

УДК 532.526

ВЛИЯНИЕ ПОРИСТЫХ ПОКРЫТИЙ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ГИПЕРЗВУКОВЫХ ПОГРАНИЧНЫХ СЛОЕВ

А. Н. Шиплюк, Е. В. Буров, А. А. Маслов, В. М. Фомин

Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, 630090 Новосибирск

Исследовано влияние ультразвук-поглощающих покрытий на устойчивость гиперзвуковых пограничных слоев. В экспериментах использовались два вида таких покрытий: металлический фетр с хаотической пористой микроструктурой и лист, перфорированный глухими цилиндрическими микроканалами. Эксперименты выполнены в аэродинамической трубе при числе Маха $M = 5,95$ на острых конусах с полууглом при вершине 7° . Проведены термоанемометрические измерения развития естественных возмущений и искусственно индуцированных волновых пакетов в пограничном слое. Получены пространственные характеристики искусственных возмущений. Показано, что такие покрытия оказывают стабилизирующее влияние на возмущения второй моды.

Ключевые слова: гиперзвуковые течения, пограничный слой, ламинарно-турбулентный переход, устойчивость, ультразвук-поглощающие покрытия.

Введение. В настоящее время наблюдается повышенный интерес к методам управления состоянием гиперзвуковых пограничных слоев, что связано с разработкой перспективных летательных аппаратов с гиперзвуковой крейсерской скоростью. Ламинарно-турбулентный переход приводит к существенному увеличению сопротивления и сильному локальному нагреву летательного аппарата [1, 2]. Проблема увеличения области ламинарного режима обтекания является одной из важнейших при проектировании гиперзвуковых летательных аппаратов.

В случае малых возмущений набегающего потока (что характерно для реальных полетных условий) и отсутствия шероховатостей начальную стадию ламинарно-турбулентного перехода можно рассматривать как результат возбуждения различных неустойчивых мод [3, 4]. Для двумерных гиперзвуковых течений доминирующими являются возмущения первой и второй моды. Первая мода соответствует волнам Толлмина — Шлихтинга, неустойчивость которых обусловлена влиянием вязкости при низких числах Маха. Эти возмущения можно стабилизировать охлаждением поверхности, отсосом или воздействием благоприятного градиента давления. Охлаждение стенки, естественным образом реализующееся на поверхности гиперзвукового летательного аппарата, существенно стабилизирует первую моду [5], но в то же время дестабилизирует вторую моду [6].

Вторая мода является результатом невязкой неустойчивости, существующей благодаря наличию области сверхзвукового среднего течения относительно фазовой скорости возмущений. Эта мода относится к семейству акустических мод, распространяющихся в волноводе между стенкой и звуковой линией [7]. Для теплоизолированных поверхностей при числах Маха $M > 4$ степень нарастания возмущений второй моды становится больше, чем у первой моды. На охлаждаемых поверхностях вторая мода может преобладать

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 02-01-00141), Европейского отдела аэрокосмических исследований и развития (грант № 2172).

даже при меньших числах Маха [7, 8]. Поскольку гиперзвуковые летательные аппараты в основном имеют плоскую форму с острой передней кромкой, а локальные числа Маха велики ($M_e > 6$), вторая мода здесь является доминирующей неустойчивостью пограничного слоя.

В высокоскоростных потоках вторая мода связана с возмущениями относительно высокой частоты, соответствующей ультразвуковому диапазону. В работе [9] была впервые предложена, а в [10] развита концепция пассивного управления состоянием пограничного слоя с помощью ультразвук-поглощающих покрытий (УПП). Показано, что поверхность с пористой микроструктурой может гасить колебания второй и более высоких мод возмущений.

Впервые данная концепция получила качественное подтверждение в экспериментах [11]. Эксперименты проводились на остром конусе длиной 1 м с полууглом при вершине 7° . Одна сторона конуса была сплошной, другая — пористой, перфорированной глущими цилиндрическими отверстиями (до 100 отверстий на 1 мм^2). Эксперименты проводились при изменении полной энтальпии набегающего потока в диапазоне $4,18 \text{ МДж/кг} \leq H_0 \leq 13,34 \text{ МДж/кг}$ и числе Маха набегающего потока $4,59 \leq M_\infty \leq 6,4$. В большинстве режимов пограничный слой на пористой поверхности был ламинарным на всей длине модели, в то время как переход на сплошной поверхности наблюдался на половине длины конуса. Таким образом, было показано, что пористое покрытие существенно задерживает ламинарно-турбулентный переход. Поскольку возмущения пограничного слоя не измерялись (измерялось только положение перехода), эксперименты не дали прямого подтверждения стабилизации возмущений второй моды пористой поверхностью. Для предсказания свойств ультразвук-поглощающих покрытий и оценки их эффективности необходима детальная информация о структуре и развитии возмущений в пограничном слое на таких поверхностях. Подтверждение стабилизации возмущений второй моды было получено для пористых покрытий с хаотической микроструктурой [12].

Цель данной работы — экспериментальное исследование устойчивости пограничного слоя на УПП с регулярной микроструктурой. Данные для хаотической пористости приведены для сравнения.

1. Экспериментальное оборудование. Эксперименты проводились в гиперзвуковой аэродинамической трубе Т-326 Института теоретической и прикладной механики СО РАН [13]. Т-326 является установкой периодического действия, выполненной по прямоочной баллонной схеме, оснащенной набором профилированных сопел и одноступенчатым перфорированным эжектором. Рабочая часть Т-326 представляет собой камеру со свободной струей. Выходной диаметр сопла 200 мм. Продолжительность пуска определяется режимом работы и достигает 30 мин при $M \approx 6$.

Эксперименты проводились при $M_\infty = 5,95$. Неравномерность поля чисел Маха в ядре потока составляет 0,7 %. Величина флуктуаций массового расхода в условиях экспериментов (около 1 %) типична для данного класса аэродинамических труб.

Параметры потока в форкамере аэродинамической трубы (давление торможения P_0 и температура торможения T_0) в процессе экспериментов измерялись и поддерживались постоянными системой регулирования с точностью 0,1 % и 0,25 % соответственно.

Для перемещения термоанемометрических датчиков использовалось трехкомпонентное координатное устройство, которое обеспечивает точность перемещения 0,01 мм, а для вращения моделей вокруг продольной оси — поворотный механизм, обеспечивающий точность поворота $0,1^\circ$.

В экспериментах испытывались два типа пористой поверхности: с хаотической и регулярной микроструктурой. Первая представляла собой металлический фетр, ее пористый слой состоял из спрессованных тонких проволочек, изготовленных из нержавеющей ста-

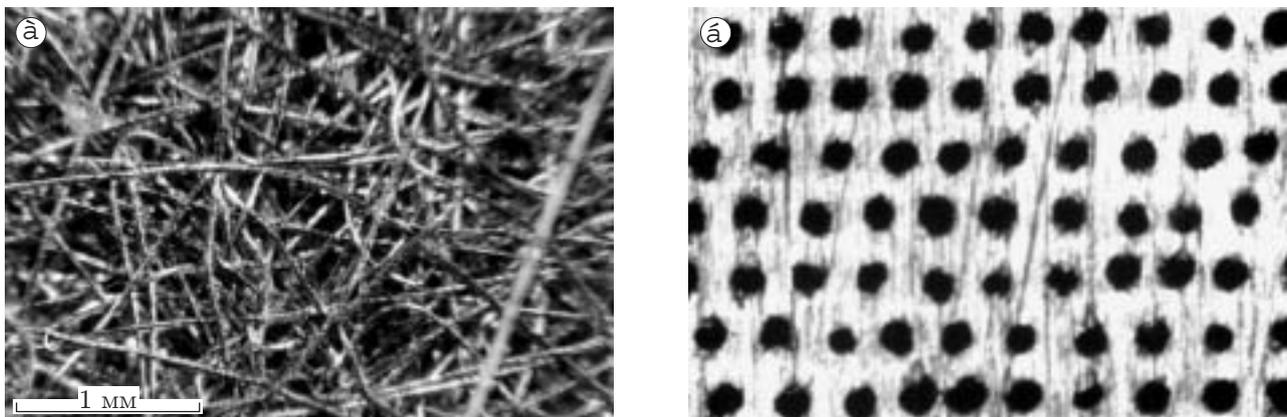


Рис. 1. Пористые покрытия:
 а — металлический фетр; б — перфорированный лист

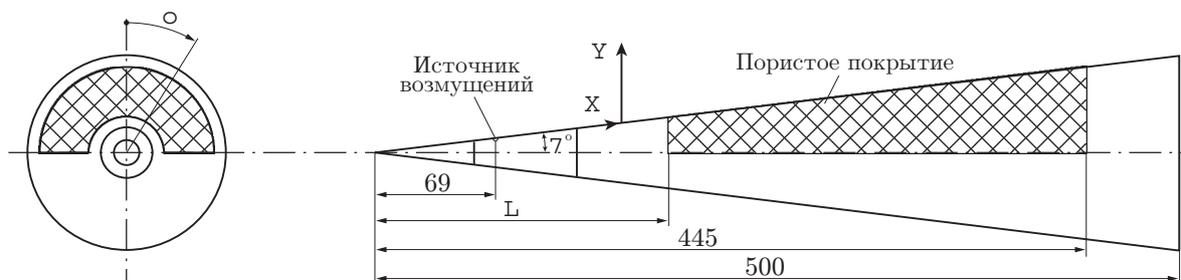


Рис. 2. Схема модели

ли диаметром 30 мкм и соединенных между собой и с подложкой хаотично (рис. 1,а). Толщина покрытия составляла 0,75 мм, средняя пористость $\phi \approx 0,75$. Для обеспечения целостности покрытия слой фетра был нанесен на твердое основание — лист из нержавеющей стали толщиной 0,245 мм. Второй тип исследуемой поверхности — перфорированный лист из нержавеющей стали толщиной 0,45 мм (рис. 1,б). Перфорация выполнена с помощью лазерного сверления. Поры представляли собой цилиндрические отверстия диаметром 50 мкм, расстояние между отверстиями 100 мкм, открытая площадь составляла 20 %, общее число отверстий приблизительно $3,35 \cdot 10^6$. Характеристики этого пористого покрытия аналогичны характеристикам покрытия, применявшегося в экспериментах [11].

В качестве моделей в экспериментах использовались острые конусы длиной 0,5 м с полууглом при вершине 7° . Схема модели приведена на рис. 2. Половина поверхности конуса между образующими была покрыта ультразвук-поглощающим материалом, остальная ее часть была сплошной. На модели с покрытием из металлического фетра покрытие начиналось на расстоянии $L = 186$ мм от носика конуса, для модели с покрытием из перфорированного листа на расстоянии $L = 182$ мм (см. рис. 2). Модель устанавливалась под нулевым к потоку углом атаки. Погрешность установки не превышала $0,05^\circ$.

Измерения средних и пульсационных характеристик пограничного слоя проводились с помощью термоанемометра постоянного тока. Применяемый термоанемометр позволяет вести измерения пульсаций в полосе частот до 500 кГц. Измерения проводились одноточечным датчиком, изготовленным из вольфрамовой проволоки длиной 1 мм и диаметром 5 мкм. Перегрев нити $a_w = (r_w - r_e)/r_e$, где r_w, r_e — сопротивления нагретой и холодной нити соответственно, выбирался равным 0,5. Таким образом, датчик был чувствителен в основном к пульсациям массового расхода.

Для исследования влияния пористых покрытий на устойчивость пограничного слоя изучалось развитие естественных возмущений в пограничном слое. Чтобы получить детальные характеристики возмущений второй моды, применялся метод искусственных волновых пакетов: в пограничный слой вводились возмущения с контролируемой амплитудой и фазой. Главное достоинство этого метода — синхронизация измерений по фазе вводимого возмущения и, значит, возможность получения значения фазы возмущений в любой точке. Пространственные распределения пульсаций массового расхода измерялись термоанемометром и подвергались фурье-анализу, что позволяло получить волновые характеристики пульсаций. Метод был разработан для исследования устойчивости сжимаемых течений [14] и успешно применен к исследованию устойчивости при гиперзвуковых скоростях [15]. Возмущения вводились в поток с помощью высоковольтного периодического электрического разряда, который инициировался в камере, расположенной внутри модели. Разряд зажигался с помощью высоковольтного генератора, производящего импульсы напряжения до 2000 В длительностью около 1 мкс и частотой повторения до 400 кГц. Разрядное устройство располагалось в носовой части модели на расстоянии 69 мм от носика модели. Возмущения проникали в пограничный слой через отверстие диаметром 0,4 мм в поверхности конуса.

Для определения амплитуды (A) и фазы (Φ) контролируемых возмущений использовалось дискретное преобразование Фурье:

$$A(X, Y, \theta) e^{i\Phi(X, Y, \theta)} = \frac{2}{N} \sum_{j=1}^N m_n(X, Y, \theta, t_j) e^{-i\omega t_j},$$

где N — количество отсчетов во временной реализации; ω — частота введения контролируемых возмущений; $m_n(X, Y, \theta, t_j)$ — цифровая осциллограмма пульсаций массового расхода.

Искусственный волновой пакет представлялся в виде набора простых волн. Для этого рассчитывались трансверсальные волновые спектры:

$$SA(x, \beta) e^{iSF(x, \beta)} = \int_{-\theta_0}^{\theta_0} A(x, \theta) e^{i\Phi(x, \theta)} e^{-i\beta\theta} d\theta$$

(здесь SA , SF — амплитудный и фазовый спектры по трансверсальному волновому числу β).

Использованная схема измерений позволяла получать одновременно характеристики как искусственных, так и естественных возмущений.

2. Результаты измерений. Эксперименты проводились при следующих параметрах невозмущенного потока: число Маха набегающего потока $M_\infty = 5,95$, давление торможения $P_0 = 1000$ кПа, температура торможения $T_0 = 385 \div 400$ К, единичное число Рейнольдса $Re_{1\infty} = (11,5 \div 12,3) \cdot 10^6$ 1/м, температура поверхности $T_w = (0,80 \div 0,84)T_0$.

Термоанемометрические измерения показали, что в измерительной области пограничный слой оставался ламинарным как на сплошной, так и на пористых поверхностях. Средние характеристики потока (профиль скорости, толщина пограничного слоя и т. д.) на обеих сторонах были близки друг к другу и к расчетам по теории пограничного слоя. Следовательно, исследуемые пористые покрытия не меняют средних характеристик пограничного слоя. Покрытие с хаотической микроструктурой вызывало не более чем 20 %-е увеличение уровня интегральных пульсаций по сравнению со сплошным покрытием, а покрытие с регулярной микроструктурой вообще не влияло на величину среднеквадратичных пульсаций массового расхода.

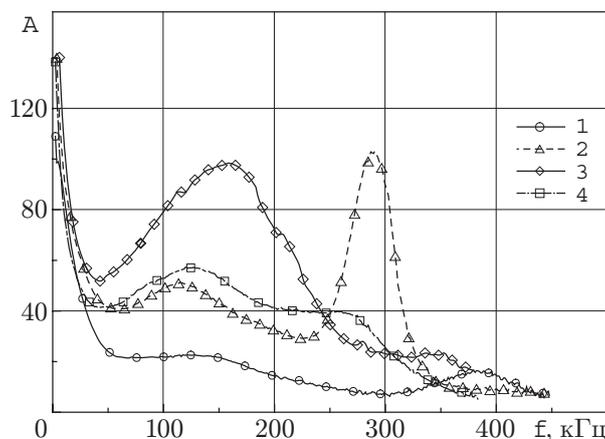


Рис. 3. Амплитудно-частотные спектры пульсаций массового расхода:

1 — начальное сечение (на границе покрытия), $Re_{eX} = 2,8 \cdot 10^6$; 2 — на сплошной поверхности, $Re_{eX} = 4,5 \cdot 10^6$; 3 — покрытие с хаотической структурой, $Re_{eX} = 4,5 \cdot 10^6$; 4 — покрытие с регулярной структурой, $Re_{eX} = 4,5 \cdot 10^6$

Спектры пульсаций массового расхода измерялись на расстоянии от стенки модели Y , соответствующем максимуму пульсаций, в сечениях, равномерно расположенных по оси X . Первое сечение находилось вверх по потоку от передней кромки покрытия. Примеры полученных спектров приведены на рис. 3, где кривая 1 соответствует возмущениям в первом сечении. Анализ показал, что в первых (вверх по потоку) сечениях спектры подобны как для сплошной поверхности, так и для сторон, покрытых УПП. Это говорит о том, что при измерениях на поверхностях разного типа уровень внешних возмущений оставался постоянным. Вниз по потоку от передней кромки покрытия поведение спектров сильно отличается.

На сплошной поверхности (кривая 2) измеренные спектры возмущений типичны для гиперзвуковых пограничных слоев (см., например, [16]). В первых измерительных сечениях вторая мода наблюдается на частоте $f \approx 430 \div 450$ кГц. Ее амплитуда быстро увеличивается вниз по потоку, в то время как центральная частота уменьшается до 270 кГц в последнем положении. Рост возмущений первой моды наблюдается в широкой полосе частот (50 \div 200 кГц). В центре зоны измерений ($Re_{eX} \geq 3,42 \cdot 10^6$) возмущения второй моды становятся больше возмущений первой моды, т. е. первая мода растет медленнее, чем вторая.

На пористом покрытии с хаотической микроструктурой (кривая 3 на рис. 3) происходит сильная стабилизация возмущений второй моды, и при $Re_{eX} \geq 3,3 \cdot 10^6$ (что соответствовало расстоянию от передней кромки покрытия 28 мм) возмущений второй моды не наблюдалось. В то же время происходит сильная дестабилизация низкочастотных возмущений первой моды в полосе частот 100–200 кГц.

Пористое покрытие с регулярной структурой также эффективно стабилизирует вторую моду. Во всей области измерений амплитуды второй моды меньше амплитуд первой моды. Усиление возмущений первой моды практически соответствует усилению на сплошной стороне.

Искусственные возмущения генерировались в пограничном слое с частотами 280 и 275 кГц при измерениях с хаотической и регулярной пористостью соответственно. В области этих частот вторая мода имеет максимальную амплитуду в спектрах естественных возмущений, измеренных на сплошной стороне.

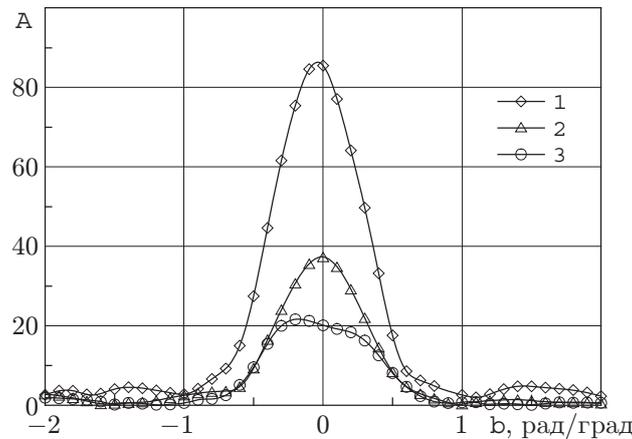


Рис. 4. Распределение амплитуды пульсаций массового расхода в волновом пакете в зависимости от волнового числа при $Re_{eX} = 4,5 \cdot 10^6$:

1 — сплошная поверхность; 2 — покрытие с хаотической микроструктурой; 3 — покрытие с регулярной микроструктурой

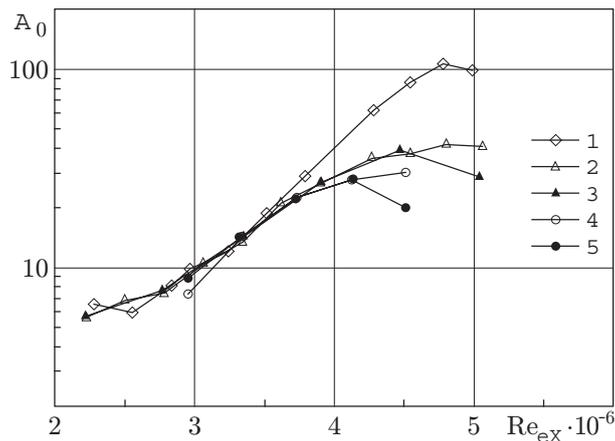


Рис. 5. Развитие второй моды возмущений вниз потока для $f = 275$ кГц:

1 — сплошная поверхность, естественные возмущения; 2, 3 — поверхность с регулярной микроструктурой (2 — естественные, 3 — искусственные возмущения); 4, 5 — поверхность с хаотической микроструктурой (4 — естественные, 5 — искусственные возмущения)

На рис. 4 показаны примеры амплитудных волновых спектров в зависимости от трансверсального волнового числа β . Видно, что весь волновой пакет находится в диапазоне $\beta = \pm 0,3$ рад/град, что приблизительно соответствует диапазону углов наклона волнового вектора $\pm 12^\circ$. Максимум амплитуды наблюдается при $\beta = 0$. Безразмерная продольная фазовая скорость $C_x = 0,9$ практически не меняется с ростом координаты X и совпадает для пористых и сплошной поверхностей. Эти характеристики показывают, что волновой пакет состоит преимущественно из возмущений второй моды для всех исследованных покрытий.

Развитие естественных и искусственных возмущений на сплошной и пористых сторонах показано на рис. 5. Значения амплитуд искусственных возмущений соответствуют значению $\beta = 0$. Видно, что амплитуды искусственных и естественных возмущений практически совпадают. Следовательно, естественные возмущения на этой частоте над

ультразвук-поглощающими поверхностями представляют собой преимущественно двумерные волны второй моды, так же как и на гладкой стороне [16]. Хорошо видно, что использование пористых покрытий приводит к существенному уменьшению роста амплитуды: максимум амплитуды примерно в 3 раза меньше, чем на сплошной стенке. Причем покрытие с регулярной микроструктурой почти столь же эффективно стабилизирует вторую моду, что и покрытие с хаотической микроструктурой.

Заключение. Проведены комплексные исследования устойчивости гиперзвуковых пограничных слоев на конусах длиной 0,5 м с полууглом при вершине 7° , с различными типами пористого покрытия (металлический фетр и лист, перфорированный глухими отверстиями). Эксперименты проводились при числе Маха набегающего потока $M = 5,95$. Анализировалось развитие естественных и искусственных возмущений в пограничном слое.

Измерения средних профилей и интегральных среднеквадратичных пульсаций массового расхода показали, что пограничный слой был ламинарным на сплошной и пористых поверхностях во всех измерительных сечениях. Обнаружено, что пористое покрытие не влияло на среднее течение.

В естественных условиях в пограничном слое наблюдаются первая (низкие частоты) и вторая (высокие частоты) моды. Анализ спектров естественных возмущений показал, что вторая мода доминирует на сплошной стороне. Показано, что ультразвук-поглощающие покрытия стабилизируют вторую моду возмущений, однако повышенная шероховатость дестабилизирует первую моду возмущений (в случае покрытия типа фетр). В случае, когда шероховатость незначительна (регулярный тип пористости), ее влияние на первую моду незначительно.

При исследовании методом искусственных возмущений обнаружено, что доминирующим компонентом волнового пакета является двумерная волна, усиление которой практически соответствует усилению естественных возмущений той же частоты. Это подтверждает, что естественные возмущения высокочастотной полосы являются преимущественно двумерными волнами, относящимися ко второй моде неустойчивости. Показано, что исследованные покрытия существенно уменьшают рост волнового пакета: максимальная амплитуда на пористой стороне примерно в 3 и 4 раза меньше (соответственно для покрытий с регулярной и хаотической микроструктурой), чем на сплошной стороне.

Можно сделать вывод, что пассивное управление пограничным слоем с помощью ультразвук-поглощающих покрытий может стабилизировать пограничный слой и увеличить область ламинарного обтекания гиперзвуковых летательных аппаратов. В этом случае металлический фетр с точки зрения технологичности представляется весьма перспективным материалом, так как следует ожидать, что возбуждение первой моды будет подавлено на холодной стенке гиперзвукового летательного аппарата, поскольку характерное значение температурного фактора находится в диапазоне 0,2–0,3.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Lin T. C., Grabowsky W. R., Yelmgren K. E.** The search for optimum configurations for re-entry vehicles // J. Spacecraft Rockets. 1984. V. 21, N 2. P. 142–149.
2. **Tartabini P. V., Lepsch R. A., Korte J. J., Wurster K. E.** A multidisciplinary performance analysis of a lifting-body single-stage-to-orbit vehicle. N. Y., 2000. (Paper / AIAA; N 2000-1045).
3. **Malik M. R., Zang T. A., Bushnell D. M.** Boundary layer transition in hypersonic flows. N. Y., 1990. (Paper / AIAA; N 90-5232).
4. **Reshotko E.** Boundary layer instability, transition and control. N. Y., 1994. (Paper / AIAA; N 94-0001).

5. **Lysenko V. I., Maslov A. A.** The effect of cooling on supersonic boundary-layer stability // J. Fluid Mech. 1984. V. 147. P. 38–52.
6. **Malik M. R.** Prediction and control of transition in supersonic and hypersonic boundary layers // AIAA J. 1989. V. 27, N 11. P. 1487–1493.
7. **Mack L. M.** Boundary-layer stability theory. Special course on stability and transition of laminar flow // AGARD Rep. 1984. N 709. P. 3-1–3-81.
8. **Kimmel R., Demetriades A., Donaldson J.** Space-time correlation measurements in a hypersonic transitional boundary layer. N. Y., 1995. (Paper / AIAA; N 95-2292).
9. **Malmuth N. D., Fedorov A. V., Shalaev V., et al.** Problems in high speed flow prediction relevant to control. N. Y., 1998. (Paper / AIAA; N 98-2695).
10. **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.
11. **Rasheed A., Hornung H. G., Fedorov A. V., Malmuth N. D.** Experiments on passive hypervelocity boundary layer control using a porous surface. N. Y., 2001. (Paper / AIAA; N 2001-0274).
12. **Fedorov A., Shplyuk A., Maslov A., et al.** Stabilization of a hypersonic boundary layer using an ultrasonically absorptive coating // J. Fluid Mech. 2003. V. 479. P. 99–124.
13. **Григорьев В. Д., Клеменков Г. П., Пирогов А. И., Яковлева Н. В.** Гиперзвуковая аэродинамическая труба Т-326 ИТПМ. Методическое исследование полей скорости и температур: Отчет / Ин-т теорет. и прикл. механики СО АН СССР. Новосибирск, 1980. № 1129.
14. **Maslov A. A., Kosinov A. D., Shevelkov S. G.** Experiments on the stability of supersonic laminar boundary layers // J. Fluid Mech. 1990. V. 219. P. 621–633.
15. **Маслов А. А., Сидоренко А. А., Шиплюк А. Н.** Использование искусственных возмущений для исследования устойчивости гиперзвукового пограничного слоя // Теплофизика и аэромеханика. 1997. Т. 4, № 4. С. 429–433.
16. **Stetson K. F., Kimmel R. G.** Example of second-mode instability dominance at a Mach number of 5.2 // AIAA J. 1992. V. 30, N 12. P. 2974–2976.

Поступила в редакцию 19/XI 2003 г.
