A. Ya. Kotvitskii, I. A. Moralev, M. V. Ustinov, A. A. Abdullaev, Excitation of stationary cross-flow instability modes using a plasma actuator based on dielectric barrier discharge,
TVT, 2023, Volume 61, Issue 6, 830–835

ТЕПЛОФИЗИКА ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР, 2023, том 61, № 6, с. 830–835

УДК 533.69.01

ВОЗБУЖДЕНИЕ СТАЦИОНАРНЫХ МОД НЕУСТОЙЧИВОСТИ ПОПЕРЕЧНОГО ТЕЧЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ПЛАЗМЕННОГО АКТУАТОРА НА ОСНОВЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА

© 2023 г. А. Я. Котвицкий[1], *, И. А. Моралёв[1], М. В. Устинов[2], А. А. Абдуллаев[3]

[1]*Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия*

[2]*Центральный аэрогидродинамический институт, Жуковский, Россия*

[3]*Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия*

**E-mail: alex.kotvitsky00@gmail.com*

Поступила в редакцию 02.12.2022 г.
После доработки 03.03.2023 г.
Принята к публикации 11.05.2023 г.

Представлены результаты исследования стационарной моды неустойчивости поперечного течения, возбуждаемой с помощью плазменного актуатора на основе диэлектрического барьерного разряда в трехмерном пограничном слое на стреловидной пластине с наведенным градиентом давления. Показано, что актуатор генерирует моду неустойчивости заданной длины волны с начальной амплитудой до 2% от скорости набегающего потока, при этом соотношение сигнал/шум составляет не более 15%. В результате параметрического исследования получено семейство кривых нарастания возбуждаемой моды неустойчивости как функции параметров напряжения, питающего разряд. Показано, что начальная амплитуда стационарных возмущений, порождаемых актуатором в исследованном диапазоне параметров, квадратично зависит от перенапряжения на электродах и линейно от частоты, что совпадает с аналогичной зависимостью для тяги актуатора.

DOI: 10.31857/S004036442306008X

ВВЕДЕНИЕ

При разработке летательных аппаратов задача снижения трения сопротивления оказывается одной из приоритетных. Перспективным способом ее решения является ламинаризация обтекания крыла и оперения. Основной механизм ламинарно-турбулентного перехода на стреловидном крыле связан с развитием неустойчивости поперечного течения [1, 2], обусловленной точкой перегиба в профиле поперечной компоненты скорости в пограничном слое. Считается, что в условиях крейсерского полета при низком уровне внешней турбулентности (<0.15%) переход вызывается стационарной модой неустойчивости [3, 4], которая возбуждается шероховатостью обтекаемой поверхности крыла.

Стратегии управления ламинарно-турбулентным переходом на стреловидном крыле обычно связаны с изменением устойчивости основного течения [5, 6]. Модификация трехмерного профиля скорости в пограничном слое может быть выполнена, например, посредством отсоса пограничного слоя [7] либо изменения профиля скорости с помощью объемной силы [8]. Известен также метод модуляции пограничного слоя короткопериодическими субоптимальными возмущениями, которые замедляют развитие естественных вихрей неустойчивости [9], затягивая переход. Использование активных методов воздействия на поток рассматривается как перспективное средство для реализации таких методик в силу возможности их адаптации к внешним условиям полета.

Возможность диэлектрического барьерного разряда (ДБР) создавать пристенную струю газа за счет ионного ветра широко используется в задачах управления потоком для различных аэродинамических приложений [10–13]. В силу своей простоты конструкции и высокой частоты воздействия плазменные актуаторы на основе ДБР имеют преимущество над традиционными методами управления, особенно в задачах внесения управляющих возмущений в пограничный слой. Возможность избирательно возбуждать моды неустойчивости поперечного течения в пограничном слое на стреловидном крыле с помощью барьерного разряда продемонстрирована в работах [14–16]. Было показано, что, по меньшей мере, при скоростях, характерных для низкоскоростного трубного эксперимента (<40 м/с), амплитуда порождаемых разрядом возмущений выше амплитуды естественных вихрей неустойчивости. В то же время было обнаружено, что разряд возбуждает также бегущие возмущения. Это, предположительно, связано с нестационарностью разряда и блужданием микроразрядов по кромке электрода. Для использования плазменного актуатора в задачах затягивания ламинарно-турбулентного перехода необходимо количественно оценить его ключевые параметры как источника возмущений, а именно зависимость амплитуды воздействия от параметров питающего напряжения и соотношение сигнал/шум.

Цель данной работы — параметрическое исследование процесса возбуждения стационарных мод неустойчивости поперечного течения.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперименты проводились в дозвуковой аэродинамической трубе Д3 открытого типа с криволинейной рабочей частью (рис. 1а, 1б). Скорость набегающего потока на срезе сопла составляла $U_0 = 25$ м/с при уровне внешней турбулентности 0.08% в полосе частот 20–1000 Гц. Стреловидная пластина с углом стреловидности 40° выполнена из акрила с эллиптической передней кромкой и закрылком в задней части. Для имитации ускоряющегося течения на стреловидном крыле создавался благоприятный градиент давления над пластиной за счет профилирования верхней стенки рабочей части. Для минимизации влияния стенок на поток профиль боковых стенок повторял форму линии тока потенциального течения. Продольная компонента скорости внешнего потока нарастала приблизительно линейно в диапазоне расстояний от передней кромки $x = 100$–500 мм, а его поперечная компонента удовлетворяла условию скольжения $w \approx \text{const}$. Измеренные интегральные характеристики пограничного слоя, такие как толщины вытеснения δ_1 и потери импульса δ_2, максимум профиля скорости поперечного течения u_{cf} и профили поперечной составляющей скорости в пограничном слое показаны на рис. 1в, 1г вместе с соответствующими результатами расчетов. Исследование развития неустойчивости поперечного течения проводилось в диапазоне расстояний от передней кромки $x \sim 270$–500 мм. Все параметры пограничного слоя удовлетворительно соответствуют расчетным, за исключением максимальной скорости поперечного течения, которая резко снижается после $x = 340$ мм. Такое ее поведение можно объяснить влиянием на профиль осредненного в поперечном направлении течения в пограничном слое нестационарных мод большой амплитуды порядка 10% скорости потока. При таких больших расстояниях от передней кромки развитие возмущений не может считаться полностью линейным.

Плазменный актуатор, показанный на рис. 2, представлял собой систему из двух пар электродов, разделенных диэлектрической керамикой ($\varepsilon = 10.4$) толщиной 1 мм. Каждая из них состояла из медного подстилающего и алюминиевого коронирую-

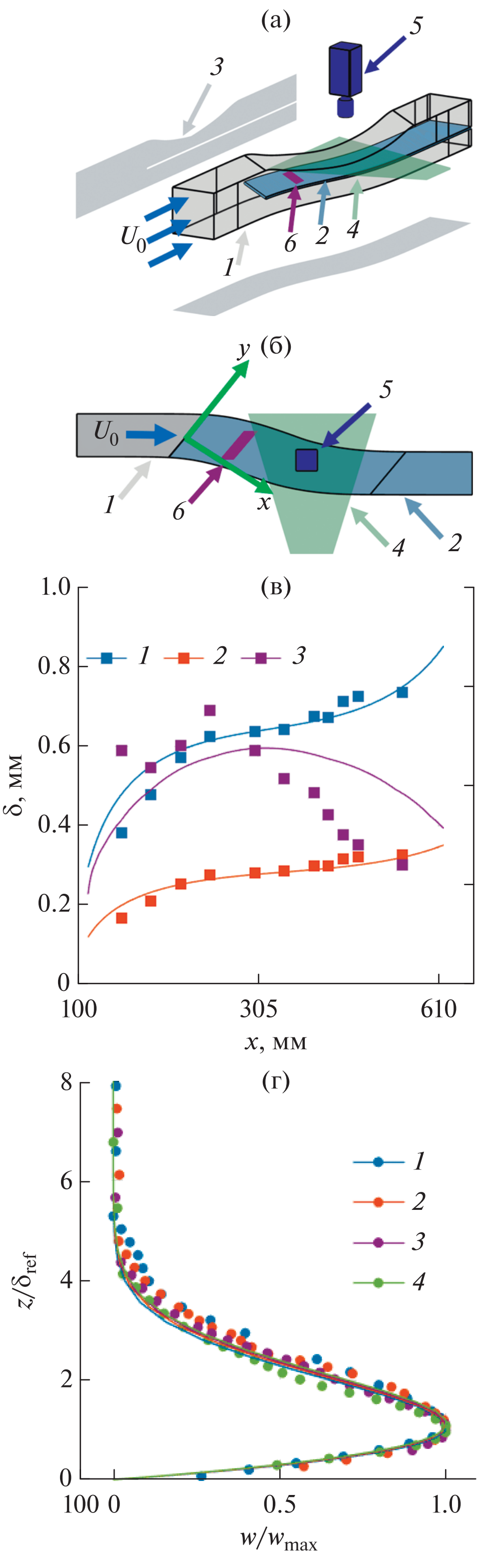

Рис. 1. Схема экспериментальной установки (а), (б): *1* – рабочая часть, *2* – пластина, *3* – тело вытеснения, *4* – лазерный нож, *5* – камера, *6* – плазменный ДБР-актуатор; (в) – интегральные параметры пограничного слоя: *1* – δ_1, *2* – δ_2, *3* – u_{cf}/U_0; (г) – профили скорости поперечного течения: точки – эксперимент, линии – расчет; *1* – $x = 275$ мм, *2* – 390, *3* – 460, *4* – 515.

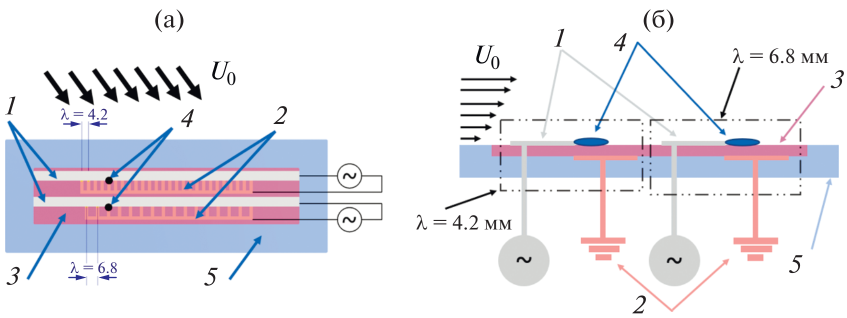

Рис. 2. Схема плазменного ДБР-актуатора: (а) – вид сверху, (б) – вид сбоку; *1* – коронирующие электроды, *2* – подстилающие электроды, *3* – керамика, *4* – точки локализации плазмы, *5* – вставка.

ющего электрода в асимметрической конфигурации. Для модуляции объемной силы в поперечном направлении и локализации места горения разряда подстилающие электроды были выполнены в виде гребенок разного периода $\lambda = 4.2$ и 6.8 мм. На электроды одной из пар подавалось периодическое напряжение в диапазоне $V = 2.8–4.4$ кВ и частотой f = 40–90 кГц. Плазменный актуатор смонтирован заподлицо с поверхностью на расстоянии 200 мм от передней кромки ниже точки потери устойчивости пограничного слоя. Перед измерениями разряд в актуаторе горел в течение 30 мин для стабилизации оксидного слоя на коронирующем электроде. Это приводило к более однородной структуре разряда [17] и уменьшало дрейф характеристик актуатора во время эксперимента.

Структура течения исследовалась с помощью 2D PIV (Particle Image Velocimetry) в панорамной конфигурации (рис. 1а). В качестве источника излучения использовался двухимпульсный лазер Nd:YAG с энергией импульса 100 мДж и длиной волны 532 нм. Съемка трассерных частиц осуществлялась CCD-камерой с разрешением 2560 × 2160 пикс и глубиной цвета 16 бит. Плоскость измерения была ориентирована параллельно пластине и перемещалась с шагом 0.05–0.1 мм перпендикулярно стенке. Здесь и далее принята система координат, связанная с передней кромкой модели (рис. 1а). Осреднение характеристик пограничного слоя проводилось по 100–300 мгновенным парам изображений, регистрируемым с частотой 15 Гц. Трассерные изображения были обработаны с помощью кросскорреляционного алгоритма с окном 12 пикс, что обеспечивало пространственное разрешение полей скорости 0.36 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 3а представлено среднее поле скорости на расстоянии $z \sim 1.7\delta_1$ от поверхности пластины при возбуждении в пограничном слое стационарной моды с длиной волны 6.8 мм. Наблюдаемая система полос высокой и низкой скорости соответствует стационарным вихрям неустойчивости поперечного течения. Профиль скорости по высоте пограничного слоя показан на рис. 3б. Величина модуляции скорости в поперечном направлении позволяет оценить амплитуду стационарной моды неустойчивости. На рис. 3в показан пространственный спектр возмущения на расстоянии 350 мм от кромки, на котором заметно, что период модуляции скорости соответствует рабочей длине волны актуатора 6.8 мм. На начальном эта-

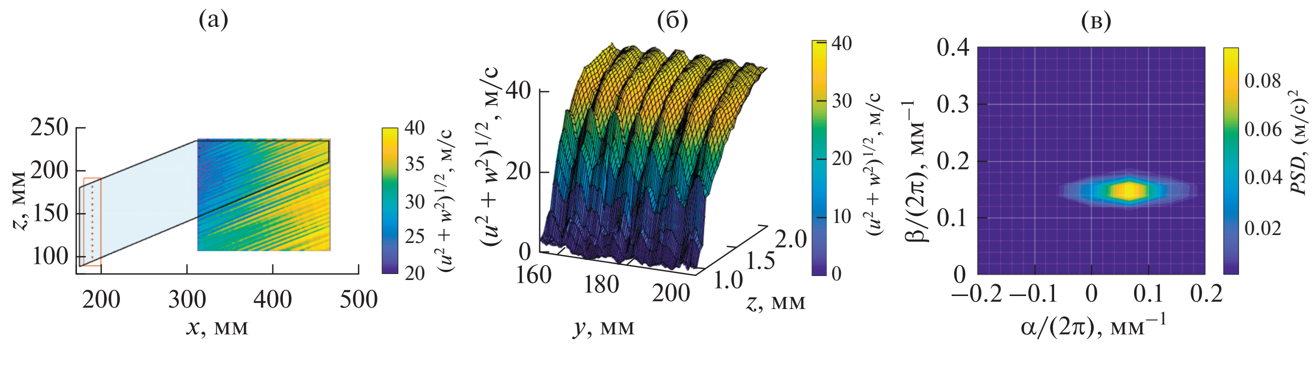

Рис. 3. Визуализация стационарных вихрей неустойчивости поперечного течения (а), профиль скорости в возмущенном пограничном слое (б) и спектральная плотность мощности (PSD) искусственной моды (в), возбужденной актуатором при $x = 310$ мм, $z = 0.6$ мм.

пе развития возмущений (до амплитуды $A_s \sim 5\%$) амплитуда высших стационарных гармоник не превышает 10% от амплитуды гармоники с $\beta = 2\pi/\lambda$. Генерация высших гармоник ниже по потоку объясняется нелинейностью развития возмущений при большой амплитуде стационарных возмущений.

Расчет среднеквадратической амплитуды A_s возбуждаемой моды основывался на спектральном анализе панорамных данных PIV. Чтобы количественно охарактеризовать моду неустойчивости на заданном расстоянии от передней кромки, применялась следующая процедура. Из осредненных по ансамблю полей скорости, содержащих информацию о стационарных модах, посредством скользящего окна размером 15 × 35 мм отслеживалась по высоте и продольной координате группа вихрей. К вырезанным таким образом полям скорости применялось двумерное преобразование Фурье, затем полученные спектры интегрировались в интервале волновых чисел $\beta/2\pi = 0.1–0.2$ мм$^{-1}$ для $\lambda = 6.8$ мм и $\beta/2\pi = 0.17–0.27$ мм$^{-1}$ для $\lambda = 4.2$ мм. В результате обработки получался профиль амплитуды модуляции скорости $A_s(z)$ (рис. 4а). Его максимум принимался за амплитуду стационарной моды при данной продольной координате. Эволюция этой максимальной амплитуды стационарных возмущений при различных длинах волны возбуждаемой моды и амплитудах питающего разряд напряжения показана на рис. 4б, 4в. Штриховыми линиями на этих рисунках представлены результаты расчета кривых нарастания возмущений по линейной теории гидродинамической устойчивости в локально плоскопараллельном приближении. Видно, что при длине волны 6.8 мм, примерно соответствующей периоду наиболее быстрорастущей стационарной моды, рост возмущений до среднеквадратичной амплитуды ≈10% соответствует предсказаниям линейной теории устойчивости. Можно также наблюдать, что с ростом амплитуды питающего напряжения увеличивается начальная амплитуда возмущений. Ее оценка посредством экстраполяции кривых нарастания в точку установки актуатора составляет до 2% от скорости набегающего потока. Далее вниз по потоку наблюдается насыщение роста возмущений на расстоянии 300–400 мм от передней кромки, а затем и ее снижение. Последнее связано с началом ламинарно-турбулентного перехода в пограничном слое и появлением добавочной турбулентной вязкости, приводящей к диссипации крупномасштабных вихрей.

На рис. 5а представлена амплитуда стационарной моды на расстоянии $x = 350$ мм от передней кромки в зависимости от параметров питающего напряжения. Повышение частоты и питающего напряжения увеличивает амплитуду возбуждаемой моды. Зависимость амплитуды A_s от параметров разряда можно представить как $A_s \sim f(V - V_0)^2$, где f — частота разряда, V — питающее напряжение, V_0 — напряжение зажигания. Аналогичная зависимость от параметров питающего напряжения наблюдается для объемной силы, создаваемой плазменным актуатором при небольших перенапряжениях относительно порога зажигания разряда. На рис. 5б показана зависимость тяги актуатора с линейными электродами от частоты и напряжения разряда. Тяга актуатора F_x оценивалась в двумерной конфигурации в неподвижном воздухе на основе PIV-данных методом оценки баланса потока импульса в пристеночной области [10]. Можно видеть, что тяга также аппроксимируется квадратичной зависимостью в области небольших перенапряжений; далее на результаты влияет филаментация разряда. Измерения, выполненные для актуатора с ограниченной в поперечном направлении областью горения разряда [18] (красная звездочка на рис. 5б), показывают, что при ширине ответного электрода порядка и более длины разряда продольная составляющая тяги актуатора остается неизменной.

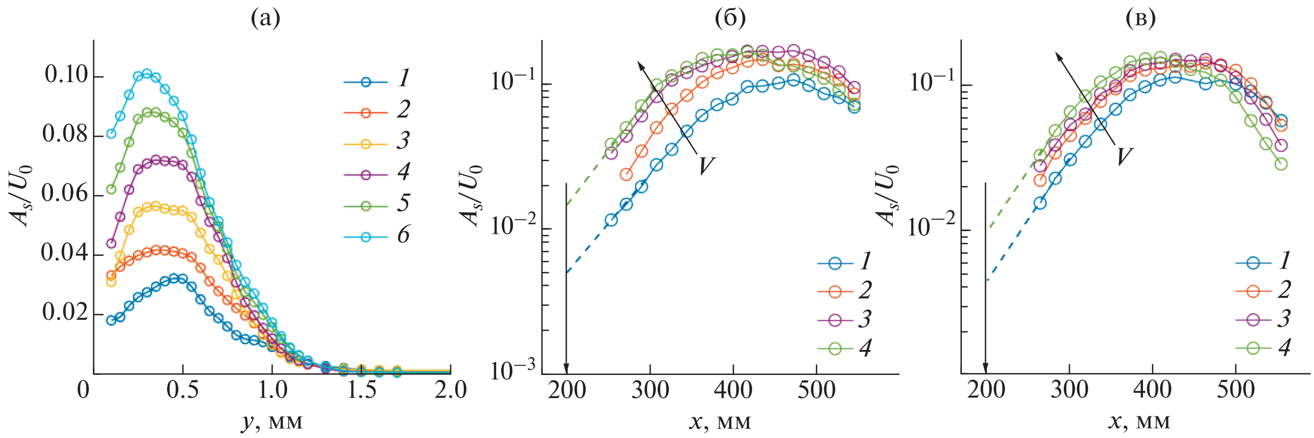

Рис. 4. Профиль амплитуды модуляции скорости (а): *1* – $x = 283$ мм, *2* – 301, *3* – 319, *4* – 338, *5* – 356, *6* – 374; кривые нарастания амплитуды стационарной оптимальной (б) и субоптимальной (в) мод: *1* – $V = 3.2$ кВ, *2* – 3.6, *3* – 4.0, *4* – 4.4.

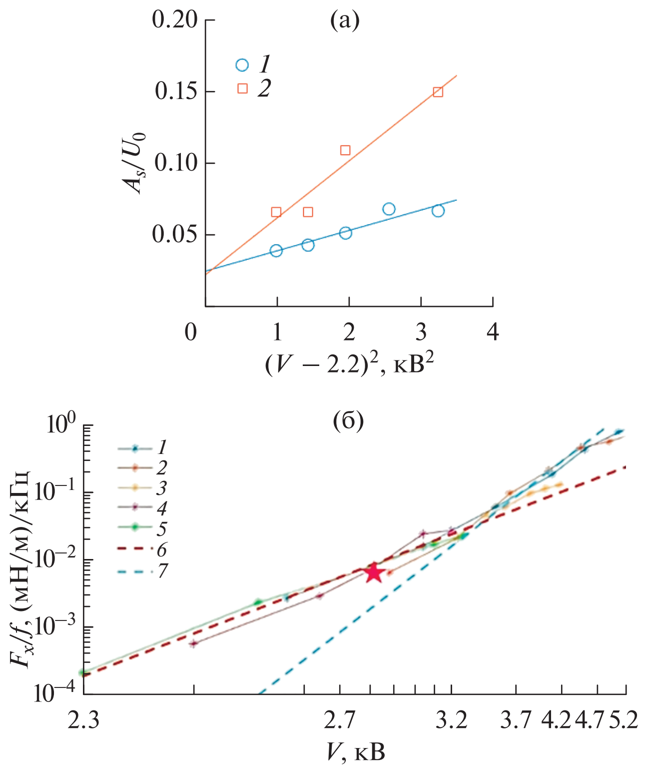

Рис. 5. Зависимости амплитуды моды (а) и тяги плазменного ДБР-актуатора с линейными электродами (б) от параметров питающего напряжения: (а) *1* – f = = 42.5 кГц, *2* – 91.5; (б) *1* – f = 10 кГц, *2* – 20, *3* – 63, *4* – 65, *5* – 143, *6* – $(V - 2.2)^2$, *7* – $(V - 2.2)^4$; символы – двумерная конфигурация электродов, звездочка – тяга актуатора в конфигурации с ограниченной длиной электрода [18].

Одним из ключевых параметров актуатора является амплитуда порождаемых им паразитных нестационарных возмущений. В случае ДБР эти возмущения связаны с нестационарностью разряда, вызванной блужданием микроразрядов по кромке коронирующего электрода. При больших расстояниях от актуатора нестационарность разряда приводит к возбуждению нестационарных мод неустойчивости поперечного течения. Их интенсивность находилась интегрированием спектрограмм мгновенных полей скорости и последующим вычитанием части сигнала, соответствующей стационарной компоненте пульсаций. Оценка амплитуды нестационарных мод, порождаемых актуатором, была проведена при амплитуде питающего напряжения 3.5 и 4.4 кВ. На рис. 6 видно, что амплитуда нестационарных возмущений при работе актуатора оказывается лишь немногим выше "фоновой" амплитуды бегущей моды при естественном уровне турбулентности в установке. Экстраполяция кривых нарастания для бегущих и стационарных возмущений к точке установки актуатора с помощью теоретических кривых нарастания возмущений позволяет оценить соотношение "сигнал/шум" как

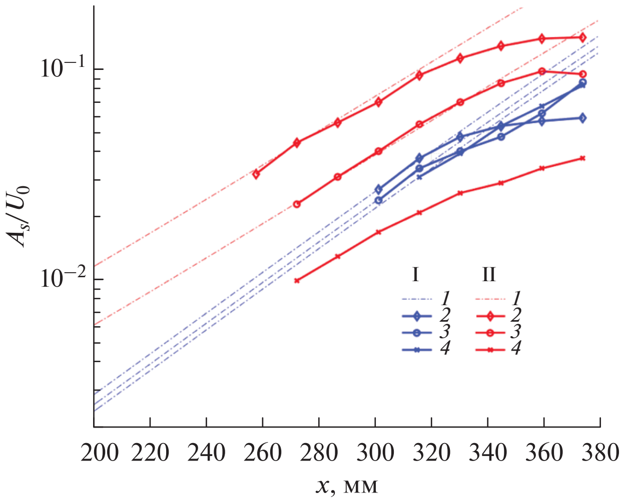

Рис. 6. Амплитуды бегущих A_t (I) и стационарных A_s (II) возмущений в соответствии с линейной теорией устойчивости: частота питающего напряжения – 92 кГц, скорость потока – 25 м/с, шаг электродов – 6.8 мм; *1* – теоретическая кривая, *2* – V = 4.4 кВ, *3* – 3.6, *4* – разряд выключен.

отношение добавленной разрядом нестационарной компоненты к уровню генерируемой им стационарной моды $S/N = A_s\Big/\left(A_{u\,\mathrm{dis}}^2 - A_{u\,\mathrm{ref}}^2\right)^{\frac{1}{2}}$. Получено, что при максимальном напряжении питания, амплитуда дополнительных нестационарных возмущений, создаваемых актуатором, составляет 10–15% от амплитуды генерируемой им стационарной моды. Это означает, что соотношение сигнал/шум для актуатора в условиях данного эксперимента составляет порядка 20–16 дБ. Следует отметить, что дальнейшее повышение напряжения приводит к контракции разряда в актуаторе. Образование филаментов, по-видимому, порождает сильные локальные возмущения в виде продольных вихрей, которые приводят к "байпас" переходу непосредственно за актуатором [19].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Плазменный актуатор с секционным подстилающим электродом может быть использован для возбуждения мод неустойчивости в трехмерном пограничном слое. Получена максимальная среднеквадратичная амплитуда начальных возмущений (непосредственно за актуатором) в 2% от скорости набегающего потока. Ее достаточно для управления переходом как путем генерации искусственных возмущений в противофазе к естественным, так и за счет генерации субкритической моды меньшего периода. В последнем случае требуется обеспечить максимальную амплитуду управляющей моды порядка 10%, что вполне достижимо даже при небольшом ее коэффициенте усиления.

Дальнейшее увеличение амплитуды управляющих возмущений, если это потребуется, может быть достигнуто перемещением актуатора вверх по потоку, ближе к точке максимальной восприимчивости пограничного слоя. С ростом амплитуды и частоты питающего напряжения начальная амплитуда возбуждаемой моды увеличивается как $A_s \sim f(V - V_0)^2$. Функциональная связь амплитуды стационарной моды неустойчивости $A_s(f,V)$ с параметрами питающего напряжения соответствует аналогичной зависимости для тяги плазменного актуатора. Оценено соотношение сигнал/шум для плазменного актуатора, которое понимается как соотношение амплитуды бегущих возмущений, порождаемых актуатором, и стационарной моды. В данном эксперименте оно составило 16–20 дБ.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (№ 20-79-10372).

Обозначения. U_0 – скорость набегающего потока; x, y, z – продольная и перпендикулярные стенке поперечные координаты относительно передней кромки; u, v, w – компоненты скорости в системе координат (x, y, z); f – частота питающего напряжения; V – амплитуда питающего напряжения; α, β – компоненты волнового вектора; A_s, A_u – среднеквадратичная амплитуда стационарных и бегущих возмущений, отнесенная к U_0; δ_1, δ_2 – толщины вытеснения и потери импульса пограничного слоя; u_{cf} – максимум профиля скорости поперечного течения; λ – период электродов актуатора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Saric W., Reed H., White E.* Stability and Transition of Three-dimensional Boundary Layers // Annu. Rev. Fluid Mech. 2003. V. 35. № 1. P. 413.
2. *Устинов М.В.* Ламинарно-турбулентный переход в пограничном слое (обзор). Ч. 1. Основные виды ламинарно-турбулентного перехода на стреловидном крыле // Уч. зап. ЦАГИ. 2013. Т. 44. № 1. С. 3.
3. *Bippes H.* Basic Experiments on Transition in Three-dimensional Boundary Layers Dominated by Crossflow Instability // Progress in Aerospace Sciences. 1999. V. 5. № 4. P. 363.
4. *Borodulin V.I., Ivanov A.V., Kachanov Y.S.* Swept-wing Boundary-layer Transition at Various External Perturbations: Scenarios, Criteria, and Problems of Prediction // Phys. Fluids. 2017. V. 29. № 9. P. 094101.
5. *Messing R., Kloker M.* Investigation of Suction for Laminar Flow Control of Three-dimensional Boundary Layers // J. Fluid Mech. 2010. V. 658. P. 117.
6. *Wassermann P., Kloker M.* Mechanisms and Passive Control of Crossflow-vortex-induced Transition in a Three-dimensional Boundary Layer // J. Fluid Mech. 2002. V. 456. P. 49.
7. *Messing R., Kloker M.* Effect of Suction Through Arrays of Holes in a 3-D Boundary Layer Investigated by Spatial Direct Numerical Simulation in Laminar-turbulent Transition // Proc. IUTAM Symposia “Laminar-Turbulent Transition”. Sedona: Springer, 1999. P. 235.
8. *Dörr P., Kloker M.* Stabilization of a Three-dimensional Boundary Layer by Base-flow Manipulation Using Plasma Actuators // J. Phys. D: Appl. Phys. 2015. V. 48. № 28. P. 285205.
9. *Saric W., Carrillo R.B., Reibert M.* Leading-edge Roughness as a Transition Control Mechanism // 36th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, 1998. P. 781.
10. *Kotsonis M., Ghaemi S., Veldhuis L., Scarano F.* Measurement of the Body Force Field of Plasma Actuators // J. Phys. D: Appl. Phys. 2011. V. 44. № 4. P. 452204.
11. *Голуб В.В., Савельев А.С., Сеченов В.А., Сон Э.Е., Терешонок Д.В.* Плазменная аэродинамика в сверхзвуковом потоке газа // ТВТ. 2010. Т. 48. № 6. С. 948.
12. *Стариковский А.Ю., Александров Н.Л.* Управление газодинамическими потоками с помощью сверхбыстрого локального нагрева в сильнонеравновесной импульсной плазме // Физика плазмы. 2021. Т. 47. № 2. С. 126.
13. *Устинов М.В., Попов И.М., Селивонин И.В., Моралев И.А.* Локализованное возбуждение двумерного пограничного слоя единичными микроразрядами в плазменном актуаторе // ПМТФ. 2022. Т. 63. № 4. С. 3.
14. *Yadala S., Hehner M., Serpieri J., Benard N., Dörr P., Kloker M., Kotsonis M.* Experimental Control of Swept-wing Transition through Base-flow Modification by Plasma Actuators // J. Fluid Mech. 2018. V. 844. P. R2.
15. *Baranov S.A., Chernyshev S.L., Khomich V.Yu. et al.* Experimental Cross-flow Control in a 3D Boundary Layer by Multi-discharge Plasma Actuators // Aerosp. Sci. Technol. 2021. V. 112. P. 106643.
16. *Баранов С.А., Киселёв А.Ф., Моралев И.А., Сбоев Д.С., Толкачёв С.Н., Чернышев С.Л.* Управление ламинарно-турбулентным переходом в трехмерном пограничном слое при повышенной внешней турбулентности с помощью диэлектрического барьерного разряда // Докл. РАН. 2019. Т. 486. № 6. С. 668.
17. *Selivonin I.V., Lazukin A.V., Moravel I.A., Krivov S.A.* Effect of Electrode Degradation on the Electrical Characteristics of Surface Dielectric Barrier Discharge // Plasma Sources Sci. Technol. 2018. V. 27. № 8. P. 850003.
18. *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 // J. Aerosp. Eng. 2020. V. 234. № 1. P. 42.
19. *Moralev I., Sherbakova V., Selivonin I., Bityurin V., Ustinov M.* Effect of the Discharge Constriction in DBD Plasma Actuator on the Laminar Boundary Layer // Int. J. Heat Mass Transfer. 2018. V. 116. P. 1326.