

УДК 532.526.3

УПРАВЛЕНИЕ ЛАМИНАРНО-ТУРБУЛЕНТНЫМ ПЕРЕХОДОМ В ТРЁХМЕРНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ ПРИ ПОВЫШЕННОЙ ВНЕШНЕЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ С ПОМОЩЬЮ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА

С. А. Баранов¹, А. Ф. Киселёв¹, И. А. Моралев^{1,2}, Д. С. Сбоев^{1,*}, С. Н. Толкачёв¹,
академик РАН С. Л. Чернышев¹

Поступило 01.03.2019 г.

Приводятся результаты экспериментального исследования воздействия актуатора с диэлектрическим барьерным разрядом (ДБР) на ламинарно-турбулентный переход в трёхмерном пограничном слое при повышенной внешней турбулентности. В базовом пограничном слое при переходе к турбулентности преобладали неустойчивые бегущие возмущения поперечного течения, чьи характеристики слабо зависели от положения по размаху модели. ДБР-актуатор, создававший стационарные продольные вихри с заданной длиной волны в трансверсальном направлении, позволил снизить темп порождения турбулентных пятен по сравнению с базовым режимом.

Ключевые слова: трёхмерный пограничный слой, неустойчивость поперечного течения, стационарные вихри поперечного течения, диэлектрический барьерный разряд, внешняя турбулентность, перемежаемость.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524866668-672>

ВВЕДЕНИЕ

Снижение сопротивления трения посредством ламинаризации обтекания остаётся актуальной проблемой аэродинамики летательных аппаратов. В последние годы в качестве метода решения этой задачи рассматривается воздействие на пограничный слой объёмной силы, генерируемой при помощи расположенного на обтекаемой поверхности диэлектрического барьерного разряда (ДБР) [1]. Имеются две стратегии применения ДБР-актуаторов в пограничном слое. В соответствии с первой [2] происходит модификация среднего течения с целью изменения характеристик его гидродинамической устойчивости в целом. Вторая стратегия состоит в создании в пограничном слое таких контролируемых и в общем случае локализованных в пространстве и времени воздействий, которые препятствуют развитию наиболее опасных, приводящих к ламинарно-турбулентному переходу, возмущений. В предшествовавших данной работе экспериментах при низком уровне фоновой турбулентности реализован второй случай. В неустойчивом трёхмерном пограничном слое, соответствующем типичному течению на стреловидном крыле, при помощи ДБР-актуатора создавались стационарные субкритические по длине

волны вихри неустойчивости поперечного течения, препятствующие развитию наиболее неустойчивых стационарных же возмущений. Ранее эта концепция была реализована в лётном эксперименте [3] с помощью дискретных элементов шероховатости.

Проведённые в аэродинамической трубе (АДТ) Т-124 ЦАГИ при естественном фоне её турбулентности эксперименты показали, что ДБР-актуаторы генерируют не только расчётные стационарные возмущения, но и неконтролируемые нестационарные в низкочастотном с точки зрения физики разряда диапазоне 0–5 кГц. Генерация этих возмущений полностью нивелирует возможный положительный эффект ДБР-актуатора, приводя к более раннему переходу к турбулентности по сравнению с отсутствием воздействия ДБР. На рис. 1 показаны типичные распределения спектральной плотности E возмущений в неустойчивом трёхмерном пограничном слое. Хорошо видно возрастание на порядок колебаний во всей полосе частот, особенно для пакета нестационарных мод неустойчивости трёхмерного пограничного слоя с центральной частотой около 350 Гц. Следует особо подчеркнуть, что из исследованных к настоящему моменту в АДТ Т-124 такими свойствами обладали ДБР-актуаторы всех конструкций в любой из упомянутых стратегий их применения. Подобное неблагоприятное поведение ДБР-актуатора также наблюдалось в экспериментах [4].

С другой стороны, в экспериментах при низкой степени турбулентности было обнаружено, что ДБР-

¹ Центральный аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского, Жуковский Московской обл.

² Объединённый институт высоких температур Российской Академии наук, Москва.

* E-mail: t124@inbox.ru

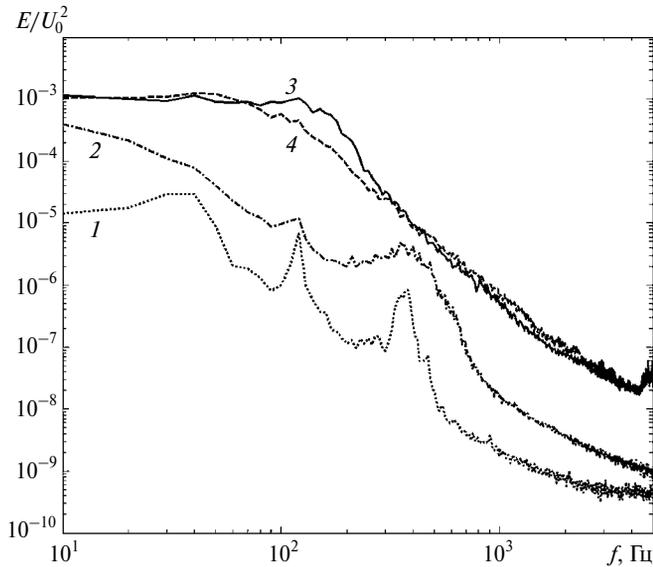


Рис. 1. Типичные спектры возмущений в пограничном слое перед началом генерации турбулентных пятен:
 1 — низкая степень турбулентности, без разряда;
 2 — низкая степень турбулентности, с разрядом;
 3 — повышенная степень турбулентности, без разряда;
 4 — повышенная степень турбулентности, с разрядом.

актуаторы успешно создают расчётные искажения полей средней скорости. Этот факт привёл к необходимости исследовать воздействие актуатора на переход при высокой степени внешней турбулентности. Подобная постановка может быть актуальна для течений, рассматриваемых в задачах внутренней аэродинамики и характеризующихся высоким уровнем внешней турбулентности. В этом случае можно ожидать, что неконтролируемые нестационарные воздействия будут маскироваться интенсивным фоном естественно развивающихся в пограничном слое возмущений. Как показали эксперименты, именно такая ситуация имела место в данной работе, высокочастотные компоненты спектров пульсаций оставались практически неизменными при включении разряда (рис. 1).

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Эксперименты проведены в малотурбулентной АДТ Т-124 ЦАГИ на модели плоской пластины стреловидностью 35° с наведённым градиентом давления и снабжённой фальшстенками для моделирования течения в пограничном слое стреловидного крыла. Исследованный трёхмерный пограничный слой в области отрицательного градиента давления характеризовался ярко выраженной неустойчивостью поперечного течения. В работе использована система координат с продольной осью X , направленной перпендикулярно передней кромке пластины, осью трансверсальных

координат Z , направленной вдоль передней кромки, ось Y нормальна к стенке. В качестве характерной скорости U_0 используется скорость в контрольном сечении рабочей части АДТ, расположенном за срезом сопла. Основные результаты были получены при $U_0 = 18,4$ м/с. Скорость на внешней границе пограничного слоя обозначена U_e . При проведении экспериментов выполнялись пневмометрические и термоанемометрические измерения. Для генерации повышенного уровня турбулентности в рабочей части АДТ применялась установленная на срезе сопла сетка, обеспечивающая уровень пульсаций 0,93%.

Положение ламинарно-турбулентного перехода характеризовалось при помощи распределений перемежаемости в сигнале термоанемометра γ вблизи стенки. Детектор перемежаемости описан в [5]. Зависимость γ от продольной координаты можно представить как

$$\gamma = 1 - \exp\left[-\frac{n\sigma}{U_0}(X - X_t)^2\right],$$

где X_t — координата начала области перехода, n — темп порождения турбулентных пятен в области их возникновения, σ — параметр, зависящий от скорости и угла распространения турбулентных пятен. Данная зависимость была предложена для двумерных течений, её применение в трёхмерных потоках обосновано данными [6]. Функция перемежаемости $F = \sqrt{-\ln(1 - \gamma)}$ в зоне разрушения ламинарного режима может быть аппроксимирована прямой линией. За точку начала зоны разрушения ламинарного режима X_t в работе принята точка пересечения прямой $F(X)$ с осью X , за точку окончания перехода X_T — точка, соответствующая $F = 2,14$ ($\gamma = 0,99$).

Применявшийся в экспериментах ДБР-актуатор разработан в ОИВТ РАН. Он состоял из внешнего коронирующего электрода (алюминиевая фольга шириной 23,5 мм, длиной 380 мм и толщиной вместе с клеящим слоем 15 мкм), наклеенного на керамическую (оксид алюминия) пластину толщиной 1 мм, под которой размещался секционированный ответный электрод. Конструкция актуатора подробнее описана в [7]. В большинстве измерений ДБР-актуатор питался синусоидальным напряжением амплитудой 2,5 кВ и частотой 65 кГц. Внешний электрод размещался на модели параллельно её передней кромке. Группы микрозарядов, локализованные над секциями управляющего электрода, зажигались в положении $X = 125$ мм с шагом по трансверсальной координате 5 мм. Конструкция актуатора позволила провести большой цикл измерений длительностью несколько месяцев без изменения рабочих характе-

ристик системы. При низкой степени турбулентности в АДТ было установлено, что актуатор генерирует в пограничном слое стационарную моду неустойчивости поперечного течения также с длиной волны около 5 мм, субкритическую по отношению к наиболее неустойчивым для данного пограничного слоя вихрям с длиной волны 7–10 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Перед началом экспериментов по управлению переходом были проведены тщательные исследования механизма перехода в трёхмерном пограничном слое на модели при повышенной степени внешней турбулентности. Они показали, что механизм перехода существенно отличается от случая малотурбулентного внешнего потока и определяется развитием бегущих мод неустойчивости поперечного течения. Начальные стадии развития возмущений хорошо описываются линейной теорией гидродинамической устойчивости. Роль стационарных возмущений оказалась невелика, их амплитуда при начале нелинейных процессов в пограничном слое не превышала $0,01 U_0$, в отличие от типичной амплитуды около 10% для низкого уровня внешней турбулентности. Измеренные при различных X поля скорости в плоскостях (Y, Z) и распределения по Z (рис. 2) не выявили заметных отклонений средней скорости от её осреднённого по размаху значения $\langle U \rangle$. Такая же картина наблюдается и для среднеквадратичных пульсаций, амплитуда которых слабо зависит от размаха. Начало нелинейных взаимодействий отме-

чалось при X около 400 мм. Разрушение ламинарного режима происходило через образование турбулентных пятен, начиная с $X_t = 453$ мм.

Включение разряда приводило к существенной перестройке полей как средней скорости, так и её пульсационной компоненты, которые оказывались модулированными по трансверсальной координате (рис. 2). Профили отклонений средней скорости от $\langle U \rangle$ и профили пульсаций по Y имели характерную для возмущений поперечного течения колоколообразную форму с одним максимумом. Таким образом, ДБР-актуатор создавал в пограничном слое систему стационарных продольных вихрей. Модуляция этими вихрями среднего течения вызывала соответствующую модуляцию поля пульсаций скорости. Максимумы пульсаций расположены приблизительно в местах наибольшего градиента по Z средней скорости течения.

Нарастание индуцируемых разрядом стационарных вихрей продолжалось примерно до $X = 340$ мм, после чего они выходили на стадию насыщения с амплитудой около 4%. В области разрушения ламинарного режима течения при $X > 517$ мм амплитуда вихрей быстро падала. Амплитуда среднеквадратичных пульсаций скорости в начале области измерений ($X = 220$ мм) при включённом разряде мало отличалась от базового случая, составляла около 2% и слабо зависела от положения по размаху. Ниже по потоку нарастание в областях максимумов и минимумов пульсаций несколько различалось. В области минимума пульсации нарастали медленнее по сравнению с базовым пограничным слоем без разряда, а в области максимума практически с тем же темпом, что и в базовом случае. При этом амплитуда в области максимумов была несколько выше, чем в базовом режиме. Это возрастание амплитуды связано с некоторым увеличением энергии колебаний в спектрах в полосе до 100 Гц. В зоне разрушения ламинарного течения ($X > 577$ мм) амплитуда пульсаций выходила на насыщение около 12%, её зависимость от размаха существенно ослабевала, а в профилях пульсаций появлялся пристенный максимум, характерный для режима генерации турбулентных пятен. При включённом актуаторе такой максимум возникал позже, чем в базовом режиме.

Распределения пристенной перемежаемости показаны на рис. 3. Измерения проводились как в фиксированной точке пограничного слоя при изменении скорости набегающего потока, так и по пространству вдоль различных характерных линий, соответствующих минимумам и максимумам в распределениях U и u'_{rms} , подобных показанным на рис. 2. При вклю-

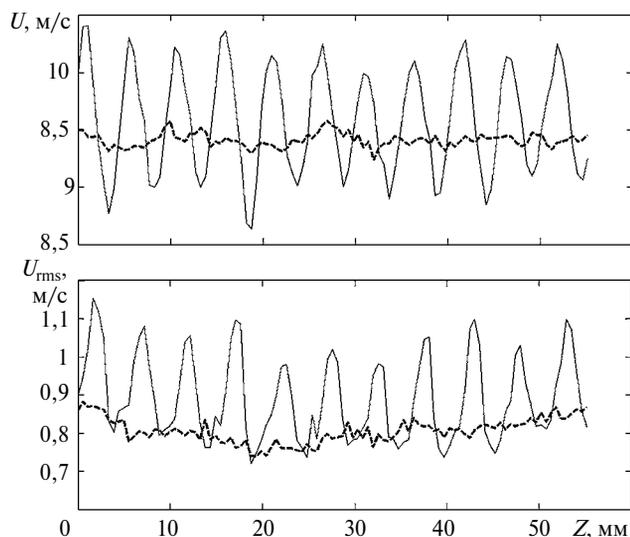


Рис. 2. Распределения по трансверсальной координате средней скорости (вверху) и среднеквадратичных пульсаций скорости (внизу), $X = 336$ мм, $\langle U \rangle / U_e = 0,55$. Штриховые линии — без разряда, сплошные — с разрядом.

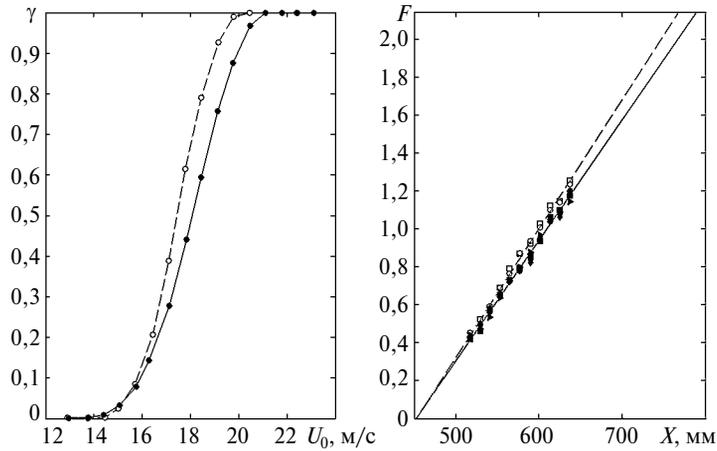


Рис. 3. Зависимости перемежаемости от скорости в контрольном сечении АДТ при $X = 585$ мм (слева) и от продольной координаты при $U_0 = 18,4$ м/с (справа). Светлые символы, штриховые линии — без разряда, тёмные символы, сплошные линии — с разрядом.

чении разряда турбулентное состояние течения в фиксированной точке достигалось при значениях U_0 , превышающих соответствующую величину для базового случая примерно на 1 м/с. Распределения перемежаемости по пространству продемонстрировали хорошую повторяемость для различных значений Z . Функция перемежаемости хорошо аппроксимируется прямой. При включении разряда координата X_t практически не изменилась и составила 452 мм, однако положение конца перехода сместилось вниз по потоку по сравнению с базовым режимом, $X_T = 767$ и 789 мм соответственно. В исследованном трёхмерном пограничном слое с отрицательным градиентом давления, как и в [6], где при повышенной внешней турбулентности изучался пограничный слой на стреловидном крыле с полочным распределением давления, длина

зоны разрушения ламинарного режима составляла весьма значительную величину — около 40% расстояния от передней кромки до положения турбулентного состояния течения. Поэтому уменьшение темпа порождения турбулентных пятен при работе ДБР-актуатора может свидетельствовать о достаточно высоком потенциале исследованного метода для снижения трения.

Механизм воздействия разряда на переход связан с изменением характеристик устойчивости пограничного слоя. Анализ распределений спектральной плотности энергии бегущих возмущений (рис. 1 и 4) показывает, что введение в пограничный слой стационарных вихрей приводит к снижению энергии колебаний в полосе 100–300 Гц. Однако в диапазоне до 100 Гц в зонах максимумов $U(Z)$ энергия пульсаций

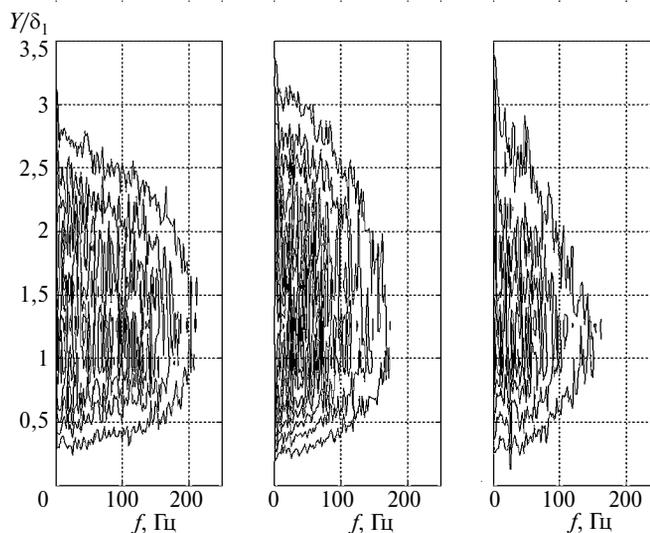


Рис. 4. Изолинии распределений спектральной плотности пульсаций скорости по толщине пограничного слоя, $X = 462$ мм. Слева направо: без разряда, с разрядом в максимуме $U(Z)$, с разрядом в минимуме $U(Z)$. Шаг изолиний 0,1 от максимального значения для распределения в максимуме с разрядом.

несколько возрастает. Кроме того, при работе актуатора эти низкочастотные возмущения независимо от положения по размаху медленнее затухают вне пограничного слоя. По всей видимости, в описанных экспериментах возмущения с частотами 100–300 Гц играли более важную роль в процессах генерации турбулентных пятен, чем колебания в иных диапазонах. В некоторых из исследованных в [6] режимах перехода также наблюдалось снижение темпа порождения турбулентных пятен. Предположительно, это происходило вследствие взаимодействия генерируемых внешней турбулентностью квазистационарных полосчатых структур и бегущих возмущений поперечного течения. Полученные в данной работе результаты свидетельствуют в пользу такого предположения. Хотя при исследовании базового пограничного слоя не было обнаружено возмущений с особенностями, характерными для алгебраической неустойчивости и немодального роста, квазистационарные полосчатые структуры и возбуждаемые разрядом стационарные вихри могут играть сходные роли.

Таким образом, в результате проведённых экспериментов было показано, что возбуждающий стационарные вихри неустойчивости поперечного течения ДБР-актуатор может быть использован для затягивания ламинарно-турбулентного перехода в трёхмерном пограничном слое при повышенной степени внешней турбулентности. Также следует подчеркнуть, что исследованный актуатор был разработан для управления течением в условиях низкого уровня внешних возмущений и поэтому мог быть далёк от оптимального для данных экспериментов. Этот вопрос нуждается в дальнейшем изучении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kriegseis J., Simon B., Grundmann S.* Towards In-Flight Applications? A Review on Dielectric Barrier Discharge-Based Boundary-Layer Control // *Appl. Mech. Rev.* 2016. V. 68. № 2. 020802.
2. *Алешин Б.С., Курячий А.П., Ребров И.Е., Хомич В.Ю., Чернышев С.Л., Ямщиков В.А.* Многозарядная актуаторная система для силового электрогидродинамического воздействия на пограничный слой аэродинамических поверхностей // *Письма в ЖТФ.* 2017. Т. 43. В. 1. С. 45–52.
3. *Saric W.S., Carpenter A.L., Reed H.L.* Passive Control of Transition in Three-Dimensional Boundary Layers, with Emphasis on Discrete Roughness Elements // *Phil. Trans. Roy Soc. A.* 2011. V. 369. № 1940. P. 1352–1364.
4. *Serpieri J., Venkata S.Y., Kotsonis M.* Conditioning of Cross-Flow Instability Modes Using Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators // *J. Fluid Mech.* 2017. V. 833. P. 164–205.
5. *Власов В.А., Жигулев С.В., Иванов А.И., Киселев А.Ф., Кузьминский В.А., Сбоев Д.С., Чернышев С.Л.* Ламинарно-турбулентный переход на крыльях с ламинаризованным профилем LV6. I. Переход в естественных условиях // *Уч. зап. ЦАГИ.* 2011. Т. 42. № 5. С. 10–27.
6. *Киселев А.Ф., Сбоев Д.С., Чернышев С.Л.* Особенности ламинарно-турбулентного перехода в трехмерном пограничном слое при повышенной внешней турбулентности // *ДАН.* 2014. Т. 454. № 6. С. 665–668.
7. *Moralev I., Bityurin V., Firsov A., Sherbakova V., Selivonin I., Ustinov M.* Localized Micro-Discharges Group Dielectric Barrier Discharge Vortex Generators: Disturbances Source for Active Transition Control. *Proc. I. Mech Eng. P. G: J. Aerospace Eng.* 2018.

TRANSITION CONTROL IN A THREE-DIMENSIONAL BOUNDARY LAYER AT ELEVATED FREE STREAM TURBULENCE USING DIELECTRIC BARRIER DISCHARGE

S. A. Baranov¹, A. Ph. Kiselev¹, I. A. Moralev^{1,2}, D. S. Sboev¹,
S. N. Tolkachev¹, Academician of the RAS S. L. Chernyshev¹

¹ *Central Aerohydrodynamic Institute Named after N.E. Zhukovsky, Zhukovsky, Moscow Region, Russian Federation*

² *Joint Institute of High Temperature of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

Received March 1, 2019

The results of an experimental study of the effect of dielectric barrier discharge (DBR) actuator on laminar-turbulent transition in a three-dimensional boundary layer under influence of elevated free-stream turbulence are presented. The travelling cross-flow instability modes are dominated in transition in a base configuration. Their characteristics do not depend on a spanwise position. The DBD-actuator that generated stationary cross-flow vortices with the predefined spanwise wavelength when turned on was capable to reduce a turbulent spots production rate in comparison to the base regime.

Keywords: three-dimensional boundary layer, cross-flow instability, stationary cross-flow vortices, dielectric barrier discharge, free-stream turbulence, intermittency.