

532.526.3:539.217.1

Стабилизация слотами контролируемых возмущений в сверхзвуковом пограничном слое*

В.И. Лысенко, Б.В. Смородский, А.Д. Косинов, А.А. Яцких,
Л.В. Афанасьев

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

E-mail: vl@itam.nsc.ru

Впервые проведено исследование влияния продольных слотов (канавок) с разной глубиной h (соответствующей числам Рейнольдса $Re_h = 900$ и 1300) на устойчивость сверхзвукового (с числом Маха $M = 2$) пограничного слоя на плоской пластине к контролируемым возмущениям первой (вихревой) моды неустойчивости, определяющей ламинарно-турбулентный переход при $M = 2$. Получено, что при числах Рейнольдса $Re_h = 900$ и 1300 скорости пространственного роста возмущений на частоте $f = 14$ кГц меньше соответствующего значения для гладкой пластины. Таким образом, показано, что контролируемые возмущения первой моды можно стабилизировать продольно расположенными слотами с маленькой глубиной ($Re_h < 1500$).

Ключевые слова: сжимаемый пограничный слой, гидродинамическая устойчивость, слоты.

Введение

Работа направлена на решение одной из фундаментальных проблем механики жидкости и газа, связанной с возникновением турбулентности в сверхзвуковых пограничных слоях, и посвящена исследованию нового (ранее не применявшегося при сверхзвуковых скоростях обтекания) способа стабилизации сверхзвукового пограничного слоя на плоской пластине — с помощью слотов (канавок, бороздок, щелей).

Еще в 90-е годы XX века было опубликовано много работ (см. ссылки в [1]), в которых изучалось влияние риблет (ребер) и слотов на дозвуковой пограничный слой на плоской пластине с целью уменьшения вязкого сопротивления и турбулентного трения, управления продольными структурами, исследования процесса развития уединенного волнового пакета и вихрей в пограничном слое и т.д. Также изучалось влияние риблет и слотов (в основном, риблет) на развитие в дозвуковом пограничном слое возмущений Толлмина–Шлихтинга и на ламинарно-турбулентный переход (см., например, [2–9]). Результаты оказались противоречивы — были получены и задержка [2–4],

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 23-79-10167, <https://rscf.ru/project/23-79-10167/>) в ИТПМ СО РАН на оборудовании ЦКП «Механика».

и ускорение [5, 8] перехода. Исследование [6] показало, что риблеты могут как задерживать переход, так и ускорять его — в зависимости от наличия локальных отрывов вблизи точки растекания (в зависимости от распределения давления на передней кромке).

В первом-втором десятилетии XXI века было выполнено много исследований (см. ссылки в работе [1]) по стабилизации второй (акустической) моды пористым покрытием, микрополостями, прямоугольными щелями, волнистой поверхностью, шероховатостью, выступами и т.д. на двумерных телах (пластинах, конусах).

В расчетном методе, предложенном в работе [10], учитывалось использование акустического метаматериала, с помощью которого существенно подавлялась вторая мода (мода Мака) возмущений в пограничном слое. При этом до 2021 г. существовала точка зрения, что сверхзвуковой пограничный слой, в котором ламинарно-турбулентный переход определяется первой модой возмущений (аналогом волн Толлмина – Шлихтинга), стабилизировать с помощью слотов нельзя. Однако работа [11] была посвящена изучению вопроса о возможности применения концепции акустического метаматериала для демпфирования возмущений первой моды в сверхзвуковом пограничном слое. Однозначного ответа на поставленный вопрос получено не было.

При изучении указанной проблемы авторами настоящей работы было принято решение о проведении исследования по стабилизации сверхзвукового пограничного слоя с помощью слотов. Одновременно с подготовкой авторов к проведению таких исследований в апреле 2022 г. в китайском журнале *Advances in Aerodynamics* была опубликована статья [12] группы из Китая, в которой приводились результаты попытки расчетным путем с помощью слотов (слитов, акустической метаповерхности) стабилизировать первую моду при числе Маха $M = 4$. 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, которые игнорировались в расчетах по ЛТУ) добиться стабилизации этой моды не удалось — 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 при 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 возмущений давления ниже по потоку от метаповерхности постепенно уменьшались, что указывало на возможность стабилизации процесса усиления первой моды с помощью акустической метаповерхности. Правда, в этой работе было существенное ограничение — использовались только поперечные слоты (только с углом их ориентации $\varphi = 90^\circ$). А ведь именно при уменьшении угла ориентации слотов от $\varphi = 90^\circ$ до 0 предполагается уменьшение «шероховатости», вызванной рециркуляционными потоками внутри щелей и чередующимися волнами расширения и сжатия, индуцированными на краях щелей, вследствие чего возмущения первой моды, вызванные этой «шероховатостью», начнут уменьшаться.

Хотя до 2021 г. существовала точка зрения, что сверхзвуковой пограничный слой (в котором ламинарно-турбулентный переход определяется первой модой возмущений,

т.е. волнами Толлмина – Шлихтинга), стабилизировать с помощью слотов нельзя, однако на основании ряда исследований у авторов появилась уверенность, что стабилизировать сверхзвуковой пограничный слой с помощью слотов очень маленькой глубины все же возможно. В статьях [13, 14] авторов данной работы по влиянию толщины пор (некоторого аналога слотов) на устойчивость сверхзвукового пограничного слоя было показано, что уменьшение толщины проницаемого (пористого) покрытия ведет к благоприятному (в отношении стабилизации) изменению нестационарного течения газа внутри пористого покрытия, излучающего акустические возмущения.

Первая выполненная авторами работа [1] по влиянию слотов на устойчивость сверхзвукового пограничного слоя к естественным возмущениям первой моды показала, что такие возмущения можно стабилизировать продольно расположенными слотами с маленькой глубиной. Однако этот результат необходимо было подтвердить с помощью контролируемых (искусственно вводимых) возмущений. Поэтому в представленной работе была поставлена цель добиться стабилизации контролируемых возмущений в сверхзвуковом пограничном слое с помощью продольных слотов.

1. Постановка эксперимента

Основная задача в планируемых исследованиях заключалась в подборе таких параметров слотов (канавок, бороздок), при которых будет стабилизироваться сверхзвуковой ($M = 2$) пограничный слой на плоской пластине.

Эксперименты проводились в аэродинамической трубе Т-325 ИТПМ СО РАН [15] при числе Маха набегающего потока $M_\infty = 2$, температуре торможения потока $T_0 \approx 290$ К и значении единичного числа Рейнольдса $Re_{1\infty} = 5 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$.

В качестве модели использовалась теплоизолированная плоская пластина, изготовленная из нержавеющей стали Х18Н9Т, длиной 440 мм, толщиной 10 мм и шириной 200 мм с носиком, скошенным под углом 14° , и радиусом притупления передней кромки около 0,05 мм. На участке $x = 53 - 165$ мм рабочей поверхности (на всю ширину пластины) модели был сделан паз глубиной 4,3 мм, куда поочередно могли вставляться различные вставки-пластинки. Пластина жестко крепилась к боковым стенкам рабочей части трубы и устанавливалась под нулевым углом атаки. Изготовленные для нее две пластинки-вставки имели продольные прямоугольные слоты (с углом ориентации $\varphi = 0$) глубиной $h = 0,18$ и $0,26$ мм. Ширина каждого слота s и ширина ребра между слотами a были равны 0,6 мм (то есть шаг слотов составлял 1,2 мм). Вставки со слотами располагались заподлицо с поверхностью пластины (рис. 1).

Измерения устойчивости пограничного слоя к контролируемым возмущениям выполнялись 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 проводились в слое, близком к слою с максимальными пульсациями, при $E = \text{const}$ (E — среднее напряжение в диагонали моста термоанемометра), что

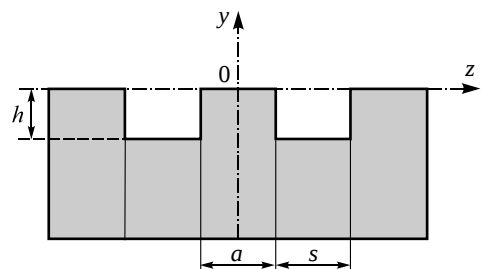


Рис. 1. Схематичное изображение поперечного сечения модели плоской пластины с продольными слотами.

соответствовало линии равного массового расхода. Контролируемые возмущения вводились в пограничный слой модели при помощи локализованного источника на основе тлеющего разряда. Измерения развития поля пульсаций вниз по потоку проводились в окрестности линии ($y = 0, z = 0$), соответствующей продольной оси модели, при $|z| < 15$ мм, т.е. достаточно далеко от боковых стенок рабочей части аэродинамической трубы.

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 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.

В настоящей работе измерения датчиком термоанемометра проводились в трансверсальном (по z) направлении при значениях продольной координаты $x = 65, 80, 95$ и 110 мм в сверхзвуковой части пограничного слоя в слое максимальных пульсаций. В области измерений средний массовый расход составил $\rho U \approx 0,7 \rho U_\infty$, где ρU_∞ — массовый расход в свободном потоке. Измеренные данные использовались затем для определения пульсаций массового расхода, обезразмеренных по соответствующим локальным средним значениям в соответствии с формулой:

$$m'(t) = \frac{(\rho U)'}{(\rho U)_{loc}} \cdot 100 \% = \frac{e'(t)}{EQ} \cdot 100 \%,$$

где $e'(t)$ — нестационарный пульсационный сигнал термоанемометра, E — среднее напряжение моста термоанемометра, $Q = 0,25$ — коэффициент чувствительности датчика к пульсациям массового расхода [16]. После этого проводился анализ частотно-волновой структуры поля контролируемых возмущений, возбуждаемых указанным выше точечным источником. Для этого исследовались амплитудные спектры возмущений, которые были получены с помощью дискретного преобразования Фурье в соответствии с выражением

$$A_{f\beta}(x) = A(f, \beta, x) = \left| \frac{\sqrt{2}}{T\delta_0} \sum_{l,k} m'(z_l, t_k) \exp i(2\pi f t_k - \beta z_l) \Delta t \Delta z \right|,$$

где $T = 1$ мсек — характерное время, $\delta_0 = 1$ мм — характерная толщина пограничного слоя в области измерений.

2. Результаты

На рис. 2 показаны спектры контролируемых возмущений $A_{f\beta}(\beta)$ (амплитуды возмущений в зависимости от трансверсального волнового числа β), нормированные так, чтобы $\max_{\beta} A_{f\beta} \Big|_{x=65} = 1$, для $65 \leq x \leq 110$ мм на частоте генерации $f = 14$ кГц для продольных слотов глубиной $h = 0,18$ мм ($Re_h = 900$) (а) и $h = 0,26$ мм ($Re_h = 1300$) (б). А на рис. 3 приведены скорости пространственного нарастания контролируемых возмущений $-\alpha_i$

Рис. 2. Нормированные спектры контролируемых возмущений $A_{f\beta}(\beta)$ для $65 \leq x \leq 110$ мм на частоте генерации $f = 14$ кГц для продольных слотов глубиной $h = 0,18$ (а) и $0,26$ мм (б), $s = 0,6$, $a = 0,6$, $x = 65$ (1), 80 (2), 95 (3) и 110 (4) мм.

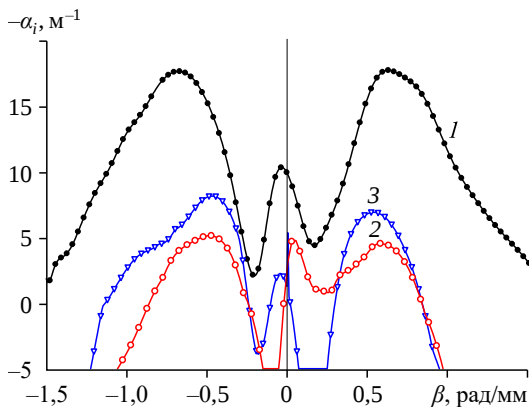
в зависимости от трансверсального волнового числа β при $x = 95$ мм на частоте генерации $f = 14$ кГц для продольных слотов глубиной $h = 0$ (гладкой плоской пластины) (1), $h = 0,18$ мм (2) и $h = 0,26$ мм (3). Видна заметная стабилизация возмущений первой (вихревой) моды в сверхзвуковом пограничном слое (при $M = 2$) на модели с продольными слотами маленькой глубины ($Re_h = 900$ и 1300) по сравнению с данными для гладкой пластины.

Полученные в работе данные соответствуют результатам работы [1] по влиянию слотов на устойчивость сверхзвукового пограничного слоя к естественным возмущениям первой моды, в которой было показано, что такие возмущения можно стабилизировать продольно расположенными слотами с маленькой глубиной, при этом максимальная стабилизация в [1] происходила при $h = 0,18$ мм ($Re_h \approx 1000$).

Полученное в настоящей работе уменьшение максимальных скоростей пространственного роста возмущений (демпфирование возмущений) первой моды на пластине со слотами, скорее всего, вызвано небольшим изменением среднего потока, связанным с расширением течения при попадании в слоты.

Выводы

Впервые проведено исследование влияния продольных (с углом ориентации $\varphi = 0$) слотов (каналов) с разной глубиной h (соответствующей числам Рейнольдса $Re_h = 900$ и 1300) на устойчивость сверхзвукового ($M = 2$) пограничного слоя на плоской пластине



к контролируемым возмущениям первой (вихревой) моды неустойчивости (определяющей ламинарно-турбулентный переход при $M = 2$).

Получено, что при числах Рейнольдса $Re_h = 900$ и 1300 скорости

Рис. 3. Скорости пространственного нарастания контролируемых возмущений $-\alpha_i$ в зависимости от трансверсального волнового числа β при $x = 95$ мм на частоте генерации $f = 14$ кГц для продольных слотов глубиной $h = 0$ (гладкая пластина) (1), $0,18$ (2), $0,26$ (3) мм при $s = 0,6$, $a = 0,6$ мм.

пространственного роста возмущений на частоте $f = 14$ кГц меньше соответствующего значения для гладкой пластины.

Таким образом, показано, что контролируемые возмущения первой моды можно стабилизировать продольно расположенными слотами с маленькой глубиной ($Re_h < 1500$), при этом максимальная стабилизация происходит при $Re_h \sim 1000$.

Авторы благодарят В.С. Шикалова и Н.В. Семенова за помощь в подготовке и проведении экспериментов.

Список литературы

1. Лысенко В.И., Смородский Б.В., Косинов А.Д., Яцких А.А. Влияние глубины слотов на стабилизацию сверхзвукового пограничного слоя // Теплофизика и аэромеханика. 2024. Т. 31, № 1. С. 77–85.
2. Grek G.R., Kozlov V.V., Titarenko S.V., Klingmann B.G.B. The influence of riblets on a boundary layer with embedded streamwise vortices // Phys. Fluids A. 1995. Vol. 7, No. 10. P. 2504–2506.
3. 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 // Прикл. механика и технич. физика. 1996. № 1. С. 82–94.
4. 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.
5. 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.
6. Kozlov V.E., Kuznetsov V.R., Mineev B.I., Secundov A.N. The influence of free stream turbulence and surface ribbing on the characteristics of a transitional boundary layer // Near Wall Turbulence: Zoran Zaric Memorial Conf., Hemisphere Publ. Corp., 1990. P. 172–180.
7. Chu D.C., Karniadakis G.E. Direct numerical simulation of laminar and turbulent flow over riblet-mounted surfaces // J. Fluid Mech. 1993. Vol. 250. P. 1–42.
8. Luchini P. Effects of riblets upon transition // 8th European Drag Reduction Meeting. Book of abstracts. Lausanne, Switzerland: 1993. P. 313–321.
9. Grek G.R., Kozlov V.V., Titarenko S.V. An experimental study on the influence of riblets on transition // J. Fluid Mech. 1996. Vol. 315. P. 31–49.
10. Zhao R., Liu T., Wen C.Y., Zhu J., Cheng L. Impedance-near-zero acoustic metasurface for hypersonic boundary-layer flow stabilization // Physical Review Applied. 2019. Vol. 11, No. 4. P. 5061–5065.
11. De Koning C. Application of acoustic metamaterials in boundary layer instability control // Master Thesis. Delft University of Technology. Delft., 2021. 92 p.
12. 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, No. 15.
13. 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.
14. Лысенко В.И., Гапонов С.А., Смородский Б.В., Ермолаев Ю.Г., Косинов А.Д., Семенов Н.В. О влиянии толщины пористого покрытия на устойчивость сверхзвукового пограничного слоя // Вестн. НГУ. Серия «Физика». 2015. Т. 10, вып. 3. С. 41–47.
15. 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.
16. Афанасьев Л.В., Ермолаев Ю.Г., Косинов А.Д., Кочаргин В.Л., Семенов Н.В., Яцких А.А. Экспериментальное исследование структуры возмущений от двух импульсных источников в сверхзвуковом пограничном слое пластины // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2023. № 4. С. 27–36.

Статья поступила в редакцию 21 августа 2024 г.,
после доработки — 23 сентября 2024 г.,
принята к публикации 8 ноября 2024 г.