

На правах рукописи

Лукашевич Сергей Валерьевич

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОРИСТЫХ  
ПОКРЫТИЙ НА УСТОЙЧИВОСТЬ И ПЕРЕХОД ГИПЕРЗВУКОВЫХ ПОГРА-  
НИЧНЫХ СЛОЕВ

01.02.05 - Механика жидкости газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Новосибирск – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук

Научный руководитель:

Шиплюк Александр Николаевич – доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент РАН, директор ИТПМ СО РАН, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук

Официальные оппоненты:

Новиков Андрей Валерьевич – кандидат физико-математических наук, начальник отдела ЦАГИ, доцент МФТИ, Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н. Е. Жуковского

Терехов Виктор Иванович – доктор технических наук, профессор, заведующий отделом термогазодинамики, Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук

Ведущая организация:

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ).

Защита состоится 30 марта 2018 г. в 9:30 часов на заседании диссертационного совета Д003.035.02 в Институте теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук по адресу 630090, Новосибирск, ул. Институтская 4/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН по адресу 630090, Новосибирск, ул. Институтская 4/1.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью учреждения, просьба направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
д.ф.-м.н.



С.А. Гапонов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

В настоящее время во многих странах мира ведутся разработки гиперзвуковых летательных аппаратов: HEXAFLY-INT (ЕС и Россия), SR-72 (США), DF-ZF (Китай), HSTDV (Индия) и т.д., при этом актуальной проблемой является снижение тепловой нагрузки и сопротивления аппарата. Ламинарно-турбулентный переход пограничного слоя приводит к увеличению аэродинамического нагрева поверхности и сопротивления трения гиперзвукового летательного аппарата, поэтому одной из важнейших задач является задержка ламинарно-турбулентного перехода гиперзвукового пограничного слоя. Увеличение ламинарного участка пограничного слоя позволит уменьшить как вес теплозащиты аппарата, так и его сопротивление.

Для управления гиперзвуковыми течениями наиболее интересно использование пассивных методов, когда производится изменение течения, повышающее его устойчивость к возмущениям потока. Наиболее перспективным в настоящее время пассивным методом является использование покрытий, поглощающих ультразвуковые возмущения. В теоретических и экспериментальных работах<sup>1,2</sup> показано, что при помощи ультразвук-поглощающих покрытий (УПП) возможна стабилизация гиперзвуковых пограничных слоев. В качестве УПП используются пористые покрытия. Показано, что такие покрытия позволяют стабилизировать неустойчивые возмущения второй моды, вызывающие переход к турбулентности, и тем самым продлить ламинарный участок. Все эксперименты проводились на моделях острых конусов. Поскольку реальные гиперзвуковые аппараты имеют затупленную переднюю кромку, необходимо исследовать влияния УПП на положение ламинарно-турбулентного перехода на моделях с различными затуплениями носовой части. Теоретически показано, что максимальный эффект стабилизации пограничного слоя достигается при оптимальной толщине пористого покрытия. Однако экспериментальных работ по исследованию влияния толщины УПП на его эффективность не проводилось. Интенсивное нарастание возмущений второй моды начинается на некотором расстоянии от носовой части гиперзвукового летательного аппарата. Следовательно, необходимо определить оптимальное положение и протяженность ультразвук-поглощающего покрытия.

Для применения метода стабилизации гиперзвуковых пограничных слоев при помощи УПП при проектировании перспективных гиперзвуковых летательных аппаратов требуется провести исследования с целью определения параметров УПП, обеспечивающих максимальную протяженность ламинарного участка.

---

<sup>1</sup> Fedorov A.V., Malmuth N.D., Rasheed A., Hornung H.G. Stabilization of hypersonic boundary layers by porous coatings // AIAA J. 2001. V. 39. No. 4. P. 605–610.

<sup>2</sup> 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. V. 40. No. 3. P. 481–489.

**Цель работы** – экспериментальное исследование влияния пористых покрытий на развитие естественных возмущений и ламинарно-турбулентный переход гиперзвуковых пограничных слоев на конусах при нулевом угле атаки.

### **Задачи диссертационной работы**

1. Исследование влияния радиуса затупления носовой части конуса на эффективность стабилизации гиперзвукового пограничного слоя при помощи УПП.

2. Исследование влияния толщины и степени пористости покрытия на стабилизацию возмущений второй моды в гиперзвуковом пограничном слое.

3. Исследование влияния положения и протяженности пористого покрытия на рост естественных возмущений в гиперзвуковом пограничном слое.

### **Научная новизна работы**

Впервые экспериментально показано, что применение УПП приводит к увеличению ламинарного участка гиперзвукового пограничного слоя на затупленном конусе.

Впервые экспериментально изучена зависимость эффективности стабилизации второй моды возмущений на остром конусе от степени пористости и толщины УПП. Показано, что существует оптимальная толщина, при которой УПП обладает максимальной эффективностью.

Впервые экспериментально исследовано влияние протяженности и положения УПП на естественные возмущения в гиперзвуковом пограничном слое острого конуса. Показано, что в зависимости от положения и протяженности УПП может как стабилизировать, так и дестабилизировать возмущения второй моды.

### **Научная и практическая ценность работы**

Научная ценность настоящей работы заключается в определении параметров пассивного пористого покрытия, при которых обеспечивается максимальное увеличение протяженности ламинарного участка гиперзвукового пограничного слоя на поверхности модели.

Практическая ценность результатов исследования заключается в том, что полученные результаты могут быть использованы для уменьшения сопротивления и тепловых нагрузок при проектировании перспективных гиперзвуковых летательных аппаратов.

**Личный вклад автора** заключается в разработке экспериментальных моделей и оборудовании их измерительными элементами, проведении экспериментальных работ, обработке и анализе полученных экспериментальных данных.

**Достоверность полученных результатов** подтверждается сравнением с экспериментальными данными других авторов, полученными в различных аэродинамических установках, а также сравнением с результатами численного моделирования.

**На защиту выносятся** следующие научные положения диссертации.

Результаты экспериментального исследования влияния радиуса затупления носовой части конуса на эффективность стабилизации гиперзвукового пограничного слоя при помощи УПП.

Результаты экспериментального исследования влияния толщины и степени пористости УПП на стабилизацию возмущений второй моды в гиперзвуковом пограничном слое.

Результаты экспериментального исследования влияния положения и протяженности УПП на рост естественных возмущений в гиперзвуковом пограничном слое.

**Основные результаты работы опубликованы** в российских журналах «Механика жидкости и газа», «Письма в ЖТФ», «Прикладная механика и техническая физика», «Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского» и зарубежных журналах «AIAA Journal». Основные результаты диссертационной работы докладывались на российских и международных научных конференциях и семинарах, в том числе «Устойчивость и турбулентность течений гомогенных и гетерогенных жидкостей» (Новосибирск 2008), «Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии: Всеросс. конф. молодых ученых» (Новосибирск, 2009 г.), «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики. XI Всероссийская школа-конференция молодых ученых» (Новосибирск, 2010 г.), «Студент и научно-технический прогресс. Физик: Материалы XLIX Международной научной студенческой конференции» (Новосибирск, 2011 г.), «X Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики» (Нижний Новгород, 2011 г.), «Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии: доклады IX Всероссийской конференции молодых ученых» (Новосибирск, 2012 г.), «Студент и научно-технический прогресс. Физика неравновесных процессов: Материалы 50-й юбилейной Международной научной студенческой конференции» (Новосибирск, 2012 г.), «Студент и научно-технический прогресс. Физика сплошных сред: Материалы 51-й Международной научной студенческой конференции» (Новосибирск, 2013 г.), «Волны и вихри в сложных средах: тезисы докладов Всероссийской [с международным участием] научной школы молодых ученых» (Москва, 2012 г.), «3rd European Conference for AeroSpace Sciences» (France, Versailles, 2009 г.), «AIAA Paper: 40th AIAA Fluid Dynamics Conference» (Chicago, United States, 2010 г.), «5th European Conference for Aeronautics and Space Sciences (EUCASS 2013)» (Germany, Munich, 2013 г.).

**Структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения и списка литературы из 80 наименований, объем работы составляет 106 страниц, включая 6 таблиц и 74 рисунка.

**Публикации.** Основные результаты диссертации представлены в 18 работах, в том числе в 6 публикациях в журналах из перечня ВАК.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность, сформулированы цели работы, задачи и научная новизна. Описаны научная и практическая ценность работы и основные положения диссертации, выносимые на защиту. Представлен список основных публикаций по теме работы, и дана общая структура диссертации.

**Глава 1** содержит обзор работ по исследованию ламинарно-турбулентного перехода гиперзвукового пограничного слоя и способов управления им. Особое внимание уделено работам, посвященным использованию ультразвук-поглощающих покрытий для задачи стабилизации пограничного слоя и увеличения ламинарного участка. Теоретически предсказанный эффект стабилизации второй моды возмущений в гиперзвуковых пограничных слоях при помощи пористых покрытий подтвержден экспериментально на моделях острого конуса под нулевым углом атаки. Показано, что использование пористого покрытия приводит к увеличению ламинарного участка гиперзвукового пограничного слоя на остром конусе. В расчетах получено, что толщина и степень пористости УПП оказывает существенное влияние на стабилизацию второй моды. До настоящего времени не рассматривалось влияние положения и протяженности УПП на его эффективность. Таким образом, требуется проведение экспериментального параметрического исследования влияния пассивных пористых покрытий на развитие естественных возмущений и ламинарно-турбулентный переход гиперзвуковых пограничных слоев с целью определения параметров, при которых достигается максимальный эффект стабилизации.

**Глава 2** включает в себя описание аэродинамических труб, экспериментальных моделей, методов измерений, методик обработки результатов, а также оценки погрешностей измерений.

**В п. 2.1** дано описание аэродинамических труб, в которых проводились эксперименты, и приведены их основные характеристики.

Гиперзвуковая аэродинамическая труба адиабатического сжатия АТ-303 ИТПМ СО РАН предназначена для экспериментальных исследований фундаментальных и прикладных задач гиперзвуковой аэродинамики, связанных с обеспечением продолжительного полета в атмосфере гиперзвуковых летательных аппаратов, оснащенных прямоточными воздушно-реактивными двигателями. За счет высокого давления в форкамере обеспечиваются натурные значения чисел Рейнольдса для гиперзвукового диапазона скоростей  $Re = (6 \dots 1,5) \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$  в диапазоне чисел Маха  $M = (8 \dots 13)$ , большая длительность рабочего режима при постоянном давлении (40...200 мс) позволяет получить установившееся течение. Труба отличается чистотой потока рабочего газа, в котором отсутствуют механические и химические примеси.

Гиперзвуковая аэродинамическая труба Гранзит-М ИТПМ СО РАН предназначена для проведения аэродинамических экспериментов при числах Маха  $M = 4 \dots 8$  и числах Рейнольдса  $Re = (2 \dots 10) \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$ . Давление рабочего газа ( $P_0$ ) до 200 бар, температура торможения ( $T_0$ ) до 650 К.

Приведены результаты измерения полей числа Маха в рабочей части установки Транзит-М для  $M = 6$ . Получена зависимость числа Маха в ядре потока на срезе сопла от единичного числа Рейнольдса. Показано, что сопло установки Транзит-М обеспечивает хорошую равномерность потока в рабочей части установки, а среднеквадратичное отклонение числа Маха в ядре потока не превышает 1,5 %, при удалении от среза сопла число Маха остается практически постоянным.

Выполнено измерение уровня естественных пульсаций в аэродинамических трубах АТ-303 и Транзит-М. Измерения пульсационных характеристик в рабочей части трубы АТ-303 проведены для  $M = 6; 7; 7,5; 8; P_0 = 80 \dots 160$  бар;  $T_0 = 1200 \dots 1500$  К в трёх сечениях относительно среза сопла  $x = 0; 200; 450$  мм. Измерения пульсационных характеристик в рабочей части трубы Транзит-М проведены на срезе сопла для  $M = 4; P_0 = 4; 8$  бар;  $T_0 = 290; 450$  К. Для установки АТ-303 относительные среднеквадратичные пульсации давления ( $\langle P_0' \rangle / P_0'$ ) составляют  $3,7 \pm 0,2$  % для  $M = 6$ ;  $3,3 \pm 0,3$  % для  $M = 7$ ;  $3,4 \pm 0,3$  % для  $M = 7,5$ ;  $3,6 \pm 0,1$  % для  $M = 8$ . Для установки Транзит-М  $\langle P_0' \rangle / P_0' = 4,0 \pm 0,2$  % для  $M = 4$ . Таким образом, можно говорить, что среднеквадратичные пульсации давления установок АТ-303 и Транзит-М соответствуют значениям для обычных аэродинамических труб.

**П. 2.2** посвящен описанию экспериментальных моделей.

**П. 2.2.1** Модель для исследования положения ламинарно-турбулентного перехода выполнена в виде конуса с углом полураствора  $7^\circ$ . Полная длина конуса с острым носиком составляет 1039 мм. Половина поверхности по образующей является сплошной, на другой половине расположено пористое покрытие. Пористое покрытие (Vekipor(r)ST RTP/XL8001) начинается на расстоянии 70 мм и состоит из тонких проволочек из нержавеющей стали диаметром 30 мкм, хаотически расположенных и спеченных друг с другом. Покрытие имеет пористость 75% и полную толщину  $0,75 \text{ мм} \pm 0,1 \text{ мм}$ . Для изучения влияния затупления носовой части конуса на переход использовались сменные носики со сферическими затуплениями радиусами  $R = 0; 1; 2; 4; 8$  мм. Положение ламинарно-турбулентного перехода определялось по результатам измерений распределений теплового потока. Тепловой поток измерялся калориметрическими датчиками с диаметром чувствительного элемента 2,5 мм. Для одновременного измерения распределений тепловых потоков на пористой и сплошной поверхностях установлено 58 датчиков по 29 с каждой стороны. Соседние датчики располагались на разных образующих конуса для того, чтобы исключить влияние датчиков, установленных ниже по потоку, на показания последующих датчиков.

**П. 2.2.2** Экспериментальная модель для исследования влияния толщины УПП на развитие возмущений в гиперзвуковом пограничном слое представляет собой острый конус с углом полураствора  $7^\circ$ , длиной  $L = 0,42$  м. Конус изготовлен из стали и состоит из следующих основных частей: сменной носовой части с острым носиком, базовой части и вставки с пористым покрытием. Для создания пористой поверхности применялась плетёная металлическая сетка

двух размеров: с проволочками диаметром  $d = 0,025$  мм; шириной отверстия сетки  $w = 0,1$  мм; пористостью  $S = 64\%$  и  $d = 0,05$  мм;  $w = 0,1$  мм;  $S = 44\%$ . Степень пористости ( $S$ ) определяется по уравнению  $S = w^2/(d+w)^2$ . Для получения пористых покрытий различной толщины изменялось количество слоев сетки, которые накладывались друг на друга под углом  $45^\circ$  относительно предыдущего. Пористые покрытия различной толщины располагаются на поворотной вставке, которая может поворачиваться вокруг своей оси для смены пористого покрытия, исследуемого в данный момент. Использовались две вставки с покрытиями  $S = 64\%$  и  $44\%$ . На каждой вставке располагалось несколько пористых участков различной толщины: для сетки с  $S = 64\%$  получены покрытия толщиной  $h = 0,04; 0,07; 0,12; 0,15; 0,24; 0,34; 0,39$  мм с количеством слоёв 1; 2; 3; 4; 6; 8; 10 соответственно, для сетки с  $S = 44\%$  – покрытия толщиной  $h = 0,11; 0,18; 0,27; 0,36; 0,43$  мм с количеством слоёв 1; 2; 3; 4; 5 соответственно. Протяженность пористого покрытия вдоль потока составляла 25 мм. Измерение пульсационных характеристик пограничного слоя проводилось при помощи высокочастотных датчиков давления РСВ 132А31. Датчики установлены на стенке модели выше и ниже по потоку относительно вставки с пористыми покрытиями, расстояние между датчиками составляло 42 мм. Данные с датчиков давления записывались с частотой дискретизации 2 МГц.

**П. 2.2.3** Модель для исследования влияния протяженности и положения пористого покрытия на рост возмущений в гиперзвуковом пограничном слое выполнена в виде острого конуса с углом полураствора  $7^\circ$  и длиной образующей 353 мм. Корпус конуса изготовлен из пластика (полиоксиметилен) и имеет возможности установки сменных носовых частей. В данных экспериментах использовалась острая носовая часть, изготовленная из алюминия. На одной половине модели расположено пористое покрытие протяженностью  $L = 286$  мм, расстояние от носика модели до начала пористости  $x = 67$  мм. Покрытие изготовлено из трех слоев нейлоновой сетки, размеры соответствуют сетке с пористостью 44 %, использованной на модели, описанной выше. Слои повернуты относительно друг друга на  $45^\circ$ . Толщина покрытия  $h = 0,18$  мм выбрана как наиболее эффективная на основе результатов исследований, описанных в главе 4. Для изменения положения и протяженности пористого покрытия часть покрытия заклеивалась клейкой лентой толщиной 30 мкм. Увеличение протяженности покрытия конуса происходило от расстояния по образующей  $x = 334$  мм в сторону носика модели. Для исследования влияния положения пористого покрытия использовался открытый участок пористости протяженностью  $L = 38$  мм. Для измерения пульсаций давления на стенке модели в кормовой части ( $x = 343$  мм) установлены высокочастотные датчики давления РСВ 132А31. Один датчик располагался на половине конуса со сплошным покрытием, второй на половине с пористым покрытием, таким образом можно сравнивать амплитуды пульсаций на сплошной поверхности конуса и на поверхности с исследуемым пористым участком. Данные с датчиков давления записывались с частотой дискретизации 2 МГц.



**В П. 2.3** дается описание основных средств измерения с оценками погрешности измерений.

Для измерения распределения теплового потока на поверхности модели конуса использовались калориметрические датчики теплового потока. Корпус датчика выполнен из эбонита, в качестве чувствительного элемента используется медный диск диаметром 2,5 мм и толщиной 0,2 мм, для измерения температуры на внутренней стороне диска установлена термопара Т-типа (медь – константан), диаметр проволочек термопары 0,03 мм. Для герметизации корпус датчика изнутри заливается эпоксидной смолой. С целью уменьшения утечек тепла в корпус датчика часть заливки, соприкасающейся с поверхностью чувствительного элемента и проводами термопары, заполнена теплоизолирующими полыми стеклянными микросферами, позволяющими уменьшить её теплопроводность. Для калибровки датчиков использовался калибровочный стенд, который позволяет создавать воздушный поток с температурой до 300 °С. Горячий воздух подаётся на испытуемый датчик через сопло диаметром 4 мм. Температура потока контролируется хромель-алюмелевой термопарой с диаметром проводников 0,2 мм. Быстродействующий затвор позволяет в нужный момент подать струю горячего воздуха на испытуемый датчик. Затвор выполнен в виде шторки, которая приводится в движение электромагнитом. Работа стенда осуществляется при помощи управляющей программы, предназначенной для управления подачей потока горячего воздуха, контроля его температуры, измерения показаний датчиков теплового потока и вычисления необходимых коэффициентов. Суммарная погрешность определения коэффициентов чувствительности каждого датчика не превышала  $\pm 4\%$ , что соответствует современному уровню точности измерения тепловых потоков.

Для измерения пульсаций давления на поверхности модели использовались высокочастотные пьезоэлектрические датчики давления РСВ 132А31, позволяющие измерять пульсации давления в диапазоне частот от 11 до 1000 кГц, разрешающая способность датчиков составляет 0,007 кПа.

**Глава 3** посвящена описанию результатов экспериментального исследования ламинарно-турбулентного перехода гиперзвукового пограничного слоя на конусе с УПП и различными затуплениями носовой части.

Эксперименты проводились в гиперзвуковой аэродинамической трубе адиабатического сжатия АТ-303 на модели конуса длиной 1 м, описанной в п. 2.2.1 при нулевом угле атаки и числе Маха набегающего потока  $M_\infty = 8$ . Эксперименты проводились при трех значениях единичного числа Рейнольдса  $Re_{1\infty} = (4,4; 5,2; 6,5) \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$  в диапазоне температур торможения  $T_0 = 1130 \dots 1350 \text{ К}$  и давлений торможения  $P_0 = 5,3 \dots 8,5 \text{ МПа}$ . Температура стенки модели составляла  $T_w = 295 \pm 1 \text{ К}$ . Для оценки влияния шероховатости пористой поверхности на переход пограничного слоя рассчитано число Рейнольдса шероховатости  $Re_k = (u_k \cdot \rho_k \cdot k) / \mu_k$ , где  $k$  – высота шероховатости,  $u_k, \rho_k, \mu_k$  – параметры потока в пограничном слое на расстоянии от стенки, равном высоте шероховатости. За высоту шероховатости принимался диаметр проволочек, из которых состоит пористое покрытие, параметры потока в пограничном слое рассчитывались в

точке начала пористого покрытия  $x = 70$  мм от носика модели. Для максимального значения  $Re_{1\infty} = 6,5 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$  число Рейнольдса шероховатости составило  $Re_k = 4,5$ . Полученное значение  $Re_k$  значительно меньше критического числа Рейнольдса шероховатости  $Re_{k,t} > 100$ , известного из литературы<sup>3</sup>. Поскольку шероховатость со значением  $Re_k$  менее критического не влияет на положение перехода, можно говорить о том, что шероховатость пористого покрытия, используемого в данных экспериментах, достаточно мала, чтобы не влиять на переход.

Модель устанавливалась в рабочей части так, чтобы ось модели совпадала с осью сопла, и положение модели проверялось с помощью измерительных инструментов. Небольшие отклонения угла установки оси модели от оси сопла все же возможны. Для оценки влияния этого отклонения эксперимент проводился дважды для каждой комбинации параметров потока с двумя ориентациями пористой поверхности (сверху и снизу). Для этой цели модель поворачивали на  $180^\circ$  вокруг своей оси. Угол поворота модели  $\theta = 0^\circ$  соответствует положению пористого покрытия снизу конуса.

С помощью калориметрических датчиков измерены распределения тепловых потоков на гладкой и пористой поверхностях. Полученные данные показывают хорошее согласование между распределениями тепловых потоков, полученных для двух ориентаций пористой поверхности  $\theta = 0^\circ$  и  $180^\circ$ . Это означает, что угол атаки близок к нулю и набегающий свободный поток является равномерным. Наблюдаются небольшие различия в величине тепловых потоков при противоположной ориентации пористой поверхности. Значения тепловых потоков на нижней половине конуса выше, чем на верхней в среднем на 12 % для сплошной поверхности и на 15 % для пористой поверхности. В дальнейшем положение ламинарно-турбулентного перехода ( $x_{tr}$ ) определялось осреднением координат перехода, полученных в двух пусках при близких числах Рейнольдса для двух ориентаций пористой поверхности (сверху и снизу).

На рис. 1 показаны распределения безразмерного теплового потока по длине модели в виде числа Стантона ( $St$ ) на верхней и нижней частях конуса для различных единичных чисел Рейнольдса набегающего потока ( $Re_{1\infty}$ ) для носика с радиусом затупления  $R = 2$  мм. Также на рис. 1 представлены результаты расчета тепловых потоков на остром конусе для ламинарного и турбулентного пограничного слоев. Измеренные тепловые потоки показывают типичную картину нагрева конуса в гиперзвуковом потоке. В области ламинарного течения тепловой поток уменьшается с ростом  $x$ . В переходной области наблюдается резкое увеличение теплового потока в 2–4 раза, затем тепловой поток снова уменьшается в турбулентной зоне. Видно, что во всех экспериментах область повышенных тепловых потоков (турбулентный участок) на пористой поверхности смещена вниз по потоку относительно сплошной поверхности. В конфигурации с  $R = 4$  мм на пористой поверхности переход не наблюдается. В

---

<sup>3</sup> Braslow A.L. Review of the effect of distributed surface roughness on boundary-layer transition: AGARD rep. 254, April 1960.

конфигурации с  $R = 8$  мм переход не наблюдается ни на пористой, ни на гладкой поверхностях. Получено, что величина тепловых потоков в ламинарной части течения на пористой поверхности больше, чем на гладкой поверхности в среднем на 14–21 %.

Положение ламинарно-турбулентного перехода определялось по полученным распределениям теплового потока. Для определения положения начала и конца перехода принималось, что начало перехода соответствует точке с минимальным значением теплового потока, а конец перехода соответствует точке с максимальным значением теплового потока.

На графике (рис. 2) зависимости числа Рейнольдса начала перехода ( $Re_{tr.b}$ ) от числа Рейнольдса, посчитанного по радиусу затупления носика ( $Re_n$ ), видно, что протяжённость ламинарного участка на пористой поверхности для всех исследованных затуплений носовой части больше, чем на гладкой, и ламинарный участок увеличивается при увеличении радиуса затупления как на сплошной поверхности, так и на пористой.

Для наглядности эффективности пористого покрытия при различных значениях затупления представлены отношения координаты начала перехода на

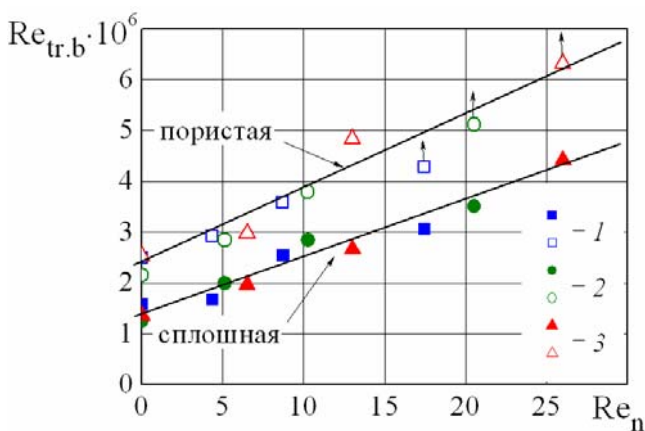


Рис. 2. Зависимость  $Re_{tr.b}$  от  $Re_n$   
Квадратные значки – пористая поверхность,  
треугольные значки – сплошная

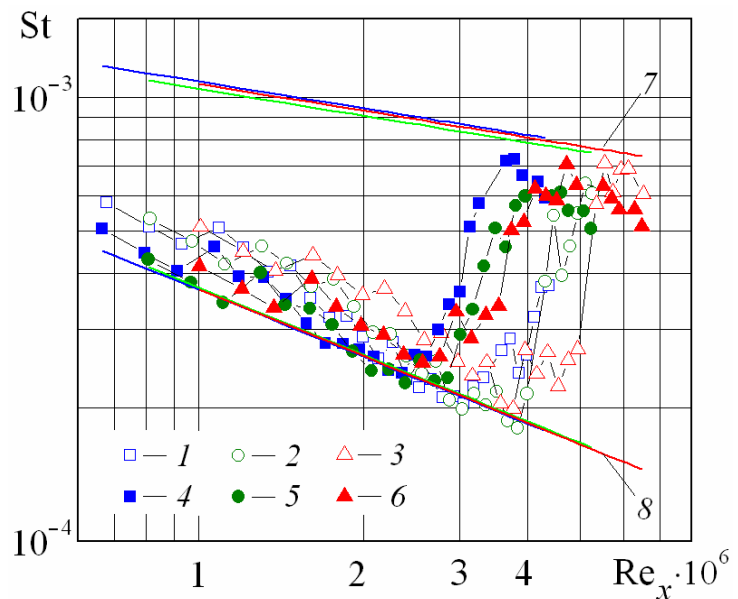


Рис. 1. Распределения тепловых потоков на верхней части конуса для  $R = 2$  мм  
(1, 4) –  $Re_{1\infty} = 4,4 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$ , (2, 5) –  $5,2 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$ ,  
(3, 6) –  $6,5 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$ , тёмные точки – гладкая поверхность, светлые точки – пористая поверхность,  
7 – расчёт турбулентного пограничного слоя, 8 – расчёт ламинарного пограничного слоя

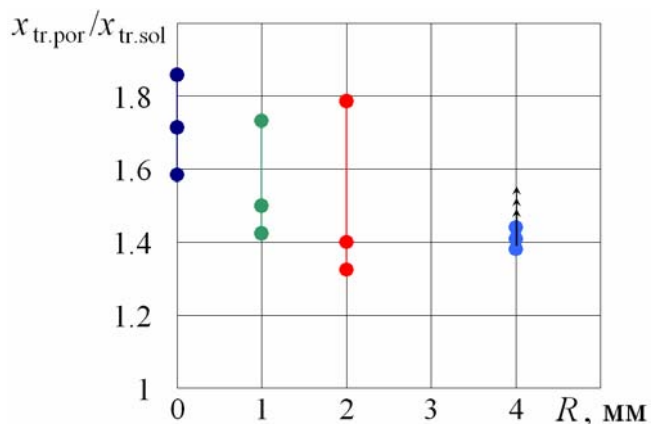


Рис. 3. Отношение  $x_{tr.por}$  на пористой поверхности к  $x_{tr.sol}$  на сплошной для различных радиусов затуплений носиков

пористой поверхности ( $x_{tr,por}$ ) к координате начала перехода на гладкой поверхности ( $x_{tr,sol}$ ) в зависимости от радиуса затупления носовой части (рис. 3). Для каждого радиуса затупления на графике приведены три точки, соответствующие трем значениям  $Re_{1\infty}$ . Для  $R = 4$  мм переход на пористой поверхности происходил за пределами конуса (точки со стрелкой). Видно, что покрытие с хаотической пористостью эффективно увеличивает протяжённость ламинарного участка на 30...85 % во всех экспериментах для острой и затупленной конфигураций конуса.

**В главе 4** приводятся результаты экспериментов по исследованию влияния толщины и степени пористости УПП на стабилизацию второй моды возмущений в гиперзвуковом пограничном слое на модели острого конуса при нулевом угле атаки.

Эксперименты проводились в аэродинамической трубе кратковременного действия Транзит-М при  $M = 5,85$  и  $Re_{1\infty} = (2,6; 4,6; 6,6) \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$ . Температура торможения составляла  $T_0 = 360 \pm 5 \text{ К}$ , температура поверхности модели  $T_w = 295 \pm 1 \text{ К}$ , угол атаки  $\alpha = 0^\circ \pm 2'$ . Экспериментальная модель острого конуса описана в п. 2.2.2.

В течение эксперимента проводились измерения пульсаций давления на поверхности модели конуса в двух точках  $x_1$  и  $x_2$ . Для исследования показаний датчиков выбирался интервал времени от 150 до 300 мс, соответствующий малому изменению параметров потока ( $\pm 7\%$  от среднего). В выбранном интервале времени вычислялись Фурье-спектры пульсации давления в точках  $x_1$  и  $x_2$  соответственно. Спектры рассчитывались по 4096 отсчетам, затем проводилось усреднение по 73 интервалам и сглаживание методом бегущего среднего. Таким образом, частотное разрешение спектров составляло примерно 0,5 кГц. На полученных спектрах видно наличие возмущений второй моды для всех чисел Рейнольдса набегающего потока, что говорит о правильно выбранных режимах течения для исследования возмущений второй моды. Каждому числу Рейнольдса соответствует своя полоса частот второй моды:  $Re_{1\infty} = 2,6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$  соответствует  $f = 75\text{--}150 \text{ кГц}$ ;  $Re_{1\infty} = 4,6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$  –  $f = 100\text{--}220 \text{ кГц}$ ;  $Re_{1\infty} = 6,6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$  –  $f = 120\text{--}270 \text{ кГц}$ . При  $Re_{1\infty} = 2,6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$  и  $Re_{1\infty} = 4,6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$  происходит значительный рост амплитуды второй моды в точке  $x_2$  по отношению к  $x_1$ , при этом амплитуда возмущений с частотами ниже частот второй моды не меняется. Этот режим течения соответствует линейной стадии развития возмущений в пограничном слое. При увеличении числа Рейнольдса до  $Re_{1\infty} = 6,6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$  рост возмущений второй моды прекращается и начинается интенсивный рост низкочастотных возмущений. Такой режим течения соответствует нелинейной стадии развития возмущений в пограничном слое и предшествует ламинарно-турбулентному переходу.

Для определения влияния пористых покрытий различной толщины и степени пористости на развитие возмущений в пограничном слое проводились измерения пульсаций давления в двух точках до и после пористого участка. По результатам измерений вычислялись степени роста возмущений. Результаты приведены на рис. 4 в виде зависимости изменения степеней роста от безраз-

мерной толщины пористого покрытия ( $h^*$ ), нормированной на расчётную толщину вытеснения пограничного слоя. Данные показаны для частот, соответствующих максимальной амплитуде возмущений второй моды. Видно, что для исследованных толщин оптимальные значения лежат в диапазоне  $h^* = 0,05 \dots 0,08$  для  $S = 64\%$  и  $h^* = 0,06 \dots 0,14$  для  $S = 44\%$ , при всех исследованных числах Рейнольдса. При этом максимальное уменьшение степени роста для  $S = 64\%$  и  $S = 44\%$  практически одинаковы.

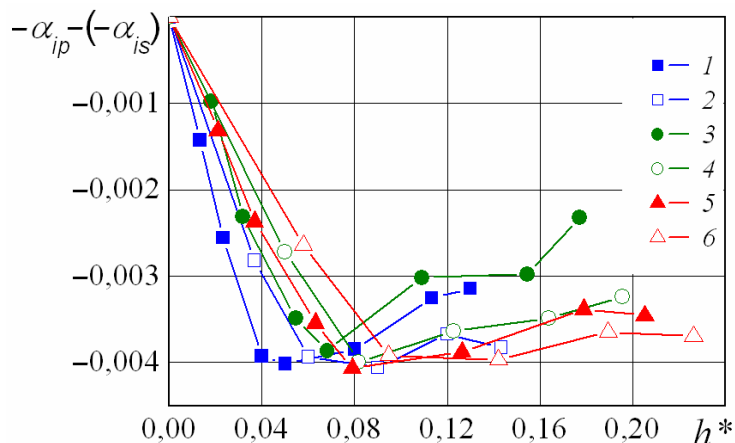


Рис. 4. Изменение степеней роста на пористой поверхности.

Закрашенные символы –  $S = 64\%$ , пустые символы –  $S = 44\%$ . 1, 2 –  $Re_{1\infty} = 2,6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$ ,  $f = 115 \text{ кГц}$ ; 3, 4 –  $Re_{1\infty} = 4,6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$ ,  $f = 150 \text{ кГц}$ ; 5, 6 –  $Re_{1\infty} = 6,6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$ ,  $f = 180 \text{ кГц}$

**В главе 5** описаны исследования влияния положения и протяженности УПП на естественные возмущения в гиперзвуковом пограничном слое на модели острого конуса.

Эксперименты проводились в аэродинамической трубе кратковременного действия Транзит-М при следующих параметрах:  $M = 5,85$ ;  $Re_{1\infty} = (2,6 - 13,6) \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$ ;  $T_0 = 360 \pm 5 \text{ К}$ ;  $T_w = 295 \pm 1 \text{ К}$ . Угол атаки составлял  $\alpha = 0^\circ \pm 2'$ . Экспериментальная модель острого конуса с длиной образующей 353 мм описана в п. 2.2.3. Число Рейнольдса шероховатости  $Re_k$  в точке начала пористого покрытия  $x = 67 \text{ мм}$ , рассчитанное по диаметру проволочек ( $b = 0,05 \text{ мм}$ ) сеток из которых изготовлено пористое покрытие с пористостью 44 %, для наибольшего значения  $Re_{1\infty} = 13,6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$  составило  $Re_k = 4$ . Полученное значение  $Re_k$  меньше критического числа Рейнольдса шероховатости ( $Re_{k,t} > 100$ ), таким образом шероховатость пористых покрытий, используемых в данных экспериментах достаточно мала чтобы не влиять на переход.

**В п. 5.1.** приведены результаты исследования влияния протяженности пористого покрытия на стабилизацию возмущений второй моды в гиперзвуковом пограничном слое.

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 различной протяженности. На рис. 5 показана зависи-

мость максимума амплитуды второй моды возмущений на пористой поверхности ( $P'_{p \max}$ ) нормированного на значение максимума амплитуды второй моды возмущений на сплошной поверхности ( $P'_{s \max}$ ) от протяженности пассивного пористого покрытия. Видно, что для значений  $Re_{1\infty} = (2,6; 3,6; 4,6) \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$ , соответствующих ламинарному пограничному слою в точке измерения, с увеличением протяженности пористого покрытия амплитуда второй моды сначала уменьшается, затем нарастает и превышает значения на сплошной поверхности. При этом протяженность пористого покрытия ( $L$ ), при которой наблюдается максимальное уменьшение амплитуды второй моды, увеличивается с ростом  $Re_{1\infty}$  и составляет  $L^* = 0,06; 0,15; 0,17$  для  $Re_{1\infty} = (2,6; 3,6; 4,6) \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$  соответственно ( $L^* = L/x_g$  – безразмерная протяженность покрытия, нормированная на расстояние от носика до точки измерения пульсаций давления  $x_g = 343 \text{ мм}$ ). Также с ростом  $Re_{1\infty}$  увеличивается и минимальное значение протяженности пористого покрытия, при котором амплитуда второй моды возмущений превышает значение на сплошной поверхности и составляет  $L^* = 0,3; 0,4; 0,5$  для  $Re_{1\infty} = (2,6; 3,6; 4,6) \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$  соответственно. При этом амплитуда второй моды растёт с увеличением протяженности пористого покрытия и достигает наибольшего значения при максимальной протяженности, а максимальный эффект дестабилизации наблюдается при минимальном числе Рейнольдса набегающего потока.

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  $L^* = 0,22$ . При этом при любых значениях протяженности амплитуда второй моды на пористой поверхности остается меньше, чем на сплошной, несмотря на то, что кривая для  $Re_{1\infty} = 6,6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$  при увеличении протяженности до максимального значения приближается к единице, а для

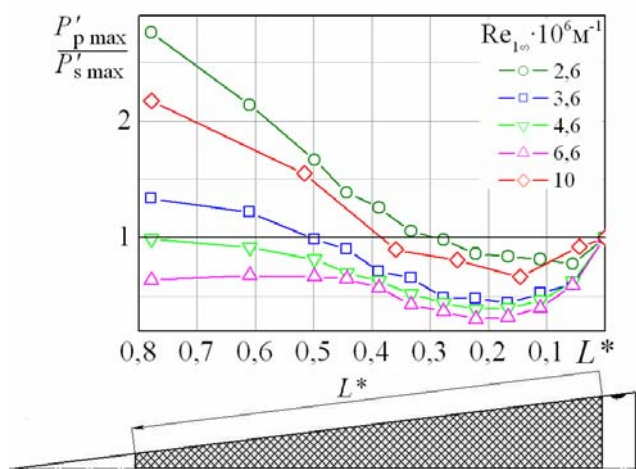


Рис. 5. Зависимость максимума амплитуды второй моды возмущений от протяженности пассивного пористого покрытия

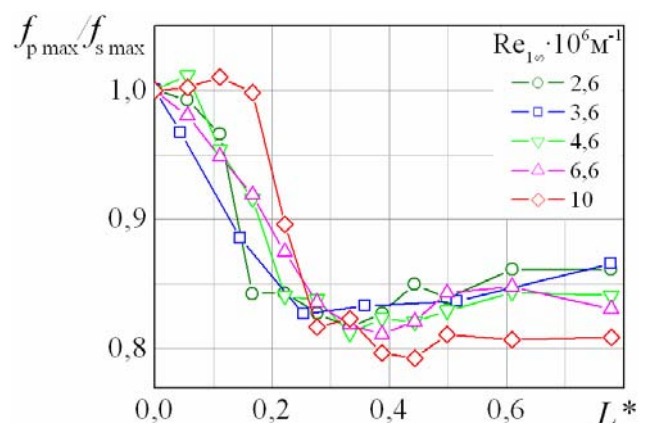


Рис. 6. Зависимость относительной частоты максимума амплитуды второй моды от протяженности пассивного пористого покрытия

$Re_{1\infty} = 10 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$  амплитуда второй моды при протяженности  $L^* \geq 0,44$  практически не изменяется.

В экспериментах получено смещение частоты второй моды на пористой поверхности относительно сплошной. Зависимость относительной частоты максимума амплитуды второй моды возмущений протяженности пористого покрытия показана на рис. 6. Здесь  $f_{s \max}$  и  $f_{p \max}$  – частоты максимума амплитуды второй моды на сплошной и пористой поверхностях соответственно. Видно, что для всех единичных чисел Рейнольдса при увеличении протяженности пористости до  $L^* = 0,28$  частота второй моды уменьшается на 13...20 % и при дальнейшем увеличении протяженности практически не изменяется. Таким образом, видно, что на пористой поверхности большой протяженности наиболее интенсивно нарастают возмущения частоты которых ниже, чем на сплошной.

В результате исследования обнаружено, что эффективность стабилизации второй моды возмущений при помощи пористого покрытия в значительной степени зависит от его протяженности на поверхности модели. Для того, чтобы понять, с чем связано такое влияние пористого покрытия на вторую моду, проведены исследования влияния положения пористого участка фиксированной протяженности на развитие естественных возмущений в гиперзвуковом пограничном слое.

**В п. 5.2** приведены результаты исследования влияния положения пористого покрытия на стабилизацию возмущений второй моды в гиперзвуковом пограничном слое.

Для определения влияния положения пористого покрытия на возмущения в пограничном слое проводились сравнения спектральных характеристик пульсаций давления на сплошной поверхности и на поверхности с пористым участком, расположенным на различном расстоянии от носика модели. Точки измерения пульсаций давления располагались на одинаковом расстоянии от носика модели для сплошной и пористой поверхностей  $x_g = 343 \text{ мм}$ . Таким образом, при неизменных параметрах набегающего потока измерения пульсаций давления в одной точке позволяли определить влияние положения пористого покрытия на вторую моду возмущений.

На Рис. 7 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 безразмерной координаты начала участка с пористым покрытием  $x_b^* = x_b/x_g$ . При значениях чисел Рейнольдса набегающего потока  $Re_{1\infty} = (2,6; 4,6) \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$ , соответствующих ламинарному режиму пограничного слоя в точке измерения, наличие пористого покрытия в носовой части модели приводит к увеличению второй моды (при  $x_b^* = 0,31 \dots 0,53$  и  $x_b^* = 0,31$  соответственно). При увеличении  $x_b^*$  амплитуда второй моды на поверхности с пористым участком уменьшается и достигает минимума при размещении пористого участка максимально близко к точке измерений ( $x_b^* = 0,87$ ). При  $Re_{1\infty} = 2,6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$  максимальное уменьше-

ние амплитуды по сравнению с амплитудой на сплошной поверхности составляет 15 %, при  $Re_{1\infty} = 4,6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$  – 50 %.

Полученные экспериментальные данные сопоставлены с результатами расчетов волновых характеристик пограничного слоя с использованием линейной теории устойчивости для единичных чисел Рейнольдса  $Re_{1\infty} = (2,6; 4,6) \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$ , соответствующих ламинарному пограничному слою в точке измерения. На рис. 8 представлены зависимости  $N$ -фактора и безразмерной амплитуды второй моды на поверхности с пористым покрытием от продольной координаты. Частота возмущения, при которой проводился расчет  $N$ -фактора, соответствует частоте максимума амплитуды второй моды, полученной в экспериментах на сплошной поверхности. Видно, что стабилизация возмущений второй моды имеет место в том случае, если пористого покрытие расположено ниже по потоку относительно точки  $x_b^* = 0,53$ . Чем ближе к хвостовой части конуса установлено пористое покрытие, тем меньше амплитуда второй моды возмущений. Наличие пористого участка выше по потоку относительно точки  $x_b^* = 0,53$  либо приводит к увеличению амплитуды второй моды при  $Re_{1\infty} = 2,6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$ , либо не влияет на амплитуду второй моды при  $Re_{1\infty} = 4,6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$ . При этом координата  $x_b^* = 0,53$  хорошо совпадает с точкой, соответствующей максимальному углу наклона кривой  $N(x_b^*)$ , что соответствует максимальному значению степени роста для данной частоты. Таким образом, для эффективной стабилизации возмущений второй моды необходимо размещать пористое покрытие ниже по потоку относительно точки начала роста второй моды на сплошной поверхности. Размещение пористой поверхности выше по потоку относительно точки начала роста второй моды на сплошной поверхности приводит к началу преждевременного роста возмущений второй моды.

**В заключении** сформулированы основные выводы диссертационной работы.

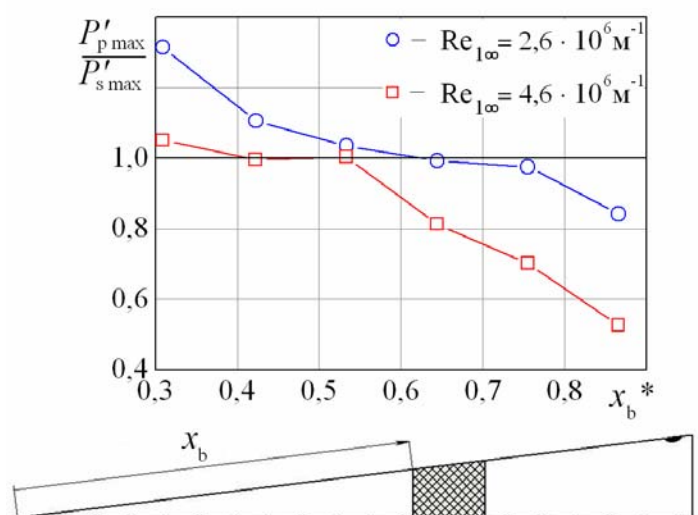


Рис. 7. Зависимость максимума амплитуды второй моды возмущений от положения пористого участка

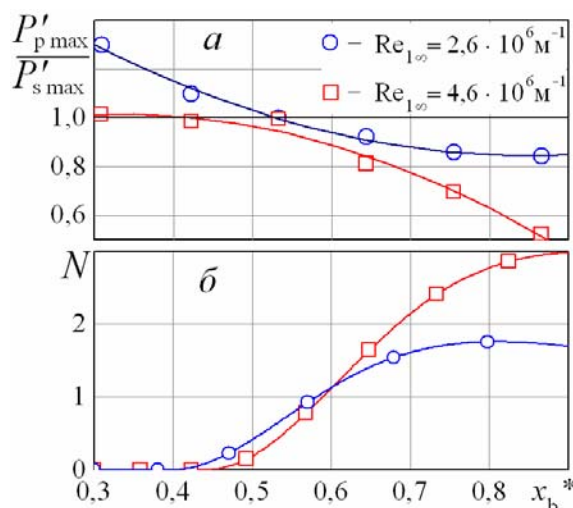


Рис. 8. Сопоставление экспериментальных и расчетных данных  
 а – экспериментальная зависимость максимума амплитуды второй моды, б – расчетная зависимость  $N$ -фактора



В работе проведены параметрические экспериментальные исследования влияния ультразвук-поглощающих покрытий на положение ламинарно-турбулентного перехода и развитие возмущений в гиперзвуковом пограничном слое на модели конуса.

Исследовано влияние УПП на положение ламинарно-турбулентного перехода на модели конуса с различными затуплениями носовой части. Впервые экспериментально показано, что звукопоглощающее покрытие увеличивает протяжённость ламинарного течения как на модели острого конуса, так и на модели затупленного конуса. Подтверждено, что затупление носовой части конуса эффективно увеличивает протяжённость ламинарного течения.

Исследовано влияние толщины и степени пористости на рост возмущений второй моды в гиперзвуковом пограничном слое острого конуса. Показано, что эффективность стабилизации возмущений второй моды при помощи УПП возрастает при увеличении толщины покрытия до определенной величины, а дальнейшее увеличение толщины приводит к незначительному уменьшению эффективности. Показано, что максимальная эффективность покрытий со степенями пористости  $S = 64\%$  и  $S = 44\%$  одинакова.

Исследовано влияние УПП на развитие возмущений в гиперзвуковом пограничном слое острого конуса. Обнаружено, что эффективность стабилизации второй моды возмущений при помощи УПП зависит от его протяженности и положения на поверхности модели. Впервые экспериментально показано, что размещение пористой поверхности выше по потоку относительно нижней ветви нейтральной кривой для второй моды на сплошной поверхности приводит к преждевременному росту возмущений второй моды.

## ОСНОВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

### **Ведущие рецензируемые журналы, входящие в список ВАК:**

1. Бунтин Д.А., Лукашевич С.В., Маслов А.А., Шиплюк А.Н. Влияние затупления носовой части конуса и ультразвук-поглощающего покрытия на переход в гиперзвуковом пограничном слое // Известия РАН. Механика жидкости и газа. - 2010. - No. 6. - С. 74–81.

2. 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, No. 23. - С. 83–88.

3. 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 // Прикладная механика и техническая физика. - 2013. - Т. 54, No. 4. - С. 68–73.

4. 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 // Приклад-

ная механика и техническая физика. - 2016. - Т. 57, No. 5. - С. 127–133. DOI: 10.15372/PMTF20160514.

5. Шиплюк А.Н., Лукашевич С.В. Стабилизация гиперзвукового пограничного слоя с помощью пассивных пористых покрытий // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского: [ X Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (Нижний Новгород, 24–30 авг., 2011 г.)]. - 2011. - No. 4. - Ч. 5. - С. 2615–2616.

6. Lukashovich S.V., Maslov A.A., Shipliyuk A.N., Fedorov A.V., Soudakov V.G. Stabilization of high-speed boundary layer using porous coatings of various thicknesses // AIAA Journal. - 2012. - Vol. 50, No. 9. - P. 1897–1904. DOI: 10.2514/1.J051377.

**Статьи в трудах, материалах международных и всероссийских конференций, в сборниках научных трудов:**

1. Лукашевич С.В., Шиплюк А.Н. Измерение пульсационных характеристик в сверхзвуковых и гиперзвуковых аэродинамических трубах кратковременного действия // Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии: Тез. докл. VII Всеросс. конф. молодых ученых (Новосибирск, 2009 г.) / Под ред. Маслова А.А. - Новосибирск: Сиб. науч. изд-во, 2009. - С. 140–142.

2. Лукашевич С.В., Бунтин Д.А., Шиплюк А.Н. Влияние затупления носовой части конуса и звукопоглощающего покрытия на переход гиперзвукового пограничного слоя // Устойчивость и турбулентность течений гомогенных и гетерогенных жидкостей: Доклады Молодежной конференции. Вып. XI / Под ред. В.В. Козлова. - Новосибирск, 2008. - С. 213–216.

3. Морозов С.О., Лукашевич С.В., Шиплюк А.Н. Экспериментальное исследование влияния параметров пассивного пористого покрытия на развитие возмущений в гиперзвуковом пограничном слое // Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики: Тез. докл. XI Всероссийской школы-конференции молодых ученых (Новосибирск, 2010 г.). Новосибирск, 2010. - С. 64.

4. Лукашевич С.В., Морозов С.О. Экспериментальное исследование влияния параметров пассивного пористого покрытия на развитие возмущений в гиперзвуковом пограничном слое // Студент и научно-технический прогресс. Физика: Материалы XLIX Международной научной студенческой конференции (Новосибирск, 2011 г.). - Новосибирск, 2011. - С. 47.

5. Шиплюк А.Н., Лукашевич С.В. Экспериментальное исследование стабилизации гиперзвукового пограничного слоя с помощью пассивных пористых покрытий [Электронный ресурс] // X Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (Нижний Новгород, 24–30 авг., 2011 г.): [ Докл.]. - No.4. - Нижний Новгород, 2011. - С. CD-ROM.

6. Морозов С.О., Лукашевич С.В. Экспериментальное исследование влияния степени пористости и толщины пассивного пористого покрытия на развитие возмущений в гиперзвуковом пограничном слое // Проблемы механики : теория, эксперимент и новые технологии: доклады IX Всероссийской конфе-

рениции молодых ученых (Новосибирск, 2012 г.) / под ред. В.В. Козлова. - Новосибирск, 2012. - С. 215–218.

7. Морозов С.О., Лукашевич С.В. Исследование влияния длины пассивного пористого покрытия на возмущения в гиперзвуковом пограничном слое // Студент и научно-технический прогресс. Физика неравновесных процессов : Материалы 50-й юбилейной Международной научной студенческой конференции (Новосибирск, 2012 г.) = Proceedings of the 50th International Students Scientific Conference «Students and Progress in Science and Technology». Physics of Non-Equilibrium Processes. - Новосибирск, 2012. - С. 18.

8. Морозов С.О., Лукашевич С.В. Исследование влияния положения пассивного пористого покрытия на возмущения в гиперзвуковом пограничном слое // Студент и научно-технический прогресс. Физика сплошных сред : Материалы 51-й Международной научной студенческой конференции (Новосибирск, 2013 г.) = Proceedings of the 51th International Students Scientific Conference «Students and Progress in Science and Technology». Physics of Continuous Media. - Новосибирск, 2013. - С. 20.

9. Морозов С.О., Лукашевич С.В., Шиплюк А.Н. Экспериментальное исследование влияния протяженности пассивного пористого покрытия на развитие возмущений в гиперзвуковом пограничном слое // Волны и вихри в сложных средах: тезисы докладов Всероссийской [с международным участием] научной школы молодых ученых (Москва, 2012 г.) / ИПМех им. А.Ю. Ишлинского РАН. - М., 2012. - С. 158–160.

10. Shipliyuk A.N., Lukashevich S.V., Bountin D.A., Maslov A.A., Knaus H. Experiments on hypersonic boundary layer transition on blunt cones with acoustic-absorption coating // Progress in Flight Physics / Eds. Reijasse Ph., Knight D., Ivanov M.S., Lipatov I.I. -M.: Torus Press, 2012. - P. 295-304. -(EUCASS Book Series, Advances in Aerospace Sciences. Vol. 3). DOI: 10.1051/eucass/201203295

11. Lukashevich S.V., Morozov S.O., Shipliyuk A.N. Experimental investigation of effect of ultrasonically absorptive coating locations on second mode disturbances in hypersonic boundary layer [Электронный ресурс] // 5th European Conference for Aeronautics and Space Sciences (EUCASS 2013) (Germany, Munich, 2013): Proceedings & abstracts. - S. 1., 2013. - P. 293. - CD-ROM.

12. Lukashevich S.V., Maslov A.A., Shipliyuk A.N., Fedorov A.V., Soudakov V.G. Stabilization of high-speed boundary layer using porous coatings of various thicknesses. - S.l., 2010. - 13 p. - (AIAA Paper: 40th AIAA Fluid Dynamics Conference (Chicago, United States, 2010) / AIAA Publ.; No. 2010–4720).

Ответственный за выпуск С.В. Лукашевич

Подписано в печать 25.01.2018  
Формат бумаги 60 × 84/16, Усл. печ. л. 1.16,  
Уч.-изд. л. 1.0, Тираж 100 экз., Заказ № 4

Отпечатано в типографии ООО «Параллель»  
630090, Новосибирск, Институтская, 4/1