

УДК 532.526

DOI: 10.15372/PMTF202215169

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАБИЛИЗАЦИИ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ С ПОМОЩЬЮ ПОРИСТЫХ ПОКРЫТИЙ (ОБЗОР)

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

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН,
Новосибирск, Россия

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

Выполнен обзор работ, посвященных исследованию стабилизации высокоскоростного пограничного слоя с помощью пористых покрытий. Рассмотрены все используемые в экспериментальных исследованиях покрытия. Показано, что при оптимальных параметрах пористое покрытие может в значительной мере стабилизировать вторую моду возмущений и задержать ламинарно-турбулентный переход высокоскоростного пограничного слоя. Представлен обзор численных исследований пористых покрытий и показано, что для моделирования пористого покрытия используются специальные граничные условия или течение рассчитывается в каждой поре покрытия. Большая часть результатов расчетов, полученных с использованием линейной теории устойчивости и при прямом численном моделировании, хорошо согласуются с экспериментальными данными. Приведены примеры методов оптимизации пористых покрытий и использования перспективных метаматериалов.

Ключевые слова: устойчивость пограничного слоя, пористые покрытия, ламинарно-турбулентный переход, эксперимент, моделирование

Введение. Использовать пористые (ультразвукпоглощающие) покрытия для стабилизации второй моды Мэка в пограничном слое (ПС) впервые предложено в теоретической работе [1], в которой сделано предположение, что энергия высокочастотных возмущений второй и высших мод Мэка может быть поглощена проникаемой поверхностью. В работе [2], посвященной численному и экспериментальному исследованию стабилизации и задержки ламинарно-турбулентного перехода (ЛТП) ПС с помощью пористых покрытий, выполнены расчеты с использованием линейной теории устойчивости и показано, что за счет применения пористых покрытий можно практически полностью стабилизировать вторую моду Мэка. Экспериментальные исследования проводились в высокоэнтампийной аэродинамической трубе Т-5 (Калифорнийский технологический институт, США) на остром конусе с пористой поверхностью при числах Маха $M = 4,59 \div 6,40$. Впервые обнаружено, что на пористой поверхности конуса число Рейнольдса, при котором происходит ЛТП, существенно больше, чем на сплошной поверхности. Таким образом, впервые представлен пассивный метод задержки ЛТП ПС в условиях доминирования второй моды Мэка. Данное открытие положило начало исследованиям, проводимым для подтверждения и дополнения метода стабилизации ПС пассивными пористыми покрытиями. Целью настоящей работы

Работа выполнена в рамках государственного задания Института теоретической и прикладной механики СО РАН.

© Лукашевич С. В., Морозов С. О., Шиплюк А. Н., 2023

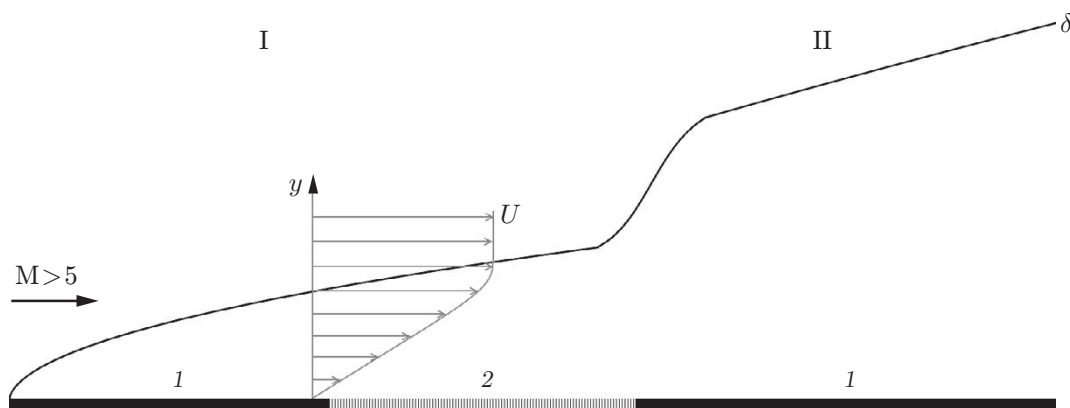


Рис. 1. Схема течения:

I — ламинарный ПС, II — турбулентный ПС; 1 — сплошная поверхность, 2 — пористое покрытие

является обзор начатых в [1, 2] исследований влияния пористых покрытий на устойчивость и ЛТП ПС.

1. Ламинарно-турбулентный переход высокоскоростного пограничного слоя. ЛТП ПС может происходить по разным сценариям в зависимости от степени турбулентности потока, шероховатости обтекаемой поверхности и других факторов внешнего воздействия [3]. Выделяются два основных сценария перехода: 1) естественный (при низкой степени турбулентности среды на гладкой поверхности); 2) обходной (при высокой степени турбулентности и больших значениях (относительно толщины ПС) шероховатости поверхности).

Естественный переход ПС включает несколько этапов: воздействие на ПС внешних возмущений, линейное развитие собственных возмущений ПС, нелинейное развитие возмущений, возникновение турбулентных пятен. При обходном сценарии переход происходит непосредственно за шероховатостью или за счет разрушения ламинарного течения большими внешними возмущениями.

В ПС с числом Маха на внешней границе $M > 5$ собственными возмущениями являются возмущения первой и второй мод Мэка, вихри Гертлера, возникающие на вогнутых поверхностях, вихри поперечного течения (например, на конусе под углом атаки). В случае гладких ровных поверхностей (рис. 1) (плоская пластина, прямой конус) вторая мода возмущений доминирует в двумерных ПС при $M > 5$ и обуславливает возникновение ЛТП. На рис. 1 δ — толщина ПС, y — нормальная к поверхности координата, U — скорость потока.

2. Теоретическая концепция пористых покрытий. В ламинарном ПС возмущения второй моды Мэка распространяются так же, как в волноводе. Акустическая волна, соответствующая второй моде, периодически отражается от поверхности и от звуковой линии. Пористые покрытия используются для поглощения части энергии акустической волны при ее отражении от поверхности. В работе [1] с помощью решения уравнений для возмущений в ПС без учета вязкости показано, что степень нарастания второй моды возмущений на проницаемой поверхности меньше, чем на сплошной. Более детальные расчеты в рамках линейной теории устойчивости ПС с учетом вязкости проведены в работе [2]. Для моделирования проницаемой поверхности устанавливалось граничное условие, полученное в [4] для поверхности с порами в виде глубоких (диаметр канала много меньше его глубины) цилиндрических каналов. Численное исследование показало, что стабилизация второй моды возмущений зависит от параметров пористой поверхности, связанных с длиной волны подавляемого возмущения.

3. Экспериментальные исследования пористых покрытий. Экспериментальные исследования проводились с использованием различных видов пористых покрытий. Исследовалось влияние пористых покрытий на линейную и нелинейную стадии развития возмущений и на ЛТП высокоскоростного ПС. Также изучалось влияние пористых покрытий на устойчивость и ЛТП ПС при числах Маха $M = 2; 3$ [4, 5] и на акустические возмущения в ударном вязком слое [6, 7], однако в данном обзоре рассматриваются только ПС при $M > 5$.

3.1. Пористые покрытия. Экспериментально исследованные пористые покрытия можно разделить на два основных типа: с хаотической и регулярной структурой пор. Пористость σ (отношение площади открытой поверхности к площади всей поверхности), размер пор (в плоскости поверхности) d и глубина пор h являются основными параметрами покрытий. В таблице представлены характеристики пористых покрытий, используемых в экспериментальных исследованиях устойчивости и ЛТП ПС.

В работах [2, 8] пористое покрытие с регулярной структурой (покрытие 1) выполнено в виде эквидистантно расположенных глухих цилиндрических отверстий со средним диаметром $d = 0,06$ мм, средним расстоянием между отверстиями $b = 0,1$ мм, пористостью $\sigma = 20$ % и глубиной $h = 0,5$ мм. Практически аналогичная пористость использовалась в работах [9–14] ($d = 0,05$ мм, $b = 0,1$ мм, $\sigma = 20$ %, $h = 0,45$ мм). В [15] экспериментальные исследования проведены на покрытии 1 при $d = 0,08$ мм, $\sigma = 12,6$ %, $h = 1$ мм.

Пористые покрытия с хаотической структурой в виде металлического фетра (покрытие 2) исследовались в [9, 16–20]. Фетр состоит из хаотически спеченных проволок из нержавеющей стали диаметром 0,03 мм. Толщина покрытия составляла 0,75 мм, средняя пористость $\sigma = 75$ %.

В работах [21–26] исследования проводились на пористых покрытиях, состоящих из нескольких слоев (от 1 до 10) плетеной сетки (покрытие 3). Слои сеток располагались под углом 45° относительно друг друга. Путем использования различного количества слоев толщина покрытия варьировалась в диапазоне $0,04 \div 0,39$ мм. Ширина отверстия сетки составляла $w = 0,1$ мм, диаметр проволоки сетки — 0,025; 0,050 мм. Данное покрытие обладает свойствами как регулярного, так и хаотического покрытия, поскольку имеет регулярную структуру внешней поверхности, зависящую от параметров используемой сетки, и хаотическую внутреннюю структуру, поскольку слои сетки не упорядочены между собой.

В качестве пористого покрытия в работах [27–31] рассматривался углерод-углеродный композиционный материал (покрытие 4), который в силу определенных условий производства обладает хаотичной пористостью. Микротрещины на поверхности углерод-углеродного композиционного материала были направлены перпендикулярно потоку. Средний диаметр пор равен 0,029 мм, средняя пористость — $\sigma = 15$ %, толщина покрытия — $5 \div 17$ мм.

В работах [32–34] исследовались пористые покрытия, получаемые в результате прокатки и спекания металлических порошков (покрытие 5). Средний диаметр пор покрытия 5 из стали марки РМ-35 составлял 0,1 мм, объемная пористость — $25 \div 35$ %.

В [35] в качестве альтернативы пористым покрытиям рассматривались продольные микрокаверны (покрытие 6) с прямоугольным и треугольным профилями. Ширина прямоугольных каверн составляла 0,2 и 0,5 мм, шаг каверн — 0,4; 0,8; 1,0 мм, глубина $h = 0,3 \div 1,5$ мм. Каверны второго типа выполнены в виде равнобедренных треугольников с длиной основания 1 и 2 мм.

Для моделирования пористых покрытий в численных исследованиях наиболее часто используются специальные граничные условия на гладких поверхностях, моделирование течения в каждой отдельно взятой поре проводится реже. Для постановки граничного условия необходимо знать акустические характеристики пористого покрытия.

Характеристики пористых покрытий

Номер покрытия	Структура	d , мм	σ , %	h , мм	Тип покрытия	Работы
1	Регулярная	0,060 0,050 0,080	28,0 20,0 12,6	0,45 (0,50) 0,45 1,00	Лист металла с лазерной перфорацией	[2, 8] [9–14] [15]
2	Хаотическая	0,100	75,0	0,75	Металлический фетр (спеченные хаотическим образом проволоочки диаметром 0,03 мм)	[16–20]
3	Хаотическая	0,100	64,0; 44,0	0,04 ÷ 0,43	Несколько слоев плетеной сетки, соседние слои повернуты относительно друг друга на угол 45°	[21–26]
4	Хаотическая	0,029	15,0	5,00 ÷ 17,00	Углерод-углеродный композиционный материал	[27–31]
5	Хаотическая	0,100	25,0 ÷ 35,0 (объемная)	—	Пористая сталь марки РМ-35	[32–34]
6	Регулярная	0,200 ÷ 2,000	25,0; 50,0	0,30 ÷ 1,50	Набор продольных микрокаверн прямоугольной и треугольной формы	[35]

Измерения акустических характеристик покрытий 1 и 2 проведены в работе [36], покрытия 3 — в работе [25], покрытия 4 — в [37, 38]. В указанных работах исследования проводились при комнатной температуре (295 К). Для покрытий 1 и 2 коэффициент поглощения при атмосферном давлении увеличивается с 0,05 до 0,25 и с 0,15 до 0,70 соответственно при увеличении частоты акустической волны в диапазоне $f = 15 \div 50$ кГц [36]. Показано, что зависимость коэффициента поглощения от давления при давлении меньше атмосферного имеет максимум, обусловленный частотой акустической волны и типом покрытия. В работе [25] показано, что значения коэффициента поглощения пористого покрытия 3 для акустических волн с $f = 108; 130$ кГц при $h = 0,18$ мм, $P = 0,5 \div 99,0$ кПа находятся в диапазоне $0,15 \div 0,35$. Для волны с $f = 46$ кГц коэффициент поглощения равен $0 \div 0,1$. Для покрытия 4 показано, что значения коэффициента поглощения акустических волн с $f = 125 \div 490$ кГц находятся в диапазоне $0,05 \div 0,20$ при давлении $P = 0,025 \cdot 10^5 \div 10^5$ Па [37, 38]. При изменении толщины покрытия от 5 до 30 мм коэффициент поглощения меняется на величину, не превышающую 5 %.

3.2. *Влияние пористых покрытий на развитие возмущений в ПС.* Линейная стадия развития возмущений представляет наибольший интерес с точки зрения концепции управления ЛТП ПС. На линейной стадии можно добиться уменьшения скоростей экспоненциального нарастания собственных возмущений пограничного слоя и тем самым задержать начало быстрого нелинейного развития возмущений, которое происходит при достижении уровня возмущений 1–2 %.

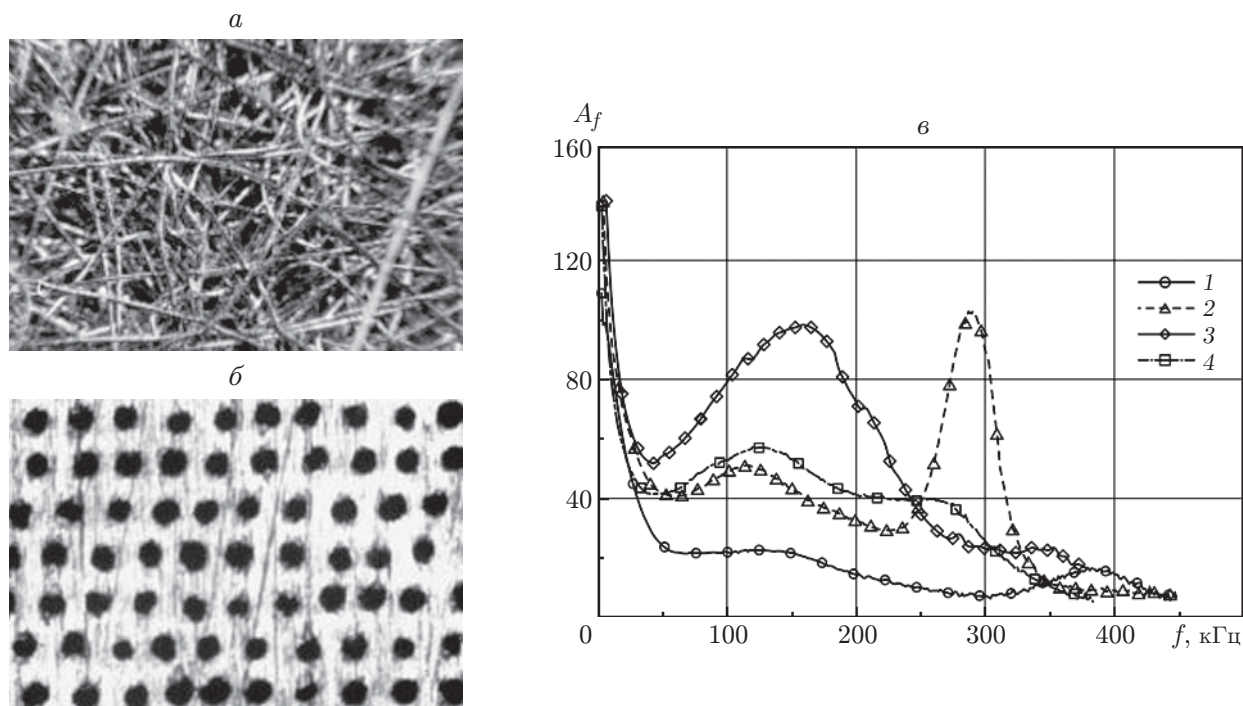


Рис. 2. Типы пористых покрытий (*а*, *б*) и амплитудно-частотные спектры пульсаций массового расхода для них (*в*):

а — покрытие 2 (металлический фетр), *б* — покрытие 1 (перфорированный лист);
 1 — начальное сечение (на границе покрытия) при $Re_{eX} = 2,8 \cdot 10^6$, 2 — сплошная поверхность при $Re_{eX} = 4,5 \cdot 10^6$, 3 — покрытие с хаотической структурой при $Re_{eX} = 4,5 \cdot 10^6$, 4 — покрытие с регулярной структурой при $Re_{eX} = 4,5 \cdot 10^6$ [9]

Впервые экспериментальное подтверждение уменьшения скоростей роста второй моды возмущений было получено в работах [16, 17] для покрытия 2. Экспериментальные исследования проведены на конусе с полууглом раскрытия 7° при $M = 5,92$, $Re_{1\infty} \approx 12 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$, $T_0 \approx 390 \text{ К}$, $T_w/T_0 = 0,82$ (адиабатическая стенка). В [16, 17] исследовались как естественные возмущения, возникающие при взаимодействии пульсаций набегающего потока и ПС, так и искусственные, возникающие вследствие восприимчивости ПС к контролируемым возмущениям, генерируемым поверхностным разрядом. Результаты спектрального анализа показывают, что в случае естественных возмущений экспоненциально нарастающая на сплошной поверхности конуса вторая мода практически полностью стабилизируется на пористом покрытии 2. Однако на покрытии 2 возмущения первой моды нарастают значительно быстрее, чем на сплошной поверхности. Частота вводимых искусственных возмущений соответствовала частоте второй моды. Зависимости амплитуд естественных и искусственных возмущений от продольной координаты модели совпадают.

В работах [10, 12] проведены исследования устойчивости ПС на покрытии 1 при $M = 5,95$, $Re_{1\infty} \approx 12 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$, $T_0 = 385 \div 400 \text{ К}$, $T_w/T_0 = 0,80 \div 0,84$ (адиабатическая стенка). Получено, что на покрытии 1 вторая мода возмущений стабилизируется, а первая мода дестабилизируется незначительно в отличие от покрытия 2. В работе [9] проведено сравнение результатов, полученных на покрытиях 1 и 2 (рис. 2). На рис. 2 $Re_{eX} = Re_e x$; Re_e — единичное число Рейнольдса, вычисленное по параметрам потока на границе ПС; x — координата вдоль конуса. Показано, что амплитуда A_f второй моды возмущений на покрытии 1 в три раза, а на покрытии 2 в четыре раза меньше, чем на сплошной по-

верхности. Амплитуда первой моды возмущений на покрытии 2 в два раза больше, чем на сплошной поверхности, и в 1,7 раза больше, чем на покрытии 1. Качественные зависимости амплитуды второй моды возмущений от продольной координаты конуса для покрытий 1 и 2 совпадают. В работе [15] показано, что на покрытии 1 амплитуда второй моды меньше, чем на сплошной поверхности конуса с полууглом раскрытия 3° при $M = 6$, $Re_{1\infty} = 4 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$, $T_0 = 500 \text{ К}$.

Как известно, при достижении определенной амплитуды (обычно 1–2 %) возмущения начинают обмениваться энергией, т. е. начинается нелинейная стадия развития возмущений. В работах [11, 14] с помощью биспектрального анализа подробно изучено влияние покрытия 1 на нелинейные процессы в ПС конуса с полууглом раскрытия, равным 7° . Исследования проведены при $M_\infty \approx 5,95$, $Re_{1\infty} \approx 12 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$, $T_0 \approx 390 \text{ К}$, $T_w/T_0 = 0,82$ (адиабатическая стенка). Показано, что на пористой поверхности конуса нелинейные взаимодействия более слабые и начинаются ниже по потоку, чем на сплошной поверхности. Гармонический резонанс, наблюдаемый на сплошной поверхности, полностью отсутствует на покрытии 1. Амплитуда биспектров, соответствующая субгармоническому резонансу, увеличивается вниз по потоку как на сплошной, так и на пористой поверхности, однако на пористой поверхности амплитуда значительно меньше, чем на сплошной. На покрытии 1 обнаружены слабые нелинейные процессы, зависящие от первой моды возмущений.

Для покрытия 3 проведен комплекс исследований зависимости устойчивости ПС от таких параметров пористого покрытия, как толщина [21], степень пористости [22], протяженность [23] и положение [24]. Все исследования выполнены на прямом конусе с полууглом раскрытия 7° при числе Маха набегающего потока $M = 5,8$. В работе [21] путем изменения количества слоев плетеной сетки варьировалась толщина покрытия 3 при $T_0 = 353 \text{ К}$, $Re_{1\infty} = 4,5 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$, $T_w = 290 \text{ К}$. По измеренным перед и за пористой вставкой пульсациям давления в ПС получены значения степени роста возмущений. При наименьшей толщине покрытия степень роста второй моды на покрытии больше, чем на сплошной поверхности, для остальных исследуемых толщин — меньше. Экспериментально показано, что зависимость степени роста второй моды возмущений от толщины покрытия, равной $0,04 \div 0,39 \text{ мм}$ (20 % толщины вытеснения ПС), имеет минимум, ранее полученный в расчетах [2]. На покрытии 3 степень роста возмущений первой моды больше, чем на сплошной поверхности, и имеется слабовыраженный максимум, зависящий от толщины покрытия. В работе [22] проведено исследование пористости и толщины покрытия при $T_0 = (360 \pm 5) \text{ К}$, $Re_{1\infty} = 2,6 \cdot 10^6, 4,6 \cdot 10^6, 6,6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$. Показано, что пористые покрытия с пористостью $\sigma = 44; 64 \%$ при одинаковой толщине имеют одинаковую максимальную эффективность подавления второй моды. В работе [23] при фиксированной толщине покрытия 3, равной $0,18 \text{ мм}$ и выбранной в качестве наиболее эффективной в соответствии с результатами [22], изменялась его протяженность относительно длины образующей конуса. На рис. 3 показаны спектры пульсаций давления на поверхности в конце модели (x_g) при различных значениях протяженности покрытия 3 $L^* = L/x_g$ (L — размерная протяженность). Протяженность покрытия увеличивалась в направлении от основания конуса к носику. Экспериментальные исследования проведены при $T_0 = 353 \text{ К}$, $Re_{1\infty} = 2,6 \cdot 10^6 \div 13,2 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$, $T_w = (295 \pm 1) \text{ К}$. Показано, что при увеличении протяженности покрытия 3 до определенного значения максимальное значение амплитуды второй моды уменьшается, а затем увеличивается и становится больше, чем на сплошной поверхности. Для того чтобы понять причину такого явления, в работе [24] проведено исследование влияния положения пористого участка фиксированной протяженности на вторую моду возмущений. На рис. 4 показаны спектры пульсаций давления на поверхности в конце модели (x_g) для различных положений покрытия 3 $x_b^* = x_b/x_g$ (x_b — размерное расстояние от носика конуса до начала покрытия 3). Видно, что в зависимости от по-

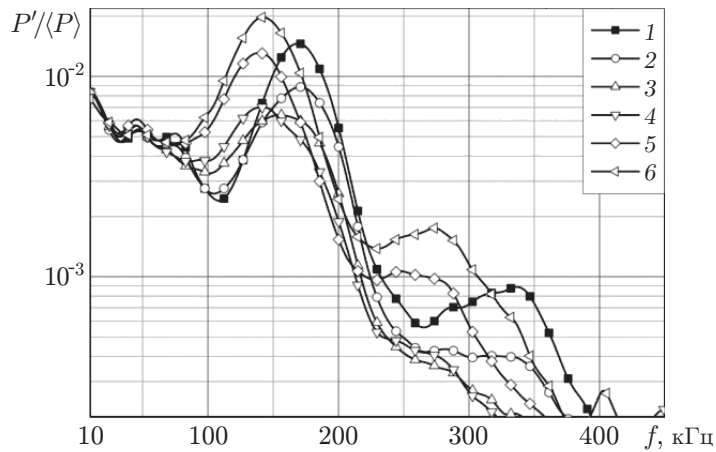


Рис. 3. Спектры пульсаций давления на поверхности конуса при $Re_{1\infty} = 4,6 \times 10^6 \text{ м}^{-1}$ и различных значениях протяженности:

1 — сплошная поверхность, 2–6 — покрытие 3 (2 — $L^* = 0,06$, 3 — $L^* = 0,17$, 4 — $L^* = 0,28$, 5 — $L^* = 0,44$, 6 — $L^* = 0,78$) [23]

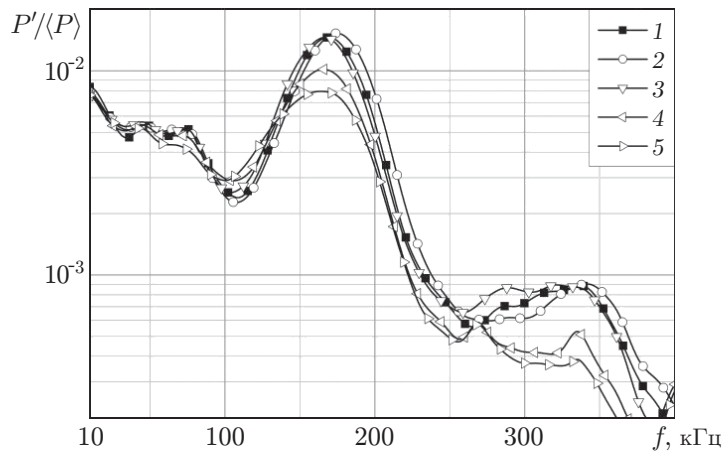


Рис. 4. Спектры пульсаций давления на поверхности модели при $Re_{1\infty} = 4,6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$ и различных положениях пористого участка с фиксированной протяженностью:

1 — сплошная поверхность, 2–5 — покрытие 3 (2 — $x_b^* = 0,31$, 3 — $x_b^* = 0,53$, 4 — $x_b^* = 0,76$, 5 — $x_b^* = 0,87$) [24]

ложения покрытия амплитуда второй моды может быть как больше, так и меньше, чем на сплошной поверхности. В [24] проведено сопоставление экспериментальных данных с результатами расчетов нарастания второй моды вдоль модели в рамках линейной теории устойчивости. Показано, что размещение покрытия 3 перед точкой начала роста второй моды возмущений приводит к увеличению ее амплитуды ниже по потоку, а размещение покрытия за данной точкой приводит к уменьшению ее максимальной амплитуды вниз по потоку. Увеличение амплитуды второй моды возмущений на пористом покрытии относительно сплошной поверхности обусловлено дестабилизацией первой моды в области перед точкой синхронизации быстрой и медленной волн [39]. В работах [25, 26] проведено исследование влияния покрытия 3 на вторую моду возмущений на конусе при углах атаки величиной до 1° для $Re_{1\infty} = 4,6 \cdot 10^6 \div 7,2 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$, $T_0 \approx 387 \text{ К}$, $T_w = (295 \pm 3) \text{ К}$. Показано, что амплитуда второй моды возмущений на покрытии 3 в 1,8 и 2,9 раза меньше, чем на сплошной поверхности, при значениях единичного числа Рейнольдса набегающего потока

$Re_{1\infty} = 4,7 \cdot 10^6; 6,8 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$ соответственно как на наветренной, так и на подветренной поверхности острого конуса ($R_n = 0,03 \text{ мм}$). В [26] показано, что пористое покрытие эффективно уменьшает амплитуду второй моды возмущений на наветренной и подветренной поверхностях конуса при малых радиусах затупления носика $R_n = 0,5; 1,0 \text{ мм}$.

Результаты экспериментального исследования влияния покрытия 4 на возмущения в ПС конуса с полууглом раскрытия 7° приведены в работах [27–31] при значениях числа Маха набегающего потока $M = 7,5$, радиуса затупления носика $R_n = 2,5; 5,0 \text{ мм}$, единичного числа Рейнольдса набегающего потока $Re_{1\infty} = 1,4 \div 4,0 \text{ м}^{-1}$, температуры торможения $T_0 \approx 2700 \text{ К}$, температуры поверхности $T_w \approx 290 \text{ К}$. Результаты измерений пульсаций давления на стенке показали, что вторая мода возмущений нарастает вниз по потоку как на сплошной, так и на пористой поверхности. Амплитуда второй моды возмущений в ламинарном ПС на пористой поверхности приблизительно в 10 раз меньше, чем на сплошной поверхности.

Экспериментальные исследования влияния покрытия 5 на развитие возмущений в ПС конуса с “юбкой” при $M_\infty = 6$, $Re_{1\infty} = 7,0 \cdot 10^6; 9,1 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$ проведены в [32, 33]. Показано, что на пористом покрытии вторая мода проявляется раньше и ее амплитуда больше, чем на сплошной поверхности. Пик на спектрах, соответствующий второй моде на пористом покрытии, сохраняется дольше, чем на сплошной поверхности. Также показано, что на пористом покрытии нелинейные взаимодействия слабее, чем на сплошной поверхности.

Для покрытия 6 проведены экспериментальные исследования влияния формы, размеров и глубины продольных относительно потока канавок, из которых оно состоит, на развитие возмущений в ПС конуса с полууглом раскрытия $6,9^\circ$ [35]. Исследования проведены при $M_\infty = 5,8$, $Re_{1\infty} \approx 2,5 \cdot 10^6; 4,2 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$, $T_0 \approx 410 \text{ К}$, $T_w \approx 295 \text{ К}$. Показано, что на покрытии 6 амплитуда второй моды возмущений приблизительно в 3,5 раза меньше, чем на сплошной поверхности. Показано также, что наиболее эффективно вторая мода подавляется в случае покрытия с глубиной канавок, соответствующей $1/4$ длины волны второй моды. Эффективность подавления второй моды увеличивается с увеличением пористости (отношения ширины к шагу канавок) и ширины канавок в исследуемых диапазонах параметров. Показано, что при различных значениях числа Рейнольдса набегающего потока и геометрических параметров канавок максимальное значение степени роста возмущений на покрытии 6 может быть как больше, так и меньше, чем на сплошной поверхности. Это обусловлено дестабилизацией первой моды. Установлено, что степень роста первой моды увеличивается с ростом глубины и ширины канавок.

3.3. Влияние пористых покрытий на ламинарно-турбулентный переход ПС. Как указывалось выше, впервые результаты экспериментальной проверки эффективности использования пористых покрытий были представлены в работах [2, 8] для покрытия 1. Исследования проводились на прямом остроконечном конусе с полууглом раскрытия 5° . В качестве рабочих газов использовались азот (N_2) и углекислый газ (CO_2). Для азота исследования выполнялись при значениях числа Маха набегающего потока $M_\infty = 5,5 \div 6,4$, полной энтальпии $H_0 = 3 \div 13 \text{ МДж/кг}$, $P_0 = 11 \div 50 \text{ МПа}$; для углекислого газа — при $M_\infty = 4,5 \div 5,7$, $H_0 = 1,3 \div 9,0 \text{ МДж/кг}$, $P_0 = 9 \div 40 \text{ МПа}$. В ходе экспериментов получено распределение вдоль модели тепловых потоков, определенных по показаниям коаксиальных термопар. В результате найдено положение ЛТП на сплошной и пористой поверхностях. Показано, что в случае обтекания конуса азотом при всех значениях исследуемых параметров ЛТП на покрытии 1 происходит позднее, чем на сплошной поверхности. За счет использования пористого покрытия число Рейнольдса перехода увеличивается не менее чем на 45 %. В случае углекислого газа при полной энтальпии $H_0 \approx 1 \div 3 \text{ МДж/кг}$ переход на покрытии 1 происходит позднее, чем на сплошной поверхности, а при $H_0 > 3 \text{ МДж/кг}$ переход наступает раньше. Отмечено также, что влияние покрытия на задержку ЛТП зависит от

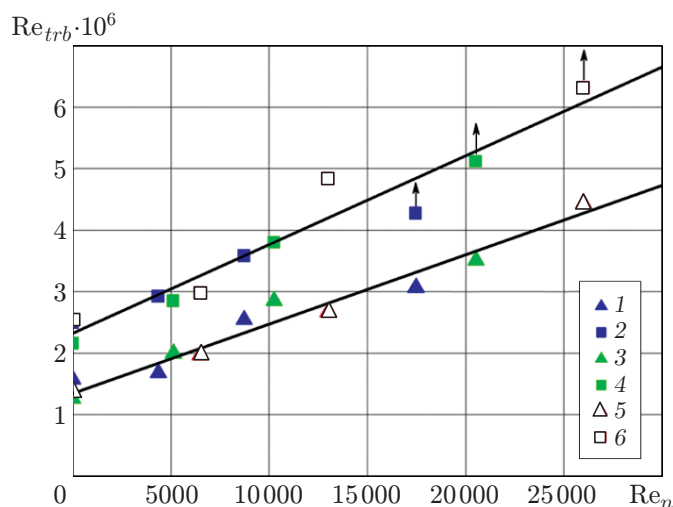


Рис. 5. Зависимость числа Рейнольдса начала ЛТП Re_{trb} от числа Рейнольдса Re_n , вычисленного по радиусу затупления носика [40], при различных значениях единичного числа Рейнольдса:

1, 3, 5 — сплошная поверхность, 2, 4, 6 — пористое покрытие; 1, 2 — $Re_{1\infty} = 4,4 \times 10^6 \text{ м}^{-1}$, 3, 4 — $Re_{1\infty} = 5,2 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$, 5, 6 — $Re_{1\infty} = 6,5 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$

числа Рейнольдса, определенного по параметрам на границе ПС и диаметру пор. Показано, что чем больше число Рейнольдса, тем меньше влияние пористого покрытия на задержку перехода. В [15] наличие покрытия 1 не привело к смещению положения ЛТП, несмотря на уменьшение амплитуды второй моды Мэка.

Экспериментальные исследования влияния покрытия 2 на положение ЛТП выполнены на конусе с полууглом раскрытия 7° [18, 19]. В работе [18] исследования проведены на конусе с острым носиком при $M_\infty \approx 12$, $Re_{1\infty} = 4 \cdot 10^6 \div 14 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$ ($Re_{1e} = 6,8 \cdot 10^6 \div 23,4 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$), $T_0 = 915 \div 1463 \text{ К}$, $T_w \approx 295 \text{ К}$. Положение ЛТП получено по распределениям тепловых потоков, определенных с помощью калориметрических датчиков. Показано, что на покрытии 2 число Рейнольдса начала перехода на $5 \div 100 \%$ больше, чем на сплошной поверхности. Эффективность задержки перехода пористым покрытием увеличивается с увеличением единичного числа Рейнольдса набегающего потока. В работе [19] исследования проведены на таком же конусе, как в [18], при $M_\infty \approx 8$, $Re_{1\infty} = 4,4 \cdot 10^6 \div 6,5 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$, $T_w \approx 295 \text{ К}$ и различных радиусах затупления носика. Показано, что покрытие на $30 \div 80 \%$ увеличивает протяженность ламинарного ПС на конусе с радиусом затупления носика до 4 мм. В [40] с использованием результатов [18, 19] показано, что число Рейнольдса начала перехода ($Re_{trb} = Re_{1\infty} x_{trb}$, где x_{trb} — координата начала перехода) увеличивается при увеличении числа Рейнольдса по радиусу затупления носика конуса ($Re_{trb} = Re_{1\infty} R_n$) на сплошной и пористой поверхностях (рис. 5).

Исследование влияния покрытия 3 на положение ЛТП на конусе с полууглом раскрытия 7° проведено в [25] при $M_\infty = 5,8$, $T_0 = 380 \text{ К}$, $Re_{1\infty} = 20 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$, $T_w \approx 295 \text{ К}$. Показано, что на покрытии положение конца перехода (начала турбулентного ПС) смещается вниз по потоку относительно сплошной поверхности на 5% при углах атаки до 1° .

В работах [27, 28, 31] представлены результаты исследования влияния покрытия 4 на положение ЛТП ПС на конусе с полууглом раскрытия 7° при $M_\infty = 7,5$, $Re_{1\infty} = 1,2 \cdot 10^6 \div 9,8 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$, $T_0 \approx 2700 \text{ К}$, $T_w \approx 290 \text{ К}$. Показано, что в случае покрытия 4 на конусе с радиусом затупления носика 2,5 мм протяженность ламинарного участка ПС на $0 \div 49 \%$ больше, чем на сплошной поверхности, при этом чем больше число Рейнольдса,

тем больше влияние пористого покрытия. На конусе с радиусом затупления носика 5 мм положение ЛТП на пористом покрытии при $Re_{1\infty} = 6,4 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$ смещается на 21 %, при меньших значениях числа Рейнольдса ЛТП на пористом покрытии не наблюдался.

В работе [32] показано, что на покрытии 5 положение перехода смещается вниз по потоку приблизительно на 5 % относительно сплошной поверхности конуса с “юбкой” при $M_\infty = 6$, $Re_{1\infty} = 7,0 \cdot 10^6$; $9,1 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$.

4. Численные исследования. Численные исследования влияния пористых покрытий на устойчивость ПС проведены с использованием линейной теории устойчивости и прямого численного моделирования. Пористые покрытия моделировались двумя способами: с помощью специальных граничных условий на гладкой поверхности и путем прямого расчета течения в порах. Заметим, что последний метод требует больших вычислительных ресурсов.

4.1. Моделирование покрытия с помощью прямого расчета течения в порах. В работах [41–47] проведено прямое численное моделирование покрытия, в котором каждая пора разрешается расчетной сеткой. Поскольку на каждую длину волны второй моды возмущений должно приходиться несколько десятков пор, для каждой из которых необходимо построить мелкую расчетную сетку, для задачи пространственной неустойчивости требуются расчетные сетки с большим количеством расчетных ячеек. Решение уравнений на описанных сетках доступно только на высокопроизводительных многопроцессорных супер-ЭВМ кластерного типа со специально разработанными алгоритмами распараллеливания расчетов. Поэтому в указанных работах вычисления проводились для временной неустойчивости. В данной постановке задачи можно ограничиться расчетной областью, включающей лишь одну длину волны в продольном направлении потока. В работе [41] показано, что продольное волновое число и степень роста второй моды возмущений, полученные при решении задачи временной неустойчивости, совпадают с соответствующими значениями, полученными при решении задачи пространственной неустойчивости с использованием преобразования Гастера. В работах [41–47] исследованы только поры прямоугольной формы, что позволяет использовать структурированную расчетную сетку во всей расчетной области включая поры. Расчетная сетка содержит приблизительно $10 \div 60$ узлов, приходящихся на ширину одной поры, и приблизительно 100 узлов, приходящихся на глубину поры. В продольном к поверхности направлении расчетные узлы расположены эквидистантно, в нормальном к поверхности направлении проводится сгущение расчетных узлов, при этом в работах [45, 47] вблизи поверхности введена подобласть, где ячейки расположены эквидистантно, что обусловлено особенностями применяемого метода “затопленной” границы. В работах [41–45] показано, что результаты прямого численного моделирования и результаты, полученные с использованием линейной теории устойчивости, хорошо согласуются на начальных стадиях развития возмущений на пористой поверхности. Показано, что возможны два режима стабилизации второй моды возмущений: затухание волн в длинных порах и взаимодействие падающей и отраженной от дна пор волн [44]. В зависимости от глубины пор отраженная волна имеет различные значения фазы. Максимальная стабилизация второй моды происходит при взаимодействии волн в противофазе. В работе [44] установлено, что при большом значении пористости (80 %) возникает новая неустойчивая мода возмущений, степень роста которой может быть больше, чем у второй моды возмущений. Прямое численное моделирование позволяет не только проследить за развитием возмущений на линейной стадии, но и смоделировать дальнейшее развитие возмущений на переходной стадии ЛТП. В работах [46, 47] исследован процесс перехода на сплошной и пористой поверхностях и показано, что пористые покрытия задерживают начало ЛТП и процесс перехода на них имеет особенности.

4.2. *Моделирование покрытия с помощью специального граничного условия.* На пористом покрытии в отличие от сплошной поверхности пульсации скорости не равны нулю, а зависят от пульсаций давления. Как показано в [2, 17], можно использовать только граничное условие для нормальной составляющей пульсации скорости, а продольной и трансверсальной компонентами можно пренебречь. Также было показано, что пульсации температуры, возникающие на пористом покрытии, незначительно влияют на результаты расчетов устойчивости, поэтому на покрытии пульсации температуры принимаются равными нулю. Таким образом, граничные условия на пористой поверхности можно записать в виде

$$u = 0, \quad v = Ap, \quad w = 0, \quad t = 0, \quad (1)$$

где u, v, w — продольная, нормальная и трансверсальная составляющие пульсаций скорости соответственно; p, t — пульсационные составляющие давления и температуры; A — акустическая проницаемость покрытия. Комплексный коэффициент A зависит от характеристик пористого покрытия, осредненных характеристик потока на поверхности и характеристик пульсаций потока (длины волны, частоты). Приведем формулы для определения коэффициента A , использованные в работах, где проведено сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными.

В работе [2] для определения константы распространения и импеданса используются формулы

$$A = \frac{\sigma}{Z_0} \operatorname{th}(\Lambda h), \quad Z_0 = \sqrt{Z_1/Y_1}, \quad \Lambda = \sqrt{Z_1 Y_1}, \quad Z_1 = \frac{i\omega}{T_w} \frac{J_0(\lambda_1)}{J_2(\lambda_1)}, \quad (2)$$

$$Y_1 = -i\omega M_e^2 \left(\gamma + (\gamma - 1) \frac{J_2(\lambda_2)}{J_0(\lambda_2)} \right), \quad \lambda_1 = r \sqrt{\frac{i\omega \rho_w}{\mu_w} \operatorname{Re}}, \quad \lambda_2 = \lambda_1 \sqrt{\operatorname{Pr}},$$

полученные в рамках теории распространения звука в длинных каналах. Коэффициент пористости σ в выражении для A появляется в результате осреднения пульсаций скорости на поверхности. Множитель $\operatorname{th}(\Lambda h)$ соответствует отражению волны от дна пор без потерь, и для глубоких пор ($\Lambda h \rightarrow \infty$) $A = -\sigma/Z_0$. В экспериментальной работе [2] отсутствует сравнение экспериментальных данных с расчетными, однако используемое пористое покрытие выбрано на основе расчетов и показано существенное влияние этого покрытия на задержку ЛТП.

Полуэмпирические формулы

$$A = -\frac{\sigma}{Z_0} \operatorname{th}(\Lambda h), \quad Z_0 = \frac{\sqrt{\tilde{\rho}/\tilde{C}}}{M_e \sqrt{T_w}}, \quad \Lambda = -\frac{i\omega M_e}{\sqrt{T_w}} \sqrt{\tilde{\rho}\tilde{C}}, \quad \tilde{\rho} = \frac{\tilde{\rho}^*}{\rho_w^*} = a_\infty \left(1 + \frac{g(\lambda_1)}{\lambda_1} \right),$$

$$\tilde{C} = \gamma P_w^* \tilde{C}^* = \gamma - \frac{\gamma - 1}{1 + g(\lambda_2)/\lambda_2}, \quad g(\lambda) = \sqrt{1 + \frac{4a_\infty \mu_w^* \lambda}{\sigma \varphi^* r_p^{*2}}}, \quad (3)$$

$$\lambda_1 = -\frac{ia_\infty \rho_w^* \omega^*}{\sigma \varphi^*}, \quad \lambda_2 = 4 \operatorname{Pr} \lambda_1, \quad r_p^* = \frac{2b^*}{1 + \pi d^*/(4b^*)}$$

использованы для моделирования покрытия 2 [16, 17] и покрытия 4 [48]. В работах [49, 50] показаны ошибки в формулах, использованных в [16, 17]. Для нахождения параметров, входящих в формулы (3), использовались результаты измерений акустических характеристик покрытия 2 [36]. С исправленными граничными условиями расчеты в рамках линейной теории устойчивости [50] показали, что расчетные и экспериментальные распределения амплитуды второй моды возмущений хорошо согласуются на начальной стадии развития.

В работе [18] представлено другое определение формул, необходимых для постановки граничного условия для покрытия 2:

$$\begin{aligned}
 A &= -\frac{\sigma}{Z_0} \operatorname{th}(\Lambda h), \quad Z_0 = \frac{\sqrt{\tilde{\rho}/\tilde{C}}}{M_e \sqrt{T_w}}, \quad \Lambda = \frac{i\omega M_e}{\sqrt{T_w}} \sqrt{\tilde{\rho}\tilde{C}}, \quad \tilde{\rho}(B_v, \lambda_1) = \frac{a_\infty s(B_v) \rho_w}{1 - g(B_v, \lambda_1)}, \\
 \tilde{C}(B_E, \lambda_2) &= \frac{1}{\gamma p_w} \left(\gamma - \frac{\gamma - 1}{s(B_E)} [1 - g(B_E, \lambda_2)] \right), \\
 g(B, \lambda) &= \frac{Q(\lambda)}{1 - 0,5 B \lambda^2 Q(\lambda)}, \quad Q(\lambda) = \frac{2J_1(\lambda)}{\lambda J_0(\lambda)}, \\
 \lambda_1 &= s(B_v) \sqrt{-8i \frac{a_\infty \rho_w^* \omega^* (1 + c B_v)}{\sigma \varphi^* (1 + 4 B_v)}}, \quad \lambda_2 = s(B_E) \sqrt{-8i \frac{\operatorname{Pr} a_\infty \rho_w^* \omega^* (1 + c B_E)}{\sigma \varphi^* (1 + 4 B_E)}}, \\
 s(B) &= \frac{1 + A_c / [2(1 + c B)^2]}{1 + 1 / [3(1 + 4 B)^2]}, \quad A_c = \frac{4 a_\infty \mu_w^*}{\sigma^* \varphi r_0^2}, \quad B_v = (2\alpha_v^{-1} - 1) \operatorname{Kn}, \quad B_E = \frac{\gamma(2\alpha_E^{-1} - 1)}{(\gamma + 1) \operatorname{Pr}} \operatorname{Kn}.
 \end{aligned} \tag{4}$$

В формулах (4) учитывается разреженность газа при наличии пор малого диаметра и низком статическом давлении. Положение ЛТП, полученное в рамках e^N -метода (см., например, [31]), хорошо согласуется с результатами экспериментов.

В [10, 12, 29, 31] акустическая проницаемость A пористого покрытия 1 определялась численно по формулам [51]

$$\begin{aligned}
 A &= -\frac{\sigma}{Z_0} \operatorname{th}(\Lambda h), \quad Z_0 = \frac{\sqrt{\tilde{\rho}/\tilde{C}}}{M_e \sqrt{T_w}}, \quad \Lambda = \frac{i\omega M_e}{\sqrt{T_w}} \sqrt{\tilde{\rho}\tilde{C}}, \quad \tilde{\rho} = \frac{\rho_w}{1 - g(B_v, \lambda_1)}, \\
 \tilde{C} &= \frac{1}{\gamma p_w} [1 + (\gamma - 1)g(B_E, \lambda_2)], \quad \lambda_1 = \sqrt{-\frac{i\rho_w^* \omega^* r_0^{*2}}{\mu_w^*}}, \quad \lambda_2 = \lambda_1 \sqrt{\operatorname{Pr}}.
 \end{aligned} \tag{5}$$

В отличие от формул (3) в формулах (5) учитывается разреженность газа. Зависимости степени роста [13] и амплитуды второй моды возмущений от продольной координаты конуса [10, 12], полученные с помощью прямого численного моделирования, расчетов в рамках линейной теории устойчивости и экспериментально, хорошо согласуются. Однако авторы отмечают, что корректировка радиуса пор в теоретических исследованиях (на 14 % превышающего экспериментально определенное среднее значение) приводит к лучшему согласованию расчетных и экспериментальных данных.

Формулы для моделирования покрытия, полученные в [51], проверены путем прямого численного моделирования взаимодействия акустических волн с двумерным покрытием, состоящим из канавок [44, 52]. Показано, что теоретическая модель покрытий [51] достаточно точно предсказывает значения коэффициента отражения в широком диапазоне значений акустического числа Рейнольдса, угла наклона акустической волны и параметров пор (отношения ширины к глубине и пористости).

В работе [21] расчеты по линейной теории устойчивости и прямое численное моделирование проведены с использованием формул для определения коэффициента A для квадратных отверстий [51]:

$$\begin{aligned}
 g(B, \lambda) &= \frac{Q(\lambda)}{1 - 0,5 B \lambda^2 Q(\lambda)}, \quad Q(\lambda) = \frac{2J_1(\lambda)}{\lambda J_0(\lambda)}, \quad B_v = (2\alpha_v^{-1} - 1) \operatorname{Kn}, \\
 B_E &= \frac{\gamma(2\alpha_E^{-1} - 1)}{(\gamma + 1) \operatorname{Pr}} \operatorname{Kn}, \quad \lambda_1 = \sqrt{-\frac{i\rho_w^* \omega^* (0,5 w^*)^2}{\mu_w^*}}, \quad \lambda_2 = \lambda_1 \sqrt{\operatorname{Pr}}.
 \end{aligned} \tag{6}$$

Зависимости степени роста возмущений от толщины покрытия, полученные с использованием линейной теории устойчивости и экспериментально, совпадают. Результаты прямого численного моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными при малой глубине пор, но занижают значения степени роста при большой глубине пор.

В работе [31] проведено сравнение положения ЛТП, полученного экспериментально и в рамках e^N -метода с использованием для определения коэффициента A формул (2), (3) и формул

$$A = \frac{\sigma}{Z_0} \operatorname{th}(\Lambda h), \quad \Lambda = \frac{\omega^*}{c^*} \sqrt{s \left(1 - i \frac{\omega_k^*}{\omega^*}\right)}, \quad (7)$$

$$Z_0^* = \rho_w^* c_w^* \sqrt{s \left(1 - i \frac{\omega_k^*}{\omega^*}\right)}, \quad Z_0 = \frac{Z_0^*}{\rho_e^* U_e^*}, \quad \omega_k^* = \frac{\varphi^* \sigma}{\rho_w^* s}.$$

В формулах (7) пористость σ , толщина h , фактор формы s , удельное сопротивление потока на толщину материала φ найдены для покрытия 4 в экспериментальной работе [37]. Показано, что выбранные граничные условия привели к смещению положения перехода на пористом покрытии вниз по потоку относительно сплошной поверхности. Как и в экспериментах, во всех расчетах получено увеличение относительного смещения положения перехода при увеличении единичного числа Рейнольдса. Наиболее хорошо результаты расчетов и экспериментов согласуются при использовании формул (7), при этом относительная задержка перехода меньше, чем в экспериментах, на 15–40 %. При использовании формул (2) и (3) относительная задержка перехода больше, чем в экспериментах, на 240–460 %.

В работах [33, 34] моделировалось покрытие 6 с использованием формул

$$A = \frac{\rho_e^* U_e^*}{Z_n^*}, \quad Z_n = \frac{Z_a}{\sigma} + \frac{Z_{n-1} Z(h_{air}^*)}{Z_{n-1} + Z(h_{air}^*)}, \quad Z(h_{air}^*) = -i \rho_w^* c_w^* \operatorname{ctg} \left(\frac{\omega^* h_{air}^*}{c_w^*} \right),$$

$$Z_a = -i \omega^* \rho_w^* h_p^* \left(1 - \frac{2}{\lambda} \frac{J_1(\lambda)}{J_0(\lambda)} \right)^{-1}, \quad \lambda = r_a^* \sqrt{\frac{i \omega^* \rho_w^*}{\mu_w^*}}, \quad (8)$$

$$h_{air} = s \left(r_a^* - \frac{h_p^*}{2} \right), \quad h_p^* \approx 1,266 r_a^*, \quad s = 1.$$

Соотношения (8) выведены для многослойного покрытия из микроперфорированных пластин, расположенных через равные промежутки. Проведенное сопоставление спектров мощности, полученных в экспериментах, и зависимости величины e^N от частоты возмущений показало, что результаты, полученные на сплошной и пористой поверхностях, хорошо согласуются.

В формулах (2)–(8) σ — пористость; Z_0 — характеристический импеданс; Λ — константа распространения; h^* — глубина пор; α_v , α_E — коэффициенты аккомодации; w^* — размер отверстия плетеной сетки; d^* , b^* — диаметр и длина проволоки металлического фетра; r_p^* — характерный размер пор металлического фетра; r_a^* — характерный радиус сфер металлического порошка; a_∞ — извилистость; ω^* — круговая частота возмущения; T , p , ρ , μ — температура, давление, плотность и вязкость газа на поверхности соответственно; $\varphi^* = \mu_w^*/K^*$; K^* — коэффициент проницаемости в пористых средах; c^* — скорость звука; Kn — число Кнудсена, вычисленное по характерному размеру пор; Re — число Рейнольдса; Pr — число Прандтля; γ — показатель адиабаты; нижние индексы w , e — поверхность и граница ПС; знак “*” соответствует размерным параметрам; переменные без знака “*” нормированы на соответствующие параметры на границе ПС.

В работах [39, 53, 54] при прямом численном моделировании пространственного развития возмущений в ПС плоской пластины при $M_\infty = 6$ пористое покрытие моделируется

с использованием формул (2). Для подстановки граничного условия на поверхности выполнен переход от комплексных величин к действительным:

$$v = p_w \operatorname{Real}(A) - \frac{1}{\omega} \frac{\partial p_w}{\partial t} \operatorname{Imag}(A) \quad (9)$$

($p_w = P_w - P_{w0}$ — пульсационная составляющая давления; P_w — давление на стенке; P_{w0} — давление в невозмущенном потоке). Показано, что пористое покрытие ($\sigma = 20$ %) уменьшает амплитуду второй моды возмущений в два раза при введении возмущения на поверхности пластины с помощью периодического вдува (отсоса). В работе [39] показано, что в зависимости от фазовой скорости c_f внешнего возмущения этапы развития попадающих в ПС внешних возмущений различаются. При падении быстрой акустической волны ($c_f = 1 + 1/M_\infty$) на передней кромке ее фазовая скорость близка к фазовой скорости быстрой моды, поэтому наблюдается кратковременный рост амплитуды акустической волны в ПС. Ниже по потоку условие синхронизма нарушается и возмущение начинает затухать, до тех пор пока его фазовая скорость не приблизится к фазовой скорости медленной моды, что приводит к межмодовому обмену энергией. Одновременное существование двух мод обуславливает биения амплитуды. Далее вследствие экспоненциального роста медленной моды (в соответствии с линейной теорией устойчивости) акустическое возмущение развивается по сценарию медленной моды. В случае падения медленной акустической волны вблизи передней кромки наблюдается алгебраический рост амплитуды возмущения за счет синхронизации возмущения с медленной модой, далее возмущение развивается в соответствии с линейной теорией устойчивости. При этом сначала возмущение соответствует первой моде Мэка, а ниже по потоку — второй. При возбуждении возмущения внешним акустическим полем обнаружено, что на начальном этапе развития оно дестабилизируется на пористом покрытии и стабилизируется на определенном расстоянии от кромки пластины. Это обусловлено тем, что пористое покрытие дестабилизирует первую моду Мэка и стабилизирует вторую. Показано, что краевые эффекты, связанные с границами пористого участка, локализованы на расстоянии от них, равном двум-трем длинам волны возмущения, поэтому их необходимо учитывать. В случае восприимчивости ПС к быстрым акустическим возмущениям амплитуда этих возмущений в ПС на пористом покрытии значительно меньше, чем на сплошной поверхности. При восприимчивости к медленным акустическим возмущениям пористое покрытие приводит к более быстрому по сравнению со сплошной поверхностью росту возмущения в области, где оно соответствует первой моде Мэка, и к более медленному росту в области, где оно соответствует второй моде. В [55] для моделирования покрытия использовалось граничное условие, рассчитанное по формулам (5). Результаты прямого численного моделирования развития возмущения на конусе (таком же, как в [12]) хорошо согласуются с данными экспериментов и расчетов по линейной теории устойчивости.

В [48] при прямом численном моделировании пространственного развития возмущений на пористом покрытии 4 на каждом шаге по времени применяется граничное условие

$$v = (v^- + v^+)/2, \quad (10)$$

где v^- , v^+ — амплитуды падающей и отраженной волн соответственно. Амплитуду отраженной волны можно определить через коэффициент отражения R :

$$R = v^+/v^-. \quad (11)$$

Коэффициент отражения R для покрытия 4 найден в работах [37, 38]. Показано, что на поверхности пористого покрытия с граничным условием (10) амплитуда второй моды значительно меньше, чем на сплошной поверхности.

5. Оптимизация пористого покрытия. В указанных выше работах показано, что пористое покрытие может эффективно подавлять наиболее неустойчивую при числах Маха $M > 5$ вторую моду возмущений и увеличивать протяженность ламинарного участка. Однако наряду со стабилизирующим эффектом обнаружены и исследованы факторы (например, увеличение степени роста первой моды $M_{эка}$), при которых пористое покрытие приводит к дестабилизации ПС и более раннему ЛТП. Эффективность подавления роста второй моды возмущений с помощью пористых покрытий зависит от большого количества параметров. Зависимости эффективности пористого покрытия от его параметров и параметров набегающего потока найдены численно и экспериментально в аэродинамических установках. Для получения максимальной эффективности пористого покрытия в определенной задаче целесообразно использовать наиболее простые и надежные расчетные методы.

В работе [56] проведено параметрическое исследование пористого покрытия с регулярной структурой (покрытие 1) в рамках локально-параллельной линейной теории устойчивости с использованием граничного условия типа (1) и формул (5) для предполагаемых экспериментальных исследований в аэродинамической ударной трубе CUBRC LENS I. В проведенном исследовании при использовании небольших вычислительных ресурсов найдены значения параметров покрытия 1, которые позволяют увеличить протяженность ламинарного участка в два и более раз.

Еще один метод оптимизации предложен в работе [57]. Для параметров некоторых летных экспериментов определен диапазон частот нарастающих возмущений второй моды. Затем с помощью искусственного избирательного добавления пор в процессе изготовления получают необходимые параметры покрытия 4 (пористость, средний размер пор, удельное сопротивление потока по толщине материала). На следующем этапе были измерены коэффициенты отражения акустических волн в необходимом частотном диапазоне. Показано, что для данного диапазона частот коэффициент отражения на 10–30 % меньше, чем у “стандартного” образца покрытия 4, исследованного в [27–31]. В дальнейшем предполагается проведение численных исследований устойчивости ПС с использованием новых параметров покрытия 4 для условий летных экспериментов.

В работе [58] предложено использовать обратный метод создания пористых покрытий, который заключается в определении фазы и амплитуды коэффициента A в формуле (1), необходимых для подавления второй моды и уменьшения влияния на первую моду возмущений. По полученным значениям фазы и амплитуды A определяются необходимые геометрические характеристики пористого покрытия. В рамках линейной теории устойчивости показано, что спроектированное таким образом покрытие практически полностью подавляет рост второй моды в широком диапазоне частот и практически не влияет на рост первой моды.

Существующие в настоящее время технологии позволяют создавать материалы со сложной геометрической структурой, обладающие заданными акустическими свойствами (метаматериалы). Акустические метаматериалы создаются для поглощения волн в определенном диапазоне частот с минимальным (или отсутствующим) воздействием на другие частоты. В работе [59] проведено прямое численное моделирование пространственного развития второй моды возмущений на метаповерхности, которая в данной работе представляет собой набор слотов, расположенных эквидистантно (поперек направления потока). Показано, что для эффективной стабилизации второй моды с определенной частотой необходимо рассчитать околонулевой акустический поверхностный импеданс. С помощью прямого численного моделирования показано, что рассчитанная поверхность практически полностью подавляет возмущения второй моды с определенной частотой.

Заключение. Проведен обзор экспериментальных и численных исследований влияния пористых покрытий на устойчивость и ламинарно-турбулентный переход пограничного слоя при числах Маха $M > 5$. В экспериментальных работах в качестве покрытия для стабилизации пограничного слоя используются перфорированные поверхности, металлический фетр, несколько слоев плетеной сетки, пористый углерод-углеродный композиционный материал, пористая сталь и расположенные вдоль потока микрокаверны. Результаты экспериментальных исследований показали, что эффективность стабилизации пограничного слоя с помощью покрытий зависит от его характеристик: структуры, глубины, пористости, положения на модели. При определенных значениях параметров пористое покрытие стабилизирует вторую моду Мэка, представляющую собой наиболее неустойчивое возмущение в пограничном слое при $M > 5$, и дестабилизирует первую моду. Протяженность ламинарного участка пограничного слоя на пористом покрытии приблизительно в два раза больше, чем на сплошной поверхности.

Для моделирования пористого покрытия в численных исследованиях применяются специальные граничные условия или течение рассчитывается в каждой поре. При моделировании течения в порах за процессом взаимодействия пористого покрытия и возмущений можно наблюдать и таким образом получить подробную физическую картину процесса подавления (усиления) возмущений. Для моделирования пористых покрытий с помощью специальных граничных условий разработаны формулы для расчета акустической проницаемости покрытий различного типа. Результаты численных исследований хорошо согласуются с экспериментальными данными о стабилизации пограничного слоя и задержке ламинарно-турбулентного перехода.

Рассмотренные в данной работе пористые покрытия имеют преимущества и недостатки, поэтому необходима разработка новых высокоэффективных покрытий или оптимизация существующих для задержки ламинарно-турбулентного перехода при числах Маха $M > 5$. Перспективным направлением может стать создание покрытий на основе метаматериалов с использованием предварительно определенных характеристик покрытия (фазы и амплитуды импеданса), необходимых для эффективного (полного) подавления возмущений второй моды Мэка и минимизации дестабилизирующего влияния на первую моду Мэка. Необходимые параметры покрытия можно получить с помощью численных методов расчета устойчивости пограничного слоя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Malmuth N., Fedorov A., Shalaev V., et al. Problems in high speed flow prediction relevant to control. N. Y., 1998. (Paper / AIAA; N 98-2695).
2. 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.
3. Бойко А. В., Кириловский С. В., Маслов А. А., Поплавская Т. В. Инженерное моделирование ламинарно-турбулентного перехода: достижения и проблемы (обзор) // ПМТФ. 2015. Т. 56, № 5. С. 30–49.
4. Гапонов С. А. Влияние сжимаемости газа на устойчивость пограничного слоя над проницаемой поверхностью при дозвуковых скоростях // ПМТФ. 1975. № 1. С. 121–125.
5. Ермолаев Ю. Г., Косинов А. Д., Лысенко В. И. и др. Совместное влияние проницаемости и шероховатости поверхности на устойчивость и переход сверхзвукового пограничного слоя на плоской пластине // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2014. № 5. С. 52–59.
6. Федоров А. В., Юмашев Д. В. Теоретический анализ акустической неустойчивости гиперзвукового ударного слоя на пористой стенке // ПМТФ. 2005. Т. 46, № 1. С. 44–54.

7. **Цырюльников И. С., Маслов А. А., Миронов С. Г. и др.** Об эффективности метода звукопоглощающих покрытий в колебательно-возбужденном гиперзвуковом потоке // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41, № 4. С. 61–67.
8. **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, N 3. P. 481–489.
9. **Шиплюк А. Н., Буров Е. В., Маслов А. А., Фомин В. М.** Влияние пористых покрытий на устойчивость гиперзвуковых пограничных слоев // ПМТФ. 2004. Т. 45, № 2. С. 169–176.
10. **Фомин В. М., Федоров А. В., Козлов В. Ф. и др.** Стабилизация гиперзвукового пограничного слоя поглощающими ультразвуком покрытиями с регулярной микроструктурой // Докл. РАН. 2004. Т. 399, № 5. С. 633–637.
11. **Chokani N., Bountin D. A., Shiplyuk A. N., Maslov A. A.** Nonlinear aspects of hypersonic boundary-layer stability on a porous surface // AIAA J. 2005. V. 43, N 1. P. 149–155.
12. **Fedorov A., Kozlov V., Shiplyuk A., et al.** Stability of hypersonic boundary layer on porous wall with regular microstructure // AIAA J. 2006. V. 44, N 8. P. 1866–1871.
13. **Егоров И. В., Судаков В. Г., Федоров А. В.** Численное моделирование стабилизации гиперзвукового пограничного слоя на остром конусе пористым покрытием // Учен. зап. Центр. аэрогидродинам. ин-та. 2008. Т. 39, № 1/2. С. 3–13.
14. **Бунтин Д. А., Маслов А. А., Чимытов Т. А., Шиплюк А. Н.** Биспектральный анализ нелинейных процессов в гиперзвуковом пограничном слое на пористой поверхности конуса // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2010. № 3. С. 84–90.
15. **Willems S., Gülhan A.** Damping of the second mode instability with regular and random porous surfaces on a slender cone in hypersonic flow // Proc. of the Specialists' meeting on hypersonic laminar-turbulent transition, San Diego (USA), 16–19 Apr. 2012. S. 1., 2012.
16. **Фомин В. М., Федоров А. В., Шиплюк А. Н. и др.** Стабилизация гиперзвукового пограничного слоя покрытиями, поглощающими ультразвук // Докл. АН. 2002. Т. 384, № 2. С. 197–202.
17. **Fedorov A., Shiplyuk 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.
18. **Maslov A., Shiplyuk A., Sidorenko A., et al.** Hypersonic laminar flow control using a porous coating of random microstructure. Reno, 2006. (Paper / AIAA; N 2006-1112).
19. **Бунтин Д. А., Лукашевич С. В., Маслов А. А., Шиплюк А. Н.** Влияние затупления носовой части конуса и ультразвукопоглощающего покрытия на переход в гиперзвуковом пограничном слое // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2010. № 6. С. 74–81.
20. **Maslov A. A., Fedorov A. V., Bountin D. A., et al.** Experimental study of disturbances in transitional and turbulent hypersonic boundary layers // AIAA J. 2008. V. 46, N 7. P. 1880–1883.
21. **Lukashevich S. V., Maslov A. A., Shiplyuk A. N., et al.** Stabilization of high-speed boundary layer using porous coatings of various thicknesses // AIAA J. 2012. V. 50, N 9. P. 1897–1904.
22. **Лукашевич С. В., Морозов С. О., Шиплюк А. Н.** Экспериментальное исследование влияния параметров пассивного пористого покрытия на развитие возмущений в гиперзвуковом пограничном слое // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38, № 23. С. 83–88.
23. **Лукашевич С. В., Морозов С. О., Шиплюк А. Н.** Экспериментальное исследование влияния пассивного пористого покрытия на возмущения в гиперзвуковом пограничном слое. 1. Влияние протяженности пористого покрытия // ПМТФ. 2013. Т. 54, № 4. С. 68–73.
24. **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 // ПМТФ. 2016. Т. 57, № 5. С. 127–133.

25. **Lukashevich S. V., Morozov S. O., Shiblyuk A. N.** Passive porous coating effect on a hypersonic boundary layer on a sharp cone at small angle of attack // *Exp. Fluids*. 2018. V. 59. 130.
26. **Морозов С. О., Лукашевич С. В., Судаков В. Г., Шиплюк А. Н.** Экспериментальное исследование влияния малых углов атаки и затупления носика конуса на стабилизацию гиперзвукового пограничного слоя пассивным пористым покрытием // *Теплофизика и аэромеханика*. 2018. Т. 25, № 6. С. 825–832.
27. **Wagner A., Hannemann K., Wartemann V., Giese T.** Hypersonic boundary-layer stabilization by means of ultrasonically absorptive carbon-carbon material. Pt 1. Experimental results. Grapevine, 2013. (Paper / AIAA; N 2013-270).
28. **Wagner A., Kuhn M., Schramm J. M., Hannemann K.** Experiments on passive hypersonic boundary layer control using ultrasonically absorptive carbon-carbon material with random microstructure // *Exp. Fluids*. 2013. V. 54. 1606.
29. **Wartemann V., Giese T., Eggers T., et al.** Hypersonic boundary-layer stabilization by means of ultrasonically absorptive carbon-carbon material. Pt 2. Computational analysis. Grapevine, 2013. (Paper / AIAA; N 2013-271). DOI: 102514/6.2013-271.
30. **Laurence S. J., Wagner A., Ozawa H., et al.** Visualization of a hypersonic boundary-layer transition on a slender cone. Reston, 2014. (Paper / AIAA; N 2014-3110).
31. **Wartemann V., Wagner A., Eggers T., Hannemann K.** Passive hypersonic boundary layer control by means of ultrasonically absorptive carbon-carbon ceramics: Investigations of different boundary conditions. Glasgow, 2015. (Paper / AIAA; N 2015-3577).
32. **Zhu W., Shi M., Zhu Y., Lee C.** Experimental study of hypersonic boundary layer transition on a permeable wall of a flared cone // *Phys. Fluids*. 2020. V. 32. 011701.
33. **Zhu W., Chen X., Zhu Y., Lee C.** Nonlinear interactions in the hypersonic boundary layer on the permeable wall // *Phys. Fluids*. 2020. V. 32. 104110.
34. **Zhu W., Shi M., Lee C.** Experimental and theoretical study of the hypersonic boundary layer transition on the permeable wall of a flared cone. S. l., 2020. (Paper / AIAA; N 2020-2964).
35. **Lukashevich S. V., Morozov S. O., Shiblyuk A. N.** Experiments on the development of natural disturbances in a hypersonic boundary layer on surfaces with microgrooves // *Exp. Fluids*. 2021. V. 62, N 155. P. 5–14.
36. **Цырюльников И. С., Миронов С. Г.** Определение характеристик поглощения ультразвука тонкими пористыми покрытиями // *Теплофизика и аэромеханика*. 2004. Т. 11, № 4. С. 523–532.
37. **Wagner A., Hannemann K., Kuhn M.** Ultrasonic absorption characteristics of porous carbon-carbon ceramics with random microstructure for passive hypersonic boundary layer transition control // *Exp. Fluids*. 2014. V. 55. 1750.
38. **Wagner A., Schramm J. M., Dittert C., et al.** Experimental and numerical acoustic characterization of ultrasonically absorptive porous materials. S. l., 2018. (Paper / AIAA; N 2018-2948).
39. **Егоров И. В., Судаков В. Г., Федоров А. В.** Численное моделирование стабилизации сверхзвукового пограничного слоя на плоской пластине пористым покрытием // *Изв. РАН. Механика жидкости и газа*. 2006. № 3. С. 39–49.
40. **Лукашевич С. В.** Экспериментальное исследование влияния пористых покрытий и переход гиперзвуковых пограничных слоев: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Новосибирск, 2017.
41. **Brès G. A., Colonius T., Fedorov A. V.** Stability of temporally evolving supersonic boundary layers over micro-cavities for ultrasonic absorptive coatings. Seattle, 2008. (Paper / AIAA; N 2008-4337).

42. **Sandham N. D., Ludeke H.** A numerical study of Mach 6 boundary layer stabilization by means of a porous surface // AIAA J. 2009. V. 47, N 9. P. 2243–2252.
43. **Wartemann V., Ludeke H., Sandham N. D.** Stability analysis of hypersonic boundary layer flow over microporous surfaces. S. l., 2009. (Paper / AIAA; N 2009-7202).
44. **Brès G. A., Inkman M., Colonius T., Fedorov A. V.** Second-mode attenuation and cancellation by porous coatings in a high-speed boundary layer // J. Fluid Mech. 2013. V. 726. P. 312–337.
45. **Hader C., Fasel H. F.** Numerical investigation of porous walls for a Mach 6.0 boundary layer using an immersed boundary method. Grapevine, 2011. (Paper / AIAA; N 2011-3081).
46. **De Tullio N., Sandham N. D.** Direct numerical simulation of breakdown to turbulence in a Mach 6 boundary layer over a porous surface // Phys. Fluids. 2010. V. 22. 094105.
47. **Hader C., Brehm C., Fasel H.** Numerical investigation of transition delay for various controlled breakdown scenarios in a Mach 6 boundary layer using porous walls. Atlanta, 2014. (Paper / AIAA; N 2014-2500).
48. **Sousa V., Patel D., Chapelier J.-B., et al.** Numerical investigation of second-mode attenuation over carbon/carbon porous surfaces // J. Spacecraft Rockets. 2019. V. 56, N 2. P. 1–14.
49. **Fedorov A. V., Shiplyuk A. N., Maslov A. A., et al.** Stabilization of a hypersonic boundary layer using an ultrasonically absorptive coating — CORRIGENDUM // J. Fluid Mech. 2015. V. 769. P. 725–728.
50. **Tritarelli R., Lele S., Fedorov A.** Stabilization of a hypersonic boundary layer using a felt-metal porous coating // J. Fluid Mech. 2015. V. 769. P. 729–739.
51. **Kozlov V. F., Fedorov A. V.** Acoustic properties of rarefied gases inside pores of simple geometries // J. Acoust. Soc. Amer. 2005. V. 117. P. 3402–3412.
52. **Brès G. A., Colonius T., Fedorov A. V.** Acoustic properties of porous coatings for hypersonic boundary-layer control // AIAA J. 2010. V. 48, N 2. P. 267–274.
53. **Егоров И. В., Новиков А. В., Федоров А. В.** Численное моделирование стабилизации пограничного слоя на поверхности с пористым покрытием при сверхзвуковом отрывном течении // ПМТФ. 2007. Т. 48, № 2. С. 39–47.
54. **Egorov I. V., Fedorov A. V., Soudakov V. G.** Receptivity of a hypersonic boundary layer over a flat plate with a porous coating // J. Fluid Mech. 2008. V. 601. P. 165–187.
55. **Egorov I., Fedorov A., Novikov A., Soudakov V.** Direct numerical simulation of supersonic boundary-layer stabilization by porous coatings. Reno, 2007. (Paper / AIAA; N 2007-948).
56. **Fedorov A. V., Malmuth N. D.** Parametric studies of hypersonic laminar flow control using a porous coating of regular microstructure. Reno, 2008. (Paper / AIAA; N 2008-0588).
57. **Wagner A., Wartemann V., Hannemann K., et al.** The potential of ultrasonically absorptive TPS materials for hypersonic vehicles. S. l., 2015. (Paper / AIAA; N 2015-3576).
58. **Tian X., Zhao R., Long T., Wen C. Y.** Reverse design of ultrasonic absorptive coating for the stabilization of Mack modes // AIAA J. 2019. V. 57, N 6. P. 3–6.
59. **Zhao R., Liu T., Wen C., et al.** Impedance-near-zero acoustic metasurface for hypersonic boundary-layer flow stabilization // Phys. Rev. Appl. 2019. V. 11. 044015.

*Поступила в редакцию 15/VII 2022 г.,
после доработки — 24/XI 2022 г.
Принята к публикации 28/XI 2022 г.*