Лукашевич<sup>1</sup>, В.Г. Судаков<sup>2</sup>, А.Н. Шиплюк<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск*

<sup>2</sup>*Центральный аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского, Жуковский, Московская обл.*

E-mail: morozov@itam.nsc.ru

Работа посвящена экспериментальному исследованию влияния малых углов атаки и радиуса затупления носика конуса на эффективность стабилизации высокочастотных возмущений в гиперзвуковом пограничном слое при помощи пассивного пористого покрытия. Эксперименты проведены на конусе с углом полуоткрытия  $7^\circ$  и радиусом затупления носика  $R = 0,03, 0,5$  и  $1$  мм под углами атаки  $\alpha = 0 \div 1^\circ$  при числе Маха набегающего потока  $M_\infty = 5,8$ . Измерены высокочастотные пульсации давления на сторонах со сплошной и пористой поверхностями конуса. Показано, что при всех исследуемых углах атаки и радиусах затупления носика конуса пассивное пористое покрытие эффективно подавляет высокочастотные возмущения в гиперзвуковом пограничном слое как на наветренной, так и на подветренной стороне конуса.

**Ключевые слова:** гиперзвуковой пограничный слой, пассивное пористое покрытие, устойчивость пограничного слоя, ламинарно-турбулентный переход, вторая мода возмущений.

**Введение**

Ламинарно-турбулентный переход на поверхности гиперзвуковых летательных аппаратов приводит к значительному росту тепловых потоков и сопротивления трения. В связи с этим изучение причин перехода и методов его задержки является актуальной задачей современной высокоскоростной аэродинамики.

Выделяют несколько основных возможных сценариев перехода от ламинарного пограничного слоя к турбулентному. Если возмущения в основном потоке малы и рассматриваемая поверхность не имеет большой шероховатости, то в пограничном слое независимо друг от друга экспоненциально нарастают собственные возмущения, в результате наблюдается линейная стадия развития возмущений. Достигая определенной амплитуды, возмущения начинают взаимодействовать — процесс переходит к нелинейной стадии.

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-38-50166 «мол\_нр».

Далее происходит разрушение структуры ламинарного пограничного слоя и наступает переход к турбулентности. Если же возмущения в основном потоке или шероховатость поверхности достаточно большие, то переход может произойти без линейной стадии и даже без нелинейной стадии (так называемый «обходной путь перехода»). При линейном развитии возмущений в гиперзвуковом безградиентном пограничном слое (при числе Маха вне пограничного слоя  $M > 5$ ) наиболее неустойчивыми являются высокочастотные возмущения акустической природы — возмущения второй моды. Также выделяют неустойчивые возмущения первой моды, которые связывают с волнами Толлмина–Шлихтинга.

Для стабилизации гиперзвуковых пограничных слоев исследуются пассивные методы, такие как пористые покрытия [1], волнистая поверхность [2], «оптимальная шероховатость» [3], и активные — локальное охлаждение поверхности [4], вдув газа [5]. Использование пассивного пористого покрытия для стабилизации безградиентного гиперзвукового пограничного слоя впервые было теоретически обосновано в работе [6] и экспериментально проверено в [7]. Данный метод — один из самых перспективных методов управления ламинарно-турбулентным переходом, так как позволяет добиться значительного увеличения ламинарного участка гиперзвукового пограничного слоя без энергозатрат. Механизм стабилизации пассивными пористыми покрытиями заключается в замедлении роста наиболее неустойчивых высокочастотных возмущений, так называемых возмущений второй моды [8], в гиперзвуковом пограничном слое. Высокочастотные возмущения второй моды имеют акустическую природу, поэтому покрытия с определенной степенью пористости, размерами и глубиной пор могут частично поглощать энергию этих возмущений [9]. В настоящее время проведены исследования покрытий с регулярной (перфорация [7], наборы сеток [10, 11]) и с хаотической (спеченные проволоочки [8], пористая керамика [12]) пористой микроструктурой. Все эти покрытия показали свою эффективность в определенных условиях эксперимента.

Предыдущие экспериментальные исследования, выполненные авторами настоящей работы, показали, что пассивное пористое покрытие может как стабилизировать, так и дестабилизировать возмущения в пограничном слое в зависимости от протяженности [10] и положения [11] покрытия на остром конусе. Подобный эффект был обнаружен в результате численных исследований [13, 14]. Было показано, что установка пористого покрытия до точки синхронизации (точки, в которой фазовые скорости возмущений устойчивой быстрой моды и неустойчивой медленной моды пограничного слоя равны [9]) приводит к дестабилизации возмущений, а установка покрытия после точки синхронизации — к стабилизации возмущений.

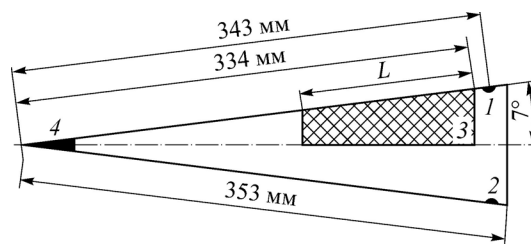
Известно, что устойчивость гиперзвукового пограничного слоя сильно зависит от угла атаки и притупления передней кромки (см. работы [15, 16]). В связи с этим в рассматриваемой работе исследуется влияние небольших углов атаки на эффективность стабилизации высокочастотных возмущений в гиперзвуковом пограничном слое при помощи пассивного пористого покрытия на конусе с различными затуплениями носовой части.

## 1. Экспериментальная установка

Экспериментальные исследования выполнялись в гиперзвуковой аэродинамической трубе кратковременного действия при числе Маха набегающего потока  $M_\infty = 5,8$ . Исследования влияния протяженности пассивного пористого покрытия проводились для единичных чисел Рейнольдса  $Re_{1\infty} = 5,3 \cdot 10^6$  и  $7,2 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$  и температуры торможения  $T_0 = 373 \pm 3 \text{ К}$ , а исследования влияния угла атаки — для единичного числа Рейнольдса  $Re_{1\infty} = 6,8 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$  и температуры торможения  $T_0 = 387 \pm 3 \text{ К}$ . Уровень пульсаций давления в потоке аэродинамической трубы в частотном диапазоне 35–350 кГц составил 0,4–1,5 % при числах Рейнольдса набегающего потока  $Re_{1\infty} = (4,7–24) \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$  [17].

Рис. 1. Схематичное изображение модели.

- 1, 2 — высокочастотные датчики давления,  
3 — пассивное пористое покрытие,  
4 — сменный носик.



Модель имела вид конуса с углом полуоткрытия  $7^\circ$  и длиной образующей 353 мм (рис. 1). Температура поверхности конуса  $T_w$  составляла  $295 \pm 3$  К.

На одной его половине вдоль образующей устанавливалось пассивное пористое покрытие общей протяженностью 286 мм. Покрытие состояло из трех повернутых друг относительно друга на  $45^\circ$  слоев нейлоновой сетки с размером ячеек  $0,1 \times 0,1$  мм и диаметром проволочек 0,05 мм. Глубина покрытия  $h = 0,18$  мм была выбрана на основании предыдущих исследований как наиболее эффективная [18]. Радиусы затупления носика конуса составляли  $R = 0,03, 0,5$  и 1 мм. Для изменения протяженности пористого покрытия часть его заклеивалась тонкой лентой толщиной 30 мкм. Протяженность покрытия увеличивалась вдоль образующей конуса от точки  $x_0 = 334$  мм к носику модели. Для измерения пульсаций давления на расстоянии  $x = 343$  мм друг от друга были установлены два датчика РСВ132А31 по одному на сторонах со сплошной и пористой поверхностями, позволяющие измерять пульсации давления в диапазоне частот от 11 до 1000 кГц.

## 2. Результаты

### 2.1. Протяженность

Чтобы определить оптимальную протяженность пассивного пористого покрытия для стабилизации высокочастотных возмущений в гиперзвуковом пограничном слое для конуса с затуплением  $R = 0,5$  и 1 мм, были проведены исследования со сплошной поверхностью и с покрытием протяженностью  $L = 18, 50, 87, 123, 177$  и 247 мм. На рис. 2а, 2б показаны спектры пульсаций давления на сплошной поверхности и на поверхности с пассивным пористым покрытием различной протяженности на конусе с затуплением  $R = 0,5$  мм для единичных чисел Рейнольдса набегающего потока  $Re_{1\infty} = 5,3 \cdot 10^6$  и  $7,2 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$  соответственно. Здесь амплитуда возмущений ( $P'$ ) нормирована

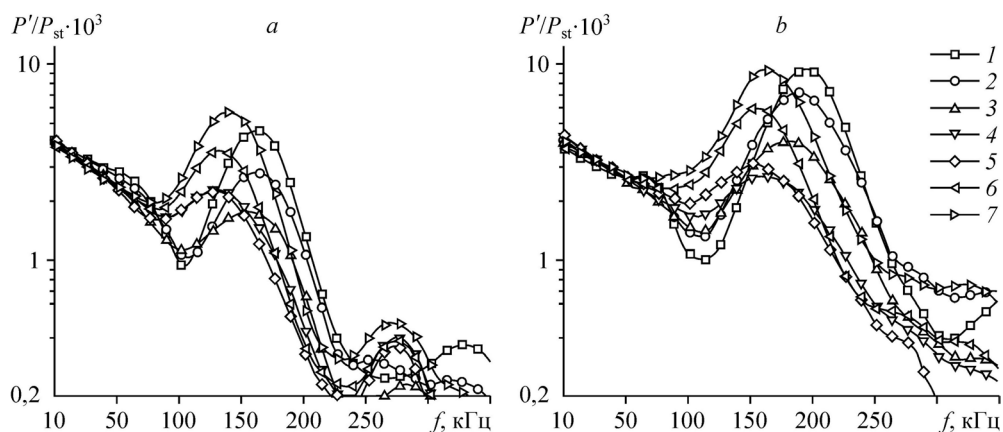


Рис. 2. Спектры пульсаций давления на поверхности модели с  $R = 0,5$  мм для  $Re_{1\infty} = 5,3 \cdot 10^6$  (а),  $7,2 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$  (б).

1 — сплошная поверхность, 2–7 — пассивное пористое покрытие протяженностью  $L = 18, 50, 87, 123, 177, 247$  мм.

на статическое давление набегающего потока ( $P_{st}$ ). Увеличение протяженности пористого покрытия приводит к изменению частоты, соответствующей пику возмущений. Так, на сплошной поверхности конуса частота максимума второй моды возмущений  $f \approx 200$  кГц, а на поверхности с пористым покрытием протяженностью  $L = 18, 50, 87, 123, 177$  и  $247$  мм частота второй моды  $f \approx 194, 187, 165, 159, 162$  и  $167$  соответственно. Видно, что увеличение протяженности пассивного пористого покрытия до  $L = 87$  мм приводит к уменьшению амплитуды второй моды возмущений, а дальнейшее увеличение протяженности — к ее увеличению. При этом чем больше протяженность пористого покрытия, тем сильнее дестабилизация возмущений с частотами  $f = 90\text{--}150$  кГц. Для радиуса затупления  $R = 1$  мм зависимость амплитуды и частоты второй моды возмущений от протяженности пассивного пористого покрытия такая же, как и для  $R = 0,5$  мм.

На рис. 3 показана зависимость нормированного максимума амплитуды второй моды возмущений ( $P_{\max_p}/P_{\max_s}$ , где  $P_{\max_p}$  и  $P_{\max_s}$  — максимум амплитуды второй моды возмущений на пористом покрытии, и на сплошной поверхности соответственно) от протяженности пассивного пористого покрытия для двух единичных чисел Рейнольдса набегающего потока  $Re_{1\infty} = 5,3 \cdot 10^6$  и  $7,2 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$  и для двух радиусов затупления носика конуса  $R = 0,5$  и  $1$  мм. Видно, что протяженность покрытия, при которой эффективность стабилизации максимальна, зависит от числа Рейнольдса набегающего потока и не зависит от радиуса затупления носика при исследуемых параметрах. Для  $Re_{1\infty} = 5,3 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$  максимальная эффективность достигается при  $L = 50$  мм, для  $Re_{1\infty} = 7,2 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$  — при  $L = 87$  мм.

Особенностью развития возмущений в гиперзвуковых пограничных слоях является то, что в окрестностях передней кромки преобладает вихревая неустойчивость и возмущения развиваются в виде возмущений первой моды, далее, при удалении от передней кромки, первая мода трансформируется во вторую моду — акустическую неустойчивость [13]. Из результатов теоретических расчетов и экспериментальных данных известно, что пористое покрытие дестабилизирует первую моду возмущений и стабилизирует вторую моду [8]. Эти два фактора приводят к тому, что в рассматриваемом эксперименте при увеличении протяженности пористого покрытия от основания конуса вначале происходит уменьшение амплитуды второй моды ( $L = 50$  и  $87$  мм для  $Re_{1\infty} = 5,3 \cdot 10^6$  и  $7,2 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$  соответственно), а затем она увеличивается, так как пористое покрытие попадает в область вихревой неустойчивости, что способствует росту амплитуды. Аналогичный эффект наблюдался в экспериментах на конусе с острым носиком [10, 11].

## 2.2. Влияние угла атаки

Для проведения исследований влияния угла атаки на эффективность стабилизации гиперзвукового пограничного слоя на поверхности конуса с затуплениями  $R = 0,5$  и  $1$  мм при помощи пассивного пористого покрытия была выбрана протяженность покрытия  $L = 64$  мм. Это связано с тем, что

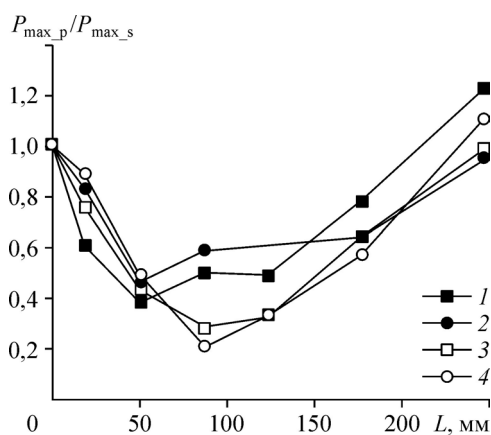


Рис. 3. Зависимость нормированного максимума амплитуды возмущений от протяженности пассивного пористого покрытия на конусе с  $R = 0,5$  (1, 3),  $1$  (2, 4) мм для  $Re_{1\infty} = 5,3 \cdot 10^6$  (1, 2),  $7,2 \cdot 10^6$  (3, 4)  $\text{м}^{-1}$ .

раннее для покрытия протяженностью  $L = 64$  мм проводились исследования влияния угла атаки на конусе с острым носиком [19] и такая величина явилась наиболее эффективной для  $R = 0,03$  мм и  $Re_{1\infty} = 4,6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$ , а для конуса с затуплением  $R = 0,5$  и 1 мм это значение протяженности оказалось близко к наиболее эффективному.

В проведенной серии экспериментов единичное число Рейнольдса набегающего потока  $Re_{1\infty} = 6,8 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$ , температура торможения  $T_0 = 387$  К.

На рис. 4 представлены спектры пульсаций давления на наветренной и подветренной сторонах конуса при углах атаки до  $1^\circ$  для трех различных радиусов носика. Здесь вторая мода возмущений на сплошной поверхности конуса при нулевом угле атаки с пиком на частоте  $f \approx 200$  кГц отчетливо выделяется на фоне других возмущений в исследуемом диапазоне частот. На рис. 4а и 4с видно, что амплитуда второй моды возмущений на наветренной стороне конуса с  $R = 0,5$  и 1 мм уменьшается, а частота возмущений растет с увеличением угла атаки, что соответствует результатам предыдущих исследований (см. [16, 19]). Амплитуда других возмущений в исследуемом диапазоне частот практически не изменяется. На стороне с пассивным пористым покрытием амплитуда второй моды возмущений меньше, чем на сплошной поверхности при всех исследуемых углах атаки. При нулевом угле атаки и на наветренной стороне конуса при  $\alpha = 0,5^\circ$  и  $1^\circ$  на пористом покрытии амплитуда возмущений с частотами  $f \approx 100\text{--}150$ ,  $110\text{--}145$  и  $120\text{--}180$  кГц больше, чем на сплошной поверхности.

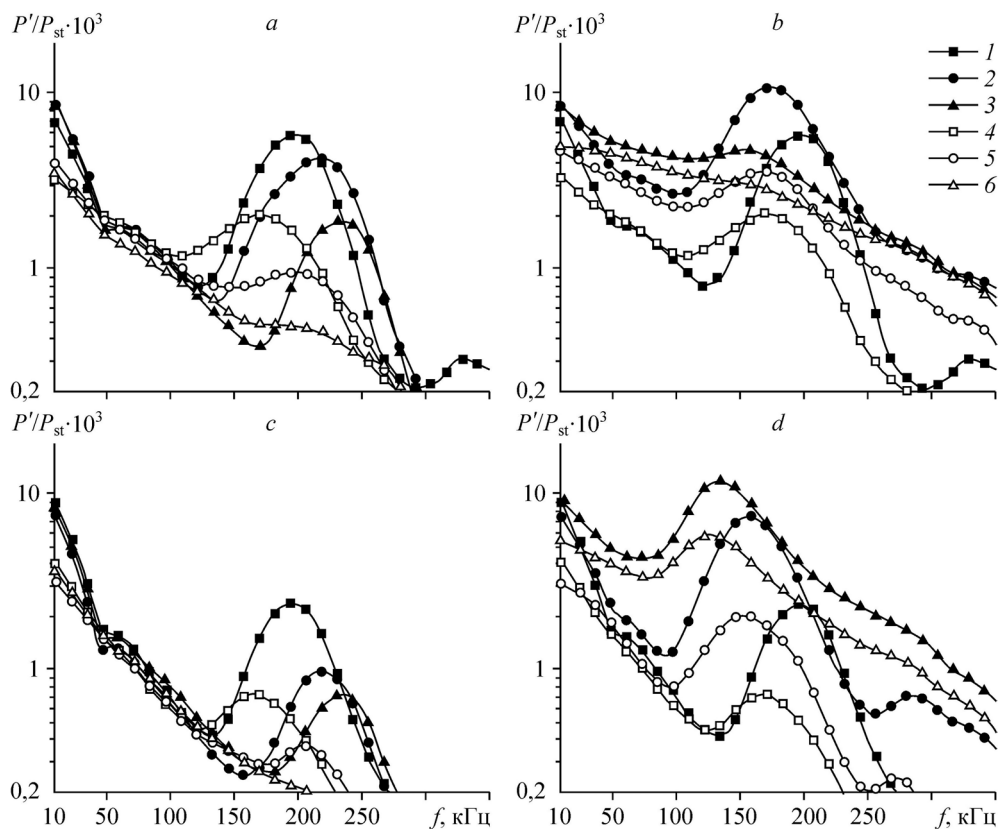


Рис. 4. Спектры пульсаций давления на наветренной (а, с) и подветренной (b, d) сторонах конуса для  $R = 0,5$  мм (а, b), 1 (с, d) мм для  $Re_{1\infty} = 6,8 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$ .

$\alpha = 0^\circ$  (1, 4),  $0,5^\circ$  (2, 5),  $1^\circ$  (3, 6);

1–3 — сплошная поверхность, 4–6 — пассивное пористое покрытие.

На сплошной поверхности конуса с  $R = 0,5$  мм на подветренной стороне (рис. 4b) амплитуда второй моды возмущений возрастает с увеличением угла атаки до  $\alpha = 0,5^\circ$ , при этом начинают расти возмущения во всем диапазоне частот, что указывает на переходный режим пограничного слоя в точке измерения. Дальнейшее увеличение угла атаки до  $1^\circ$  приводит к практически полному подавлению второй моды возмущений и к продолжению роста возмущений в диапазоне частот  $f = 25\text{--}125$  кГц, что свидетельствует о начале турбулентного режима течения. На подветренной стороне амплитуда возмущений во всем исследуемом диапазоне частот на пористом покрытии меньше, чем при соответствующих углах атаки на сплошной поверхности.

На подветренной стороне конуса с  $R = 1$  мм (рис. 4d) увеличение угла атаки до  $\alpha = 1^\circ$  приводит к росту амплитуды возмущений во всем исследуемом диапазоне частот на сплошной поверхности. На стороне с пассивным пористым покрытием увеличение угла атаки до  $\alpha = 0,5^\circ$  приводит к росту амплитуды второй моды возмущений, при этом в отличие от течения на сплошной поверхности амплитуда возмущений с частотами  $f \approx 11\text{--}80$  кГц практически не изменяется, это говорит о том, что пограничный слой на пористой поверхности при угле атаки  $\alpha = 0,5^\circ$  все еще находится в ламинарном состоянии. При  $\alpha = 1^\circ$  амплитуда возмущений в исследуемом диапазоне частот значительно увеличивается в сравнении с  $\alpha = 0,5^\circ$ . Из полученных данных можно видеть, что на подветренной стороне с пассивным пористым покрытием возмущения значительно отстают в своем развитии от возмущения, наблюдаемого на сплошной поверхности, и нелинейная стадия развития возмущений начинается при большем угле атаки.

На рис. 5a, 5b представлены зависимости максимума амплитуды второй моды возмущений и соответствующей частоты от угла атаки для затуплений  $R = 0,03, 0,5$  и  $1$  мм на сплошной поверхности и на поверхности с пассивным пористым покрытием. Для острого конуса с  $R = 0,03$  мм данные были получены авторами в исследованиях [19]. Из рис. 5a видно, что амплитуда второй моды возмущений при нулевом угле атаки конуса на сплошной и пористой поверхностях уменьшается с увеличением радиуса затупления носика конуса. Увеличение угла атаки приводит к уменьшению амплитуды второй моды возмущений и к увеличению соответствующей частоты на наветренной стороне как на сплошной, так и на пористой поверхности при всех  $R$ . Следует отметить, что при этом амплитуда возмущений с относительно низкими частотами практически не изменяется с увеличением угла атаки. Таким образом, пограничный слой в точке измерения

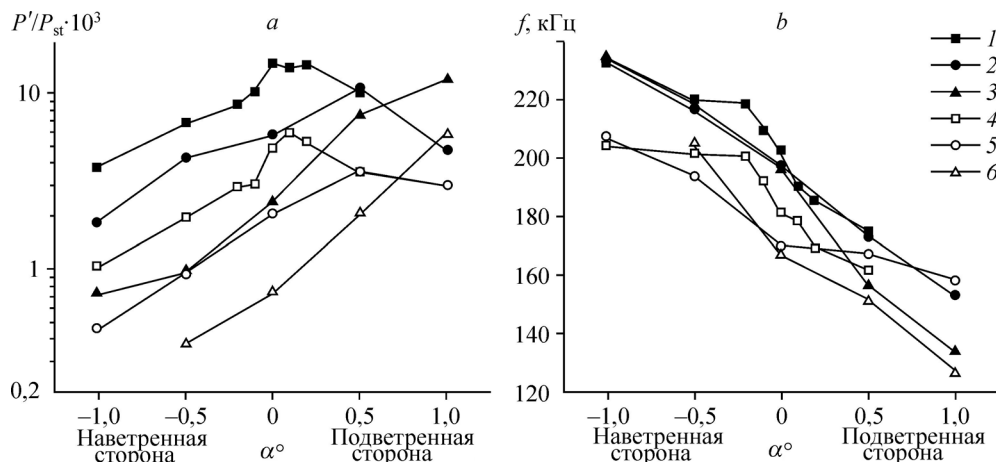


Рис. 5. Зависимость максимума амплитуды возмущений (a) и соответствующей частоты (b) от угла атаки для  $R = 0,03$  (1, 4),  $0,5$  (2, 5),  $1$  (3, 6) мм при  $Re_{1\infty} = 6,8 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$  на сплошной (1–3) и пористой (4–6) поверхностях.

на наветренной поверхности получается тоньше (на это указывает увеличение частоты пика возмущений) и устойчивее, чем при нулевом угле атаки. Пористое покрытие значительно уменьшает амплитуду второй моды возмущений на наветренной стороне при всех исследуемых углах атаки. При использовании носика с радиусом закругления  $R = 1$  мм на наветренной стороне конуса максимум амплитуды второй моды возмущений возрастает как на сплошной, так и на пористой поверхностях. При всех углах атаки на пористой поверхности амплитуда второй моды возмущений оказывается значительно меньше, чем на сплошной.

### Выводы

Проведены экспериментальные исследования влияния протяженности пассивного пористого покрытия на высокочастотные возмущения в гиперзвуковом пограничном слое конуса с закруглением  $R = 0,5$  и  $1$  мм при числе Маха набегающего потока  $M_\infty = 5,8$  и единичных числах Рейнольдса набегающего потока  $Re_{1\infty} = 5,3 \cdot 10^6$  и  $7,2 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$ . Как и в экспериментах на остром конусе [10], в данной серии экспериментов показано, что эффективность стабилизации высокочастотных возмущений при помощи пассивного пористого покрытия зависит от его протяженности. Увеличение протяженности покрытия до  $L = 87$  мм приводит к уменьшению амплитуды второй моды возмущений, а дальнейшее увеличение протяженности до  $L = 247$  мм приводит к постепенному росту её амплитуды.

Проведены экспериментальные исследования влияния углов атаки до  $1^\circ$  на эффективность стабилизации гиперзвукового пограничного слоя пассивным пористым покрытием на конусе с углом полуоткрытия  $7^\circ$  и с радиусами закругления  $R = 0,03, 0,5$  и  $1$  мм. Исследования проведены при числе Маха набегающего потока  $M_\infty = 5,8$  и единичном числе Рейнольдса  $Re_{1\infty} = 6,8 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$ . Показано, что при всех исследуемых углах атаки и радиусах закругления носика конуса пассивное пористое покрытие приводит к замедлению роста второй моды возмущений как на наветренной, так и на подветренной сторонах конуса. Для подветренной стороны показано, что изменение состояния пограничного слоя от ламинарного к переходному на пористой поверхности наступает позже, чем на сплошной.

### Список литературы

1. Fedorov A.V., Malmuth N.D., Rasheed A., Hornung H.G. Stabilization of hypersonic boundary layers by porous coatings // AIAA J. 2001. Vol. 39, No. 4. P. 605–610.
2. Бунтин Д.А., Маслов А.А. Анализ развития возмущений в гиперзвуковом пограничном слое за волнистой поверхностью // Письма в Журн. техн. физики. 2017. Т. 43, № 13. С. 65–72.
3. Paredes P., Choudhari M.M., Li F. Stabilization of hypersonic boundary layers by linear and nonlinear optimal perturbations // 47th AIAA Fluid Dynamics Conference (Denver, USA, 2017). AIAA 2017-3634.
4. Fedorov A.V., Soudakov V., Egorov I., Sidorenko A.A., Gromyko Y.V., Buntin D.A., Polivanov P.A., Maslov A.A. High-speed boundary-layer stability on a cone with localized wall heating or cooling // AIAA J. 2015. Vol. 53, No. P. 2512–2524.
5. Fedorov A.V., Soudakov V.G., Leyva I.A. Stability analysis of high-speed boundary-layer flow with gas injection // 7th AIAA Theoretical Fluid Mechanics Conference (Atlanta, USA, 2014). AIAA 2014-2498.
6. Malmuth N.D., Fedorov A.V., Shalaev V.I., Cole J., Khokhlov A.P., Hites M., Williams D. Problems in high speed flow prediction relevant to control // 2nd AIAA Theoretical Fluid Mechanics Meeting (Albuquerque, USA, 1998). AIAA 1998-2695.
7. Rasheed A., Hornung H.G., Fedorov A.V., Malmuth N.D. Experiments on passive hypervelocity boundary-layer control using an ultrasonically absorptive surface // AIAA J. 2002. Vol. 40, No. 3. P. 481–489.
8. Fedorov A., Shipliyuk A., Maslov A., Burov E., Malmuth N. Stabilization of a hypersonic boundary layer using an ultrasonically absorptive coating // J. Fluid Mech. 2003. Vol. 479. P. 99–124.
9. Fedorov A. Transition and stability of high-speed boundary layers // Annu. Rev. Fluid Mech. 2011. Vol. 43. P. 79–95.

10. **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 // Прикл. механика и технич. физика. 2013. Т. 54, № 4. С. 68–73.
11. **Лукашевич С.В., Морозов С.О., Шиплюк А.Н.** Экспериментальное исследование влияния пассивного пористого покрытия на возмущения в гиперзвуковом пограничном слое. 2. Влияние положения пористого покрытия // Прикладная механика и техническая физика. 2016. Т. 57, № 5. С. 127–133.
12. **Wagner A., Hannemann K., Wartemann V.** Hypersonic boundary-layer stabilization by means of ultrasonically absorptive carbon-carbon material. Part 1: Experimental Results // 51st AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, Aerospace Sciences Meetings (Grapevine, USA, 2013). AIAA 2013-270.
13. **Егоров И.В., Судаков В.Г., Федоров А.В.** Численное моделирование стабилизации сверхзвукового пограничного слоя на плоской пластине пористым покрытием // Изв. РАН. МЖГ. 2006. № 3. С. 39–49.
14. **Wang X., Zhong X.** The stabilization of a hypersonic boundary layer using local sections of porous coating // Phys. Fluids. 2012. Vol. 24, No. 3. P. 034105-1–034105-28.
15. **Stetson K.F., Thompson E.R., Donaldson J.C., Siler L.G.** Laminar boundary layer stability experiments on a cone at Mach 8. Part III: sharp cone at angle of attack // 23rd Aerospace Sci. Meeting. (USA, Reno, 1985). AIAA 1985-0492.
16. **Marineau E.C., Moraru C.G., Lewis D.R., Norris J.D., Lafferty J.F., Johnson H.B.** Investigation of Mach 10 boundary layer stability of sharp cones at angle-of-attack. Part 1. Experiments // 53rd AIAA Aerospace Sci. Meeting (USA, Kissimmee, 2015). AIAA 2015-1737.
17. **Громько Ю.В., Поливанов П.А., Сидоренко А.А., Бунтин Д.А., Маслов А.А.** Экспериментальное исследование естественного шума гиперзвуковой аэродинамической трубы «Транзит-М» // Теплофизика и аэромеханика. 2013. Т. 20, № 4. С. 491–504.
18. **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 Журн. технич. физики. 2012. Т. 38, № 23. С. 83–88.
19. **Lukashevich S.V., Morozov S.O., Shiplyuk A.N.** Experimental investigation of the effect of a passive porous coating on a hypersonic boundary layer stability on a sharp cone at an angle of attack // 15th All-Russian Seminar on Dynamics of Multiphase Media (Russia, Novosibirsk, 3–5 Oct., 2017). AIP Conference Proceedings. 2018. Vol. 1939, No. 1. P. 020047-1–020047-4.

*Статья поступила в редакцию 1 июня 2018 г.*