

# ПРИМЕНЕНИЕ ПАССИВНОГО ПОРИСТОГО ПОКРЫТИЯ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТЬЮ И ЛАМИНАРНО-ТУРБУЛЕНТНЫМ ПЕРЕХОДОМ ГИПЕРЗВУКОВОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ

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

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича  
Сибирского отделения Российской академии наук,  
630090, Новосибирск, Россия*

Управление ламинарно-турбулентным переходом – одна из самых сложных и актуальных задач современной высокоскоростной аэродинамики. При переходе ламинарного пограничного слоя в турбулентный происходит значительный рост тепловых потоков на поверхности летательного аппарата и увеличение сопротивления трения. Эффективный метод управления ламинарно-турбулентным переходом позволит снизить сопротивление трения и тепловые потоки на поверхности летательных аппаратов, улучшив, тем самым, их аэродинамические характеристики. Широко исследуется пассивный метод стабилизации гиперзвукового пограничного слоя с помощью пористых покрытий [1-5]. Пористые покрытия эффективно поглощают энергию высокочастотных акустических возмущений в пограничном слое, что позволяет увеличить длину ламинарного участка [1, 2, 5]. В литературе существует ряд исследований (например, [3, 4]), в которых показано, что пористое покрытие не всегда эффективно. В данной работе проведены детальные исследования влияния протяженности пассивного пористого покрытия на возмущения в гиперзвуковом пограничном слое и ламинарно-турбулентный переход.

## 1. Методика измерений

Эксперименты проведены в гиперзвуковой аэродинамической трубе кратковременного действия Транзит-М при числе Маха  $M_\infty = 5,8$ , числах Рейнольдса  $Re_{1\infty} = (2,6 \div 13,6) \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$ . Модель выполнена в виде конуса с полууглом раскрытия  $7^\circ$ , длина образующей 353 мм. Два высокочастотных датчика давления установлены на противоположных сторонах конуса на расстоянии от носика  $x_g = 343$  мм. Температура поверхности модели  $295 \pm 1$  К. На одной половине модели расположено пористое покрытие протяженностью 286 мм. Расстояние от носика конуса до конца пассивного пористого покрытия  $x_0 = 334$  мм. Покрытие изготовлено из трех слоев нейлоновой сетки с пористостью 44%. Слои повернуты друг относительно друга на  $45^\circ$ . Толщина покрытия 0,18 мм выбрана на основе предыдущих результатов [5], как наиболее эффективная. Для исследования естественных возмущений проведены измерения пульсаций давления на стенке модели при помощи высокочастотных датчиков давления РСВ132А31. Для изменения протяженности пассивного пористого покрытия часть его заклеивалась клейкой лентой толщиной 30 мкм. Протяженность покрытия увеличивалась вдоль образующей конуса, начиная с точки расположенной на расстоянии  $x_0 = 334$  мм к носику модели.

Регистрация теплового воздействия гиперзвукового потока на поверхность модели проводилась с помощью быстродействующего термографического комплекса на основе тепловизора марки “СВИТ” разработанного и созданного в ИФП СО РАН. Температурное разрешение термографического комплекса составляет  $0,027^\circ \text{ С}$ , кадры поля температуры выводятся и записываются в компьютер с частотой 100 Гц. По полученным полям температуры рассчитаны значения теплового потока на поверхности конуса.

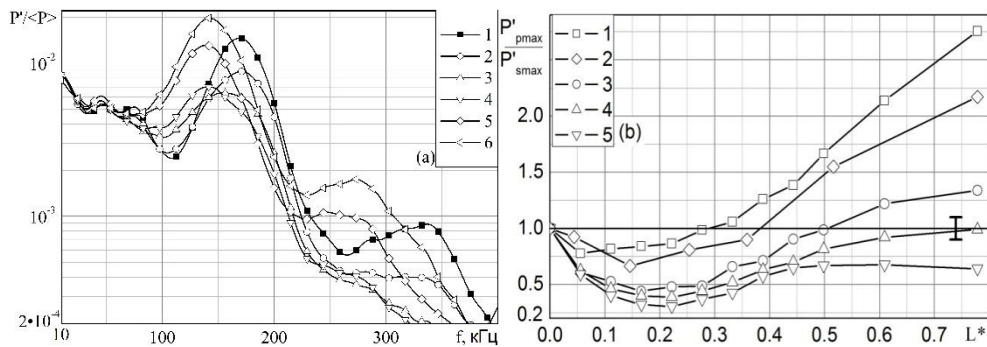


Рис. 1. Спектры пульсаций давления на поверхности острого конуса (а) и зависимость амплитуды максимума второй моды возмущений от протяженности покрытия (б).

(а) -  $Re_{1\infty} = 4,6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$ ; 1 – сплошная поверхность, 2 ÷ 6 – покрытие протяженностью

$L^* = (0,06; 0,17; 0,28; 0,44; 0,78)$ , соответственно.

(б) - 1 ÷ 5 -  $Re_{1\infty} = (2,6; 3,6; 4,6; 6,6; 10) \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$

## 2. Результаты

### 2.1. Влияние протяженности пассивного пористого покрытия на возмущения в гиперзвуковом пограничном слое острого конуса под нулевым углом атаки.

На Рис. 1(а) представлены спектры пульсаций давления для  $M_\infty = 5,8$ ,  $Re_{1\infty} = 4,6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$  на сплошной поверхности острого конуса и на поверхности с пассивным пористым покрытием различной протяженностью,  $L^* = L/x_g$  – безразмерная протяженность покрытия. Видно, что на поверхности с пассивным пористым покрытием возмущения с частотами до  $f = 150 \pm 10 \text{ кГц}$  дестабилизируются, а с частотами  $f = 150 - 220 \text{ кГц}$  стабилизируются. При увеличении протяженности пористого покрытия до  $L^* = 0,17$  амплитуда второй моды возмущений уменьшается, дальнейшее увеличение приводит к росту амплитуды второй моды. На спектрах видно, что при небольшой протяженности пористого покрытия ( $L^* = 0,06$ ) частота максимума амплитуды второй моды возмущений больше, чем на сплошной поверхности. При  $L^* = 0,17 - 0,78$  частота меньше, чем на сплошной поверхности.

Из Рис. 1(б) видно, что при единичных числах Рейнольдса  $Re_{1\infty} = (2,6; 3,6; 4,6) \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$ , соответствующих ламинарному пограничному слою в точке измерения, протяженность, при которой вторая мода возмущений имеет минимальное значение, увеличивается с увеличением единичного числа Рейнольдса. При  $L^* > 0,3$ ,  $L^* > 0,4$  и  $L^* > 0,5$  амплитуда второй моды больше, чем на сплошной поверхности для Рейнольдса  $Re_{1\infty} = (2,6; 3,6; 4,6) \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$ , соответственно. Для единичных чисел Рейнольдса  $Re_{1\infty} = (6,6; 10) \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$ , соответствующих переходному пограничному слою в точке измерения, протяженность пористого покрытия с максимальной эффективностью не зависит от единичного числа Рейнольдса и составляет  $L^* = 0,22$ . Амплитуда второй моды на пористой поверхности остается меньше, чем на сплошной для всех значений протяженности.

### 2.2. Влияние пассивного пористого покрытия на ламинарно-турбулентный переход гиперзвукового пограничного слоя.

На

Рис. 2а показан график теплового потока вдоль оси конуса на сплошной и пористой поверхности при  $Re_{1\infty} = 20 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$ . Протяженность покрытия в данном эксперименте  $L^* = 0,78$ . Переход ламинарного пограничного слоя в турбулентный на сплошной поверхности начинается на расстоянии  $x^* = x/x_g = 0,36$ , после  $x^* = 0,75$  пограничный слой турбулентный. На пористой поверхности переход происходит аналогично сплошной. Таким обра-

зом, при протяженности  $L^* = 0,78$  пассивное пористое покрытие не влияет на положение ламинарно-турбулентного перехода.

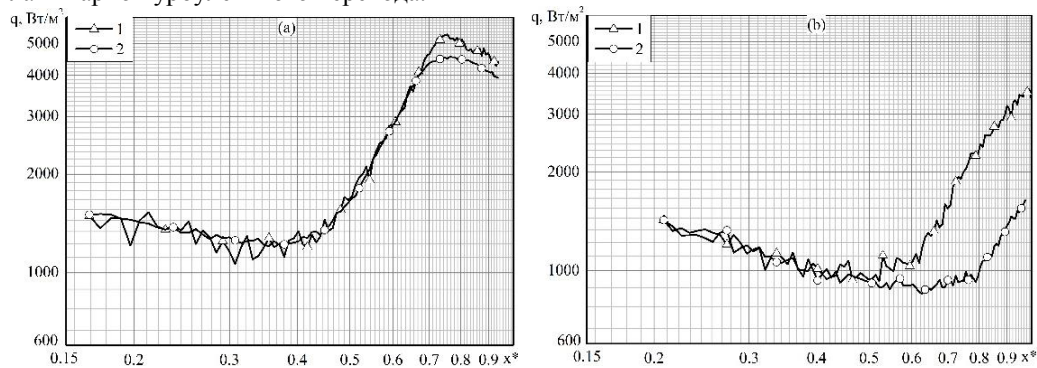


Рис. 2. Тепловой поток на сплошной (1) и пористой (2) поверхности конуса.

(a) –  $L^* = 0,78$ ,  $Re_1 = 20 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$   
 (b) –  $L^* = 0,19$ ,  $Re_1 = 13,6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$

Для того что бы добиться увеличения протяженности ламинарного участка часть пористого покрытия была заклеена. Протяженность открытой части покрытия выбрана на основании результатов исследования, приведенных в первой части данной работы, и составляла  $L^* = 0,19$ . В результате при  $Re_{1\infty} = 13,6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$  начало ламинарно-турбулентный перехода на пористом покрытии ( $x^* = 0,5$ ) сместилось вверх по потоку примерно на 25% относительно положения начала перехода на сплошной поверхности ( $x^* = 0,65$ ) (

Рис. 2б).

### 3. Выводы

Проведены экспериментальные исследования влияния пассивного пористого покрытия различной протяженности на устойчивость и ламинарно-турбулентный переход в гиперзвуковом пограничном слое острого конуса с нулевым углом атаки. Показано, что пористое покрытие в зависимости от протяженности может как стабилизировать, так и дестабилизировать вторую моду возмущений в гиперзвуковом пограничном слое. Определена протяженность покрытия при которой эффективность подавления второй моды максимальна. Исследование влияния покрытия различной протяженностью на ламинарно-турбулентный переход показало, что на покрытии относительно большой протяженности положение перехода не смещается, а при уменьшении протяженности до эффективного значения положение перехода смещается вверх по потоку примерно на 25% относительно положения начала перехода на сплошной поверхности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fedorov A.V., Malmuth N.D., Rasheed A., and Hornung H.G. Stabilization of hypersonic boundary layers by porous coatings // AIAA Journal. 2001. Vol. 39, No. 4. P. 99-124.
2. Maslov A.A., Shpiyuk A.N., Bountin D.A., Sidorenko A.A. Mach 6 boundary-layer stability experiments on sharp and blunted cones // Journal Spacecraft and Rockets. 2006. Vol. 43, No. 1. P. 71-76.
3. Willems S., Gülhan A. Damping of the second mode instability on a cone in hypersonic flow // 7th European Symposium on Aerothermodynamics, Brüggel (Belgien), 2011
4. Xiaowen Wang, Xiaolin Zhong Effect of porous coating on boundary-layer instability // AIAA Paper, 2010. 1243.
5. Лукашевич С.В., Морозов С.О., Шпилюк А.Н. Экспериментальное исследование влияния параметров пассивного пористого покрытия на развитие возмущений в гиперзвуковом пограничном слое // Письма в ЖТФ. - 2012. -Т.38, No.23. -С. 83 – 88.