Теплофизика и аэромеханика, 2024, том 31, № 5

УДК 532.526

Экспериментальное исследование влияния изменения профиля скорости на устойчивость возмущений в пограничном слое Блазиуса*

И.А. Садовский, М.М. Катасонов, В.В. Козлов

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

E-mail: sadovski.ivan@yandex.ru

Исследование посвящено экспериментальному изучению влияния изменения профиля скорости на устойчивость волн Толлмина – Шлихтинга в пограничном слое Блазиуса. Эксперимент проводился в малотурбулентной аэродинамической трубе Т-324 при скорости набегающего потока U_∞ = 9 м/с. В качестве модели использовалась плоская пластина. Исследования проводились с использованием термоанемометрии. Результаты показали, что распределенное воздействие на пограничный слой Блазиуса через гидродинамически гладкую поверхность приводит к снижению почти на два порядка амплитуды волны Толлмина – Шлихтинга, возбуждающейся естественным образом. В результате распределенного воздействия меняется устойчивость течения. Результаты эксперимента показали, что по сравнению с воздействием на течение через щель распределенное воздействие более эффективно при прочих равных условиях.

Ключевые слова: ламинарно-турбулентный переход, пограничный слой Блазиуса, распределенное воздействие, волна Толлмина – Шлихтинга.

Введение

Понимание механизмов ламинарно-турбулентного (Л-Т) перехода в пограничных слоях (ПС) имеет решающее значение для развития аэродинамики и механики жидкости. Фундаментальная модель ламинарного течения — ПС Блазиуса над плоской пластиной — обеспечивает идеальную основу для изучения явлений, влияющих на Л-Т-переход. Устойчивость течения непосредственным образом влияет на Л-Т-переход, вывод об устойчивости течения на конкретном этапе можно сделать, рассматривая профиль средней скорости [1]. Одним из эффективных методов управления Л-Т-переходом является распределенное воздействие на ПС (отрицательный массоперенос на поверхности). За счет задержки возникновения турбулентности снижается сопротивление трения, что предлагает многообещающий подход к повышению стабильности потока. В работе [2] изучалось влияние воздействия на ПС через узкую поперечную щель на развитие первоначально синусоидальных возмущений в ламинарном пограничном слое. Исследование

* Работа выполнена в рамках программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2024–2026 гг. (номер гос. регистрации 124021400038-1).

© Садовский И.А., Катасонов М.М., Козлов В.В. 2024

показало, что эффективность воздействия в плане подавления возмущений зависит от стадии развития возмущения, на которой производится воздействие, а не от начальной интенсивности возмущения. В работе продемонстрировано сильное влияние на линейной и слабонелинейной стадии развития волн Толлмина – Шлихтинга (Т-Ш). Определенный эффект был достигнут и на нелинейных стадиях развития возмущений: отрицательный массоперенос приводит к полному подавлению субгармоники нарастающих колебаний в ПС плоской пластины [3] и способствует предотвращению развития вторичных возмущений в градиентном течении [4]. Цель экспериментов [5 – 7] заключалась в оптимизации формы участка поверхности, на котором имел место массоперенос. Рассматривались поверхности, оборудованные поперечными щелями и перфорированные отверстиями двух диаметров с постоянной пористостью 1 % и коэффициентом массопереноса c_q = 0,1. Было показано, что стационарные моды возмущения более устойчивы к воздействию, причем щелевое воздействие оказалось эффективнее по сравнению с точечным.

Настоящая работа является развитием работы [2]. Исследуется влияние распределенного воздействия через гидродинамически гладкую поверхность на собственные возмущения ПС плоской пластины — волны Т-Ш, нарастающие вниз по потоку и приводящие к Л-Т-переходу. Исследование носит фундаментальный характер, его основная задача — получить экспериментальные данные по изменению профиля скорости и, соответственно, по его влиянию на устойчивость волны Т-Ш распределенным по достаточно большой поверхности (порядка длины волны возмущения) воздействием. Эта информация будет полезна при теоретическом описании механизмов усиления и затухания возмущений, вызывающих Л-Т-переход в ПС.

Методика эксперимента

Работа выполнялась с использованием оборудования ЦКП «Механика». Эксперимент проводился в малотурбулентной аэродинамической трубе Т-324 Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН. Рабочая часть аэродинамической трубы имеет размеры 1×1×4 м^3. Скорость набегающего потока U_∞ была равна 9 м/с, число Рейнольдса, рассчитанное по толщине вытеснения в начале перфорированной области, составляло Re_{δ^*} = 888.

В качестве модели рассматривалась плоская пластина из оргстекла 1,5×1×0,010 м (рис. 1), которая устанавливалась вертикально в рабочей части аэродинамической трубы.

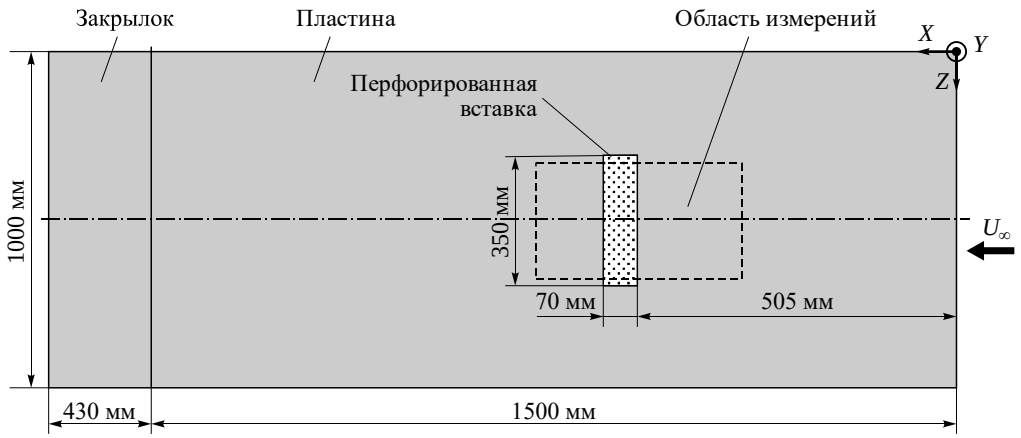

Рис. 1 Схематическое изображение экспериментальной модели.

Координаты отсчитываются от точки, указанной на рис. 1. Для организации на модели пластины течения Блазиуса, максимально приближенного к теоретическому, были предприняты следующие меры: задняя часть пластины была снабжена закрылком, способствующим безотрывному обтеканию в области передней кромки, а сама передняя кромка имела специальный профиль [8].

Распределенное воздействие на ПС осуществлялось через проницаемую поверхность. Передняя и задняя границы этой поверхности располагались на расстояниях 505 и 575 мм от передней кромки пластины соответственно. Проницаемость перфорированного материала составляла примерно 0,27 %. Обтекание проницаемого участка было эквивалентно обтеканию гладкой поверхности.

Скорость газа над поверхностью перфорированной области, развивающаяся в результате отрицательного массопереноса через поверхность (U_s), измерялась в отсутствие основного потока на расстоянии примерно 1 мм от поверхности с помощью термоанемометра и составляла U_s = 0,14 м/с и U_s = 0,24 м/с на разных режимах.

Измерения средней и пульсационной компонент продольной составляющей скорости проводились термоанемометром постоянной температуры с помощью однониточного датчика.

Результаты

Измерение средней скорости вдоль продольной координаты X вне ПС показало, что течение было безградиентным. Этот фактор является одним из необходимых для достижения профиля Блазиуса. В начальных условиях без применения распределенного воздействия ПС на пластине находился в ламинарном состоянии и имел классический характер течения Блазиуса.

Профили пульсаций скорости выявили наличие собственных возмущений ПС в виде волн Т-Ш, которые имели два максимума: один — вблизи стенки, другой — в области внешней границы ПС (см. кривую *1* на рис. 2*b*). Волны Т-Ш возбуждались естественным образом. Из спектрального анализа видно, что основная частота волн составляла f = 100 Гц (см. рис. 3*a*). Исследование показало, что распределенное воздействие существенно влияет на течение. Толщина ПС уменьшается, а уровень пульсаций возмущений снижается. В зоне распределенного воздействия на поток и сразу за ней профили скорости становятся

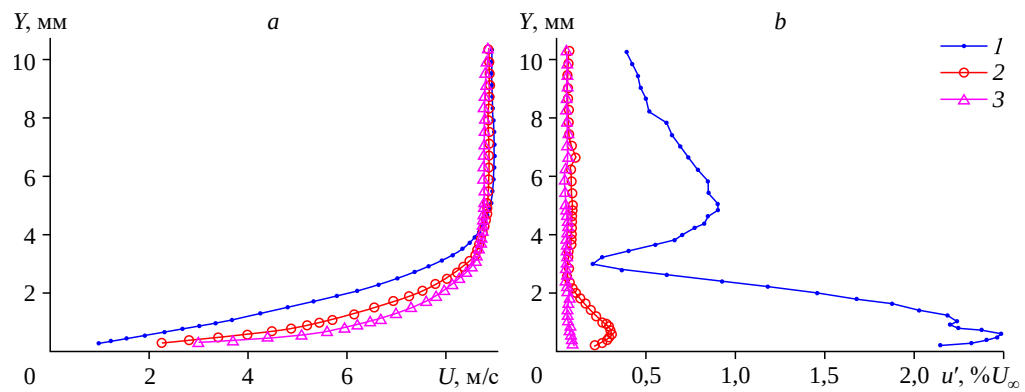

Рис. 2. Профили средней скорости (*a*) и пульсации скорости (*b*) без воздействия (*1*) и под воздействием с интенсивностью U_s = 0,14 (*2*), 0,24 (*3*) м/с при X = 585 мм.

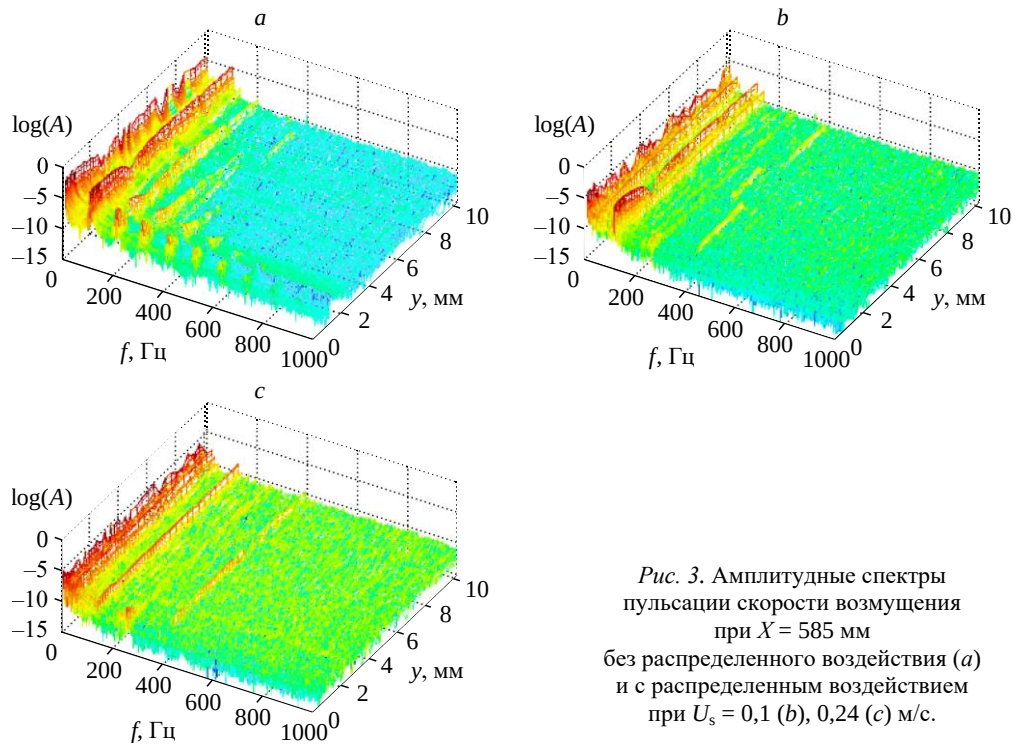

Рис. 3. Амплитудные спектры пульсации скорости возмущения при X = 585 мм без распределенного воздействия (*a*) и с распределенным воздействием при U_s = 0,1 (*b*), 0,24 (*c*) м/с.

более наполненными (см. кривые *2*, *3* на рис. 2*a*). Толщина вытеснения для координаты X = 585 мм при этом уменьшается с δ^* = 1,55 мм (без воздействия) до δ^* = 0,99 и 0,82 мм при U_s = 0,14 и 0,24 м/с соответственно.

Было выявлено, что распределенное воздействие на ПС снижает уровень пульсаций скорости на всех частотах на уровне максимума возмущения по координате Y в районе задней границы перфорированной области в 8 раз для U_s = 0,14 м/с и в 25 — для U_s = 0,24 м/с (см. кривые *2*, *3* на рис. 2*b*). При смещении на 85 мм ниже по потоку от перфорации уровень пульсаций скорости не увеличивается и достигает снижения в 76 раз относительно уровня пульсаций без воздействия (см. рис. 4). Данный результат наблюдался при скоростях U_s = 0,14 м/с и U_s = 0,24 м/с. Следует отметить, что для аналогичного воздействия через поперечную щель скорость U_s через щель в отсутствие основного потока должна составлять около 2 м/с [2]. При анализе результатов на выделенных частотах возмущений было обнаружено, что в случае наличия распределенного воздействия пульсации скорости на основной частоте снижаются в 179 раз. При этом кратных гармоник в спектре не было обнаружено (см. рис. 3*b*, 3*c*).

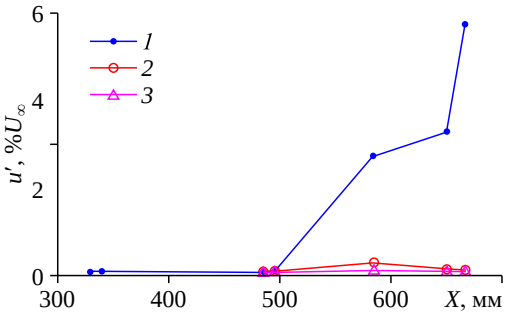

Рис. 4. Распределение интенсивности пульсаций скорости вдоль пластины в пограничном слое на уровне максимума возмущений без распределенного воздействия (*1*) и с распределенным воздействием при U_s = 0,14 (*2*), 0,24 (*3*) м/с.

Заключение

Согласно результатам, полученным в настоящей работе, а также в исследовании [2], распределенное воздействие через перфорированную поверхность требует в 10 раз меньшей вертикальной скорости, чем щелевое воздействие, для достижения аналогичного эффекта. Распределенное воздействие эффективно подавляет рост волны Т-Ш, снижая ее амплитуду в 79 раз и устраняя кратные основной частоте возмущения гармоники.

Список литературы

1. **Бойко А.В., Грек Г.Р., Довгаль А.В., Козлов В.В.** Возникновение турбулентности в пристенных течениях. Новосибирск: Наука, 1999. 328 с.
2. **Козлов В.В., Левченко В.Я., Щербаков В.А.** Развитие возмущений в пограничном слое при щелевом отсасывании // Учен. зап. ЦАГИ. 1978. Т. 9, № 2. С. 99–105.
3. **Forest A.E**. Engineering predictions of transitional boundary-layers // AGARD-CP-224. 1977. P. 22-1–22-19.
4. **Evert F., Ronneberger D., Grosche F.-R.** Application of linear and nonlinear adaptive filters for the compensation of disturbances in the laminar boundary layer // Z. Angew. Math. Mech. 2000. Vol. 80, No. 1. P. 85–88.
5. **Abegg C., Bippes H., Boiko A., Krishnan V., Lerche T., Pothke A., Wu Y., Dallmann U.** Transitional flow physics and flow control for swept wings: Experiments on boundary-layer receptivity, instability excitation and HLF-technology // Proc. CEAS/DragNet European Drag Reduction Conf. Potsdam, 2000. P. 675–680.
6. **Abegg C., Bippes H., Janke E.** Stabilization of boundary-layer flows subject to crossflow instability with the aid of suction / Eds. H.F. Fasel, W.S. Saric // Laminar-Turbulent Transition. IUTAM Symp. Berlin, Springer-Verlag, 2000. P. 607–612.
7. **Abu-Ghanamm B.J., Shaw R.** Natural transition of boundary layers — the effects of turbulence, pressure gradient, and flow history // J. Mech. Eng. Sci. 1980. Vol. 22. P. 213–228.
8. **Klingman B.G.B., Boiko A.V., Westin K.J.A., Kozlov V.V., Alfredson P.H.** Experiments on the stability of Tollmien–Schlichting waves // Europ. J. Mech. B / Fluids. 1993. Vol. 12, Iss. 4. P. 493–514.

Статья поступила в редакцию 6 сентября 2024 г.,
после доработки — 1 ноября 2024 г.,
принята к публикации 8 ноября 2024 г.