

Научная статья

УДК 532.526.3:539.217.1

DOI 10.25205/2541-9447-2025-20-1-28-36

Влияние угла ориентации каверн периодической структуры на стабилизацию сверхзвукового пограничного слоя на плоской пластине

Владимир Иванович Лысенко¹, Борис Владимирович Смородский²
Александр Дмитриевич Косинов³, Алексей Анатольевич Яцких⁴

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

¹vl@itam.nsc.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0209-6299>

²smorodsk@itam.nsc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6557-8327>

³kosinov@itam.nsc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8626-4669>

⁴yatskikh@itam.nsc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0217-0236>

Аннотация

Представлены результаты исследования устойчивости сверхзвукового пограничного слоя по отношению к естественным возмущениям первой вихревой моды. Поверхность модели плоской пластины была оборудована кавернами (прямоугольными углублениями, пазами) малой глубины ($h = 0,18$ мм, число Рейнольдса $Re_h \approx 1000$) с различными углами их ориентации 0 и 60° . Эксперименты проводились при числе Маха $M = 2$. Обнаружено, что при уменьшении угла ориентации продольных каверн от 60° до 0 максимальные инкременты роста возмущений снижаются и при нулевом угле становятся меньше их значений для гладкой пластины. Полученные результаты показывают, что возмущения первой моды в сверхзвуковом пограничном слое можно стабилизировать продольными кавернами периодической структуры малой глубины, однако наличие каверн той же глубины, но ориентированных под углом 60° , приводит к заметной дестабилизации течения.

Ключевые слова

сжимаемый пограничный слой, гидродинамическая устойчивость, каверны

Финансирование

Исследование выполнено по теме государственного задания. Эксперименты проведены с использованием оборудования ЦКП «Механика» (ИТПМ СО РАН).

Благодарности

Авторы благодарят В. С. Шикалова за помощь в подготовке эксперимента.

Для цитирования

Лысенко В. И., Смородский Б. В., Косинов А. Д., Яцких А. А. Влияние угла ориентации каверн периодической структуры на стабилизацию сверхзвукового пограничного слоя на плоской пластине // Сибирский физический журнал. 2025. Т. 20, № 1. С. 28–36. DOI 10.25205/2541-9447-2025-20-1-28-36

© Лысенко В. И., Смородский Б. В., Косинов А. Д., Яцких А. А., 2025

ISSN 2541-9447

Сибирский физический журнал. 2025. Том 20, № 1

Siberian Journal of Physics, 2025, vol. 20, no. 1

Effect of Periodic-Structure Grooves Orientation Angle on Supersonic Flat-Plate Boundary Layer Stabilization

Vladimir I. Lysenko¹, Boris V. Smorodsky²
Alexander D. Kosinov³, Alexey A. Yatskikh⁴

Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics of SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation

¹vl@itam.nsc.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0209-6299>

²smorodsk@itam.nsc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6557-8327>

³kosinov@itam.nsc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8626-4669>

⁴yatskikh@itam.nsc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0217-0236>

Abstract

The paper presents results of experimental investigation on the stability of the supersonic boundary layer in relation to natural disturbances of the first vorticity mode. The surface of the flat plate model was equipped with grooves (slots, rectangular elongated cavities) of small depth and various angles of their orientation 0 and 60°. Wind tunnel experiments have been performed at Mach number 2. It was found that with decrease of orientation angle from 60° to 0 the maximum spatial amplification rate of disturbances is also decreased. For zero angle this growth rate becomes smaller in comparison with a smooth plate. The obtained results show that the first mode disturbances in supersonic boundary layer can be stabilized by streamwise grooves of a small depth. However, presence of surface grooves of the same depth with orientation angle 60° leads to noticeable flow destabilization.

Keywords

compressible boundary layer, hydrodynamic stability, slots

Funding

The research was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation. The study was conducted at the Equipment Sharing Center “Mechanics” of ITAM SB RAS.

Acknowledgements

Authors express their gratitude to V. S. Shikalov for his assistance in experiment preparation.

For citation

Lysenko V. I., Smorodsky B. V., Kosinov A. D., Yatskikh A. A. Effect of periodic-structure grooves orientation angle on supersonic flat-plate boundary layer stabilization. *Siberian Journal of Physics*, 2025, vol. 20, no. 1, p. 28–36. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2025-20-1-28-36

Введение

Работа направлена на решение одной из фундаментальных проблем механики жидкости и газа, связанной с возникновением турбулентности в сверхзвуковых пограничных слоях – исследование нового (ранее не применявшегося при сверхзвуковых скоростях обтекания) способа стабилизации сверхзвукового пограничного слоя на плоской пластине с помощью продольных каверн периодической структуры.

Еще в 90-е гг. XX в. было опубликовано много работ (например, [1]) по влиянию риблет (рёбер) и каверн на дозвуковой пограничный слой на плоской пластине с целью уменьшения вязкого сопротивления, турбулентного трения, управления продольными структурами, исследования процесса развития уединенного волнового пакета и вихрей в пограничном слое и т. д.

Также активно исследовалось влияние риблет и каверн (в основном, риблет) на развитие в дозвуковом пограничном слое возмущений Толлмина – Шлихтинга и на ламинарно-турбулентный переход. Результаты были противоречивы – были получены как задержка [2], так и ускорение [3] перехода.

В первом-втором десятилетии XXI в. было выполнено много работ (более 50, например, [4–6]) на двумерных телах (пластинах, конусах) по стабилизации второй (акустической) моды пористым покрытием, микрополостями, прямоугольными щелями, волнистой поверхностью, шероховатостью, выступами и т. д. И до 2021 г. превалировала точка зрения о том, что сверхзвуковой пограничный слой стабилизировать с помощью каверн нельзя.

Целью работы [7], вышедшей в 2021 г., было изучение того, применима ли концепция акустического метаматериала для подавления возмущений первой моды в сверхзвуковом пограничном слое. И однозначного ответа на поставленный вопрос в этой работе получено не было. Поэтому нами и было принято решение провести исследования по стабилизации сверхзвукового пограничного слоя с помощью каверн периодической структуры.

Одновременно с нашей подготовкой к проведению таких исследований в 2022 г. была опубликована статья [8] группы из Китая, в которой приведены результаты попытки расчетным путем с помощью каверн (слотов, акустической метаповерхности) стабилизировать первую моду при $M = 4$. И в расчетах по линейной теории устойчивости (ЛТУ, LST), и при прямом численном моделировании (DNS) использовались только двумерные уравнения. Полученные в работе данные оказались противоречивыми. Если с помощью линейной теории устойчивости удалось (правда, крайне незначительно) стабилизировать возмущения первой моды, то при более точных расчетах с помощью уравнений Навье – Стокса (DNS) (когда учитывались рециркуляционные потоки внутри щелей и чередующиеся волны расширения и сжатия, индуцированные на краях щелей, что игнорировалось в расчетах по ЛТУ) добиться стабилизации первой моды не удавалось. Используемая авторами широкополосная акустическая метаповерхность дестабилизировала первую моду по сравнению с гладкой стенкой и привела к большим амплитудам флуктуаций давления на поверхности. Лишь на нагретой стенке и на укороченном участке акустической метаповерхности (несмотря на то, что амплитуды возмущений давления стенки в области метаповерхности были больше, чем соответствующие амплитуды на гладкой стенке) эти амплитуды ниже по потоку от метаповерхности постепенно уменьшались, что показывает возможность стабилизации процесса усиления первой моды с помощью акустической метаповерхности. Правда, в этой работе было существенное ограничение – использовались только поперечные каверны с углом их ориентации по отношению к набегающему потоку $\varphi = 90^\circ$. В настоящей работе рассмотрены каверны с углами ориентации $\varphi = 0$ и 60° , поскольку именно при уменьшении угла от $\varphi = 90^\circ$ до 0 ожидается уменьшение «шероховатости», вызванной рециркуляционными потоками внутри щелей и чередующимися волнами расширения и сжатия, индуцированными на краях щелей. В результате возмущения первой моды, вызванные этой «шероховатостью», должны уменьшаться. Опубликование статьи [8] говорит о том, что тема нашей работы является актуальной.

До 2021 г. существовала точка зрения, что сверхзвуковой пограничный слой, в котором ламинарно-турбулентный переход (ЛТП) определяется первой модой возмущений (волнами Толлмина – Шлихтинга), стабилизировать с помощью продольных каверн периодической структуры нельзя. Однако результаты ряда исследований привели авторов настоящей работы к уверенности в том, что стабилизировать сверхзвуковой пограничный слой с помощью каверн очень малой глубины можно. В статье [9] авторов данной работы по влиянию глубины пор (некоторого аналога каверн) на устойчивость сверхзвукового пограничного слоя было показано, что уменьшение толщины пористого (пористого) покрытия ведет к благоприятному в отношении стабилизации изменению нестационарного течения газа внутри пористого покрытия.

Целью данной работы является выяснение возможности получения стабилизация естественных возмущений сверхзвукового пограничного слоя с помощью каверн периодической структуры и, в частности, выявление влияния угла ориентации каверн на развитие возмущений.

Методика эксперимента

Конкретная задача в планируемых исследованиях была подобрать такие параметры каверн (канавок, бороздок, слотов), при которых сверхзвуковой пограничный слой на плоской пластине можно сделать более устойчивым.

Эксперименты были проведены в аэродинамической трубе Т-325 ИТПМ СО РАН [10] при числе Маха набегающего потока $M_\infty = 2$, температуре торможения потока $T_0 = 290$ К и значении единичного числа Рейнольдса $Re_{1\infty} = 6 \cdot 10^6$ м⁻¹.

В качестве модели была использована теплоизолированная плоская пластина, изготовленная из нержавеющей стали, длиной 440 мм, толщиной 10 мм и шириной 200 мм; с носиком, скошенным под углом 14° , и радиусом притупления передней кромки менее 0,05 мм. На участке $53 \leq x \leq 165$ мм рабочей поверхности на всю ширину пластины в модели был сделан паз глубиной 4,3 мм, куда поочередно вставлялись вставки-пластинки с кавернами периодической структуры. Пластина жестко крепилась к боковым стенкам рабочей части трубы и устанавливалась под нулевым углом атаки.

Авторами настоящей работы ранее было установлено, что использование прямоугольных продольных каверн глубиной $h = 0,18$ мм (число Рейнольдса $Re_h \approx 1000$) приводит к тому, что возмущения пограничного слоя нарастают медленнее, чем на гладкой пластине. Поэтому были изготовлены две пластинки-вставки с прямоугольными кавернами глубиной $h = 0,18$ мм и углами ориентации каверн $\varphi = 0$ и 60° . Ширина каждой каверны по нормали составила 0,6 мм, ширина ребра между кавернами также 0,6 мм. Таким образом, шаг каверн был 1,2 мм.

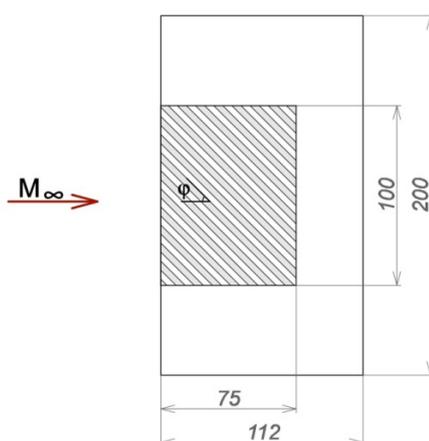


Рис. 1. Пластина-вставка с наклонными к набегающему потоку под углом φ кавернами

Fig. 1. Insert with the slots oblique under the angle φ in relation to the free-flow slots

На рис. 1 приведен упрощенный чертеж пластинки-вставки с наклонными по отношению к набегающему потоку под углом φ кавернами.

Измерения устойчивости пограничного слоя к естественным возмущениям были выполнены с помощью термоанемометра постоянного сопротивления с одноточечным датчиком из вольфрамовой нити диаметром 10 мкм и длиной 1,5 мм.

Исследования возмущений в пограничном слое модели были проведены в слое, близком к слою с максимальными пульсациями, при $E = \text{const}$ (E – среднее напряжение в диагонали моста термоанемометра), что соответствовало линии равного массового расхода.

Средние и пульсационные характеристики потока измерялись с помощью автоматизированной системы сбора данных, которой оборудована аэродинамическая труба Т-325. Пульсационное напряжение с термоанемометра записывалось в персональный компьютер (ПК) с помощью двенадцатиразрядного амплитудно-цифрового преобразователя с частотой отсчетов 750 кГц. Среднее напряжение термоанемометра фиксировалось вольтметром и записывалось в персональный компьютер через последовательный порт. Амплитудно-частотный спектр $A(f, x)$ рассчитывался как результат осреднения спектров мощности.

Результаты и их анализ

На рис. 2 показаны полученные в эксперименте кривые нарастания амплитуд возмущений по продольной координате $A = A(x)$ на частотах $f = 10, 15$ и 20 кГц ($a, б, в$ соответственно) для углов ориентации каверн $\varphi = 0$ и 60° (кривые 1, 2) и гладкой вставки (кривая 0). Видно, что если для $f = 10$ кГц и $\varphi = 0$ имеет место стабилизация возмущений вдоль потока, то при $\varphi = 60^\circ$ имеет место сильная дестабилизация.

Также на рис. 2 видно, что для всех трех $f = 10, 15$ и 20 кГц возмущения при $\varphi = 0$ растут медленнее, чем на гладкой плоской пластине, а при $\varphi = 60^\circ$ – значительно быстрее. При этом нужно подчеркнуть, что в сверхзвуковом пограничном слое при $M = 2$ наиболее быстрорастущими являются трехмерные волновые возмущения с углом ориентации волнового частот вектора $\chi \approx 60^\circ$.

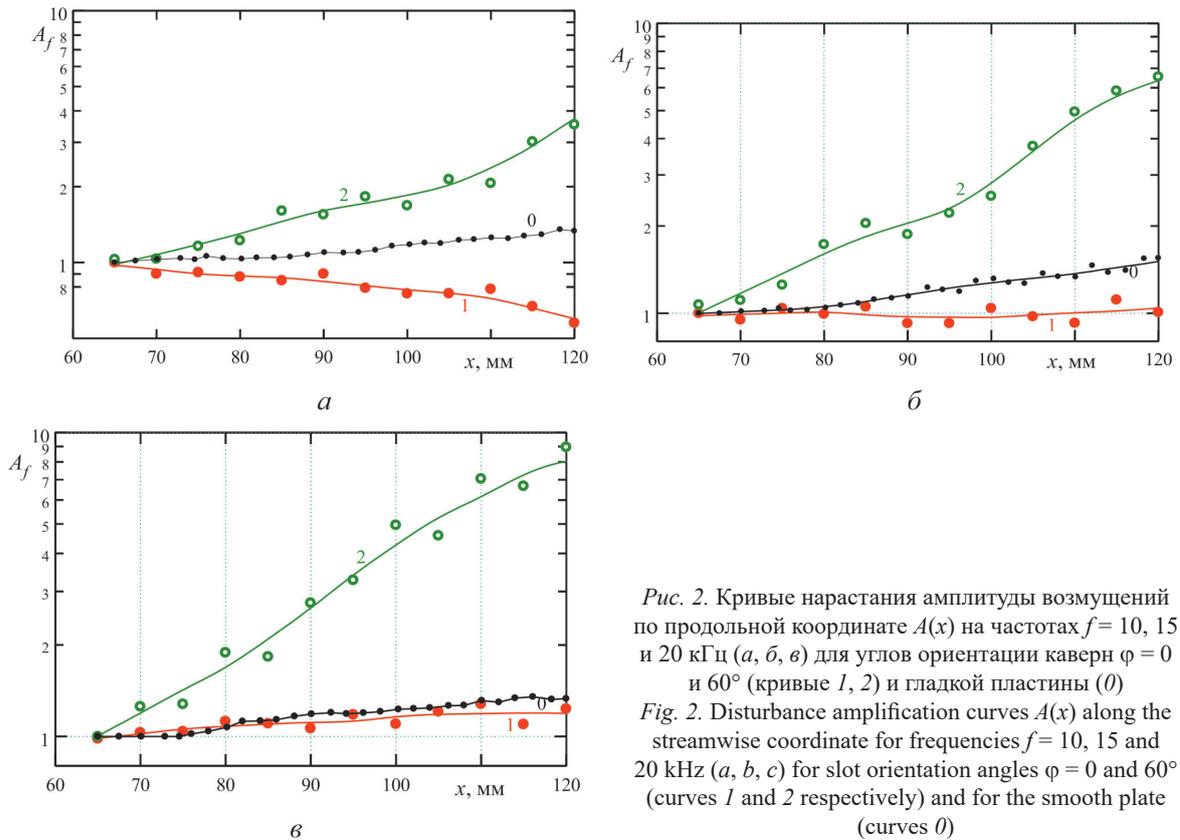


Рис. 2. Кривые нарастания амплитуды возмущений по продольной координате $A(x)$ на частотах $f = 10, 15$ и 20 кГц ($a, б, в$) для углов ориентации каверн $\varphi = 0$ и 60° (кривые 1, 2) и гладкой пластины (0)
 Fig. 2. Disturbance amplification curves $A(x)$ along the streamwise coordinate for frequencies $f = 10, 15$ and 20 kHz ($a, б, в$) for slot orientation angles $\varphi = 0$ and 60° (curves 1 and 2 respectively) and for the smooth plate (curves 0)

На рис. 3 приведены скорости пространственного роста возмущений $-\alpha_i$ в зависимости от частоты f при $x = 95$ мм и углах ориентации каверн $\varphi = 0$ и 60° (кривые 1, 2). Проводится сравнение с экспериментальными данными (кривая 0) для гладкой вставки. Видно, что по мере уменьшения угла ориентации каверн от 60° до 0 максимальные скорости пространственного роста возмущений снижаются. И при $\varphi = 0$ они становятся меньше соответствующего значения для гладкой пластины.

На рис. 4 представлены максимальные скорости пространственного роста возмущений $-\alpha_{i,\max} = \max_f(-\alpha_i)$ в зависимости от углов ориентации каверн ($\varphi = 0$ и 60°) при $x = 95$ мм.

Пунктирной линией показано значение для гладкой вставки. Видно, что по мере уменьшения угла ориентации каверн максимальные скорости пространственного роста возмущений уменьшаются. При этом максимальные инкременты роста возмущений при $\varphi = 0$ меньше, чем на гладкой пластине.

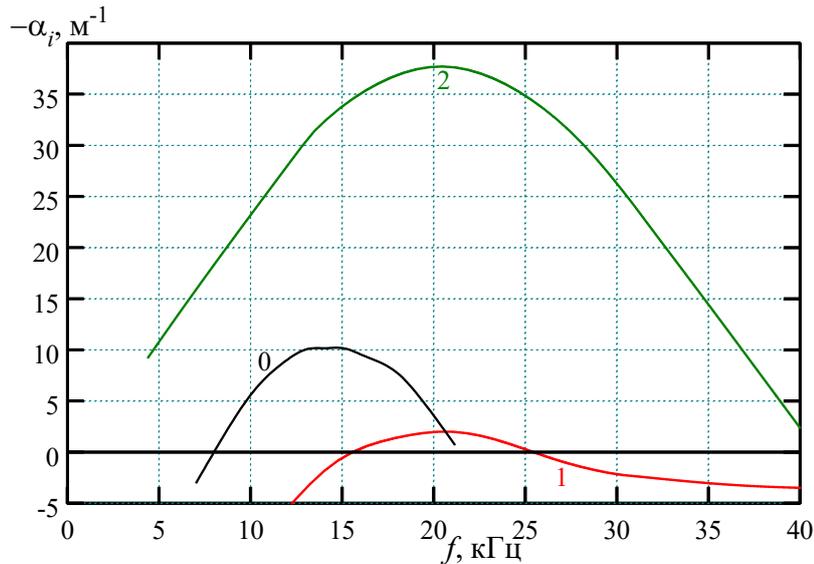


Рис. 3. Скорости пространственного роста возмущений $-\alpha_i$ в зависимости от частоты f для углов ориентации каверн $\varphi = 0$ и 60° (кривые 1, 2), $x = 95$ мм. Сравнение с экспериментальными данными для гладкой пластины (кривая 0)

Fig. 3. Disturbance spatial amplification rates $-\alpha_i$ versus frequency f for slot orientation angles $\varphi = 0$ and 60° (curves 1 and 2 respectively), $x = 95$ mm. Comparison with experimental data for the smooth plate (curve 0)

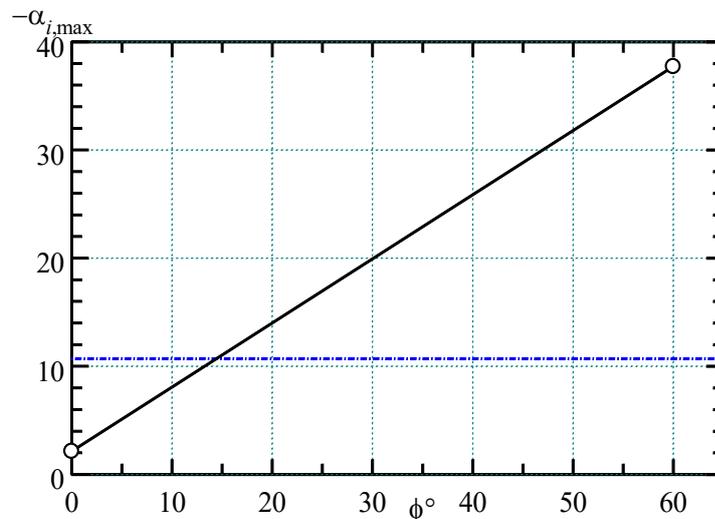


Рис. 4. Максимальные скорости пространственного роста возмущений $-\alpha_{i, \max}$ в зависимости от угла ориентации каверн φ при $x = 95$ мм. Пунктирная линия – значение для гладкой вставки

Fig. 4. Maximal disturbance spatial amplification rates $-\alpha_{i, \max}$ versus slot orientation angle φ at $x = 95$ mm. Dashed line shows the value for the smooth plate

Уменьшение максимальных скоростей пространственного роста возмущений (подавление возмущений) первой моды на вставках с продольными кавернами глубиной 0,18 мм (число Рейнольдса по глубине $Re_h \approx 1000$ объясняется благоприятным (в отношении стабилизации) изменением течения газа в пограничном слое, связанном с расширением течения при его вхождении в каверны.

При этом уменьшение максимальных скоростей пространственного роста возмущений по мере уменьшения угла ориентации каверн (от $\varphi = 60^\circ$ до 0) объясняется уменьшением «шероховатости», вызванной рециркуляционными потоками внутри каверн и чередующимися волнами расширения и сжатия, индуцированными на краях каверн в соответствии с результатами работы [8]. При $\varphi = 0$ такая «шероховатость» минимальна.

Таким образом, полученные результаты наглядно показывают, что возмущения первой моды в сверхзвуковом пограничном слое с числом Маха $M = 2$ можно стабилизировать продольными кавернами малой глубины (конкретно, с числом Рейнольдса по глубине каверн $Re_h \approx 1000$). Однако при этом пограничный слой заметно дестабилизируется кавернами такой же глубины, ориентированными под углом $\varphi = 60^\circ$.

Заключение

Проведено исследование влияния поверхностных каверн глубиной $h = 0,18$ мм (число Рейнольдса $Re_h \approx 1000$) с двумя углами их ориентации $\varphi = 0$ и 60° на устойчивость сверхзвукового пограничного слоя при числе Маха $M = 2$ на плоской пластине к естественным возмущениям первой моды неустойчивости.

Найдено, что при уменьшении угла ориентации каверн от $\varphi = 60^\circ$ до 0 максимальные скорости пространственного роста возмущений уменьшаются и при $\varphi = 0$ они становятся меньше соответствующего значения для гладкой пластины.

Такое уменьшение максимальных скоростей пространственного роста возмущений по мере уменьшения угла ориентации каверн объясняется уменьшением «шероховатости», вызванной рециркуляционными потоками внутри каверн и чередующимися волнами расширения и сжатия, индуцированными на краях каверн. При $\varphi = 0$ такая «шероховатость» минимальна.

Таким образом, полученные результаты наглядно и однозначно демонстрируют, что возмущения первой моды в сверхзвуковом пограничном слое можно стабилизировать продольными кавернами малой глубины (с числом Рейнольдса по глубине каверн $Re_h \approx 1000$) или заметно дестабилизировать кавернами той же глубины, но ориентированных под углом $\varphi = 60^\circ$.

Список литературы

1. **Бойко А. В., Козлов В. В., Сызранцев В. В., Щербаков В. А.** Управление при помощи риблет ламинарно-турбулентным переходом в стационарном вихре на скользящем крыле // ПМТФ. 1996. № 1. С. 82–94.
2. **Schneider M., Dinkelacker A.** Drag reduction by means of surface riblets on an inclined body of revolution // 7th Eur. Drag Reduction Working Meeting, Sept. 24–25, 1992. Berlin, Germany: Submitted Abstrs.
3. **Белов И. А., Енютин Г. В., Литвинов В. М.** Влияние продольного и поперечного оребрения плоской пластины на ламинарно-турбулентный переход // Учен. зап. ЦАГИ. 1990. Т. 21. № 6. С. 107–111.
4. **Sandham N. D., Lüdeke H.** Numerical study of Mach 6 boundary-layer stabilization by means of a porous surface // AIAA J. 2009. V.47(9). P.2243–2252.
5. **Fong K.D., Zhong X.** DNS and PSE study on the stabilization effect of hypersonic boundary layer waves using 2-D surface roughness // AIAA Paper. 2016. No. 2016–3347. 21 p.
6. **Hao J., Wen C. Y.** Stabilization of a Mach 6 boundary layer using a two-dimensional cavity // AIAA Paper. 2019. No. 2019–1131.
7. **De Koning C.** Application of acoustic metamaterials in boundary layer instability control. Master thesis, Delft University of Technology. Delft., 2021. 92 p.
8. **Zhao R., Liu X., Wen C., Wang X.** Broadband design of acoustic metasurfaces for the stabilization of a Mach 4 boundary layer flow // Adv. Aerodyn. 2022. Vol. 4. Art. 15. 18 p.

9. **Lysenko V. I., Gaponov S. A., Smorodsky B. V., Yermolaev Yu. G., Kosinov A. D., Semionov N. V.** Combined influence of coating permeability and roughness on supersonic boundary layer stability and transition // *J. Fluid Mech.* 2016. Vol. 798. P. 751–773.
10. **Багаев Г. И., Лебига В. А., Приданов В. Г., Черных В. В.** Сверхзвуковая аэродинамическая труба Т-325 с пониженной степенью турбулентности // *Аэрофизические исследования*. Новосибирск: ИТПМ СО АН СССР, 1972. С. 11–13.

References

1. **Boiko A. V., Kozlov V. V., Syzrantsev V. V., Shcherbakov V. A.** Riblet control of the laminar-turbulent transition in a stationary vortex on an oblique airfoil. *J. Applied Mechanics and Technical Physics*, 1996, vol. 37, no. 1, pp. 69–79. (in Russ.)
2. **Schneider M., Dinkelacker A.** Drag reduction by means of surface riblets on an inclined body of revolution. In: 7th Eur. Drag Reduction Working Meeting, Sept. 24–25, 1992. Berlin, Germany: Submitted Abstrs.
3. **Belov I. A., Enyutin G. V., Litvinov V. M.** Influence of streamwise and spanwise fins on a flat plate on laminar-turbulent transition. *Uch. Zap. TsAGI*, 1990, vol. 21, no. 6, pp. 107–111.
4. **Sandham N. D., Lüdeke H.** Numerical study of Mach 6 boundary-layer stabilization by means of a porous surface. *AIAA J.*, 2009, vol. 47 (9), pp. 2243–2252. (in Russ.)
5. **Fong K.D., Zhong X.** DNS and PSE study on the stabilization effect of hypersonic boundary layer waves using 2-D surface roughness. *AIAA Paper*, 2016, no. 2016–3347, 21 p.
6. **Hao J., Wen C. Y.** Stabilization of a Mach 6 boundary layer using a two-dimensional cavity. *AIAA Paper*, 2019, no. 2019–1131.
7. **De Koning C.** Application of acoustic metamaterials in boundary layer instability control. Master thesis, Delft University of Technology. Delft., 2021. 92 p.
8. **Zhao R., Liu X., Wen C., Wang X.** Broadband design of acoustic metasurfaces for the stabilization of a Mach 4 boundary layer flow. *Adv. Aerodyn.*, 2022, vol. 4, art. 15, 18 p.
9. **Lysenko V. I., Gaponov S. A., Smorodsky B. V., Yermolaev Yu. G., Kosinov A. D., Semionov N. V.** Combined influence of coating permeability and roughness on supersonic boundary layer stability and transition. *J. Fluid Mech.*, 2016, vol. 798, pp. 751–773.
10. **Bagaev G. I., Lebiga V. A., Pridanov V. G., Turchinov V. G., Chernykh V. V.** Supersonic wind tunnel T-325 with low level of turbulence. In: *Aerophysical Studies*, Novosibirsk, ITAM SB USSR publ., 1972, pp. 11–13.

Сведения об авторах

Лысенко Владимир Иванович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник

Смородский Борис Владимирович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник

Косинов Александр Дмитриевич, доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник

Яцких Алексей Анатольевич, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник

Information about the Authors

Vladimir I. Lysenko, Doctor of Science in Physics and Mathematics

Boris V. Smorodsky, Candidate of Science in Physics and Mathematics

Alexander D. Kosinov, Doctor of Science in Physics and Mathematics, Professor, Head of Laboratory
Alexey A. Yatskih, Candidate of Science in Physics and Mathematics

*Статья поступила в редакцию 09.01.2025;
одобрена после рецензирования 20.01.2025; принята к публикации 27.01.2025*

*The article was submitted 09.01.2025;
approved after reviewing 20.01.2025; accepted for publication 27.01.2025*