

УДК 553.6.071.082:532.526

УПРАВЛЕНИЕ ЛАМИНАРНО-ТУРБУЛЕНТНЫМ ПЕРЕХОДОМ С ПОМОЩЬЮ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА

© 2011 г.

М.В. Устинов

Центральный аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского, г. Жуковский

maxx61@mail.ru

Поступила в редакцию 15.06.2011

Исследована возможность использования диэлектрического барьерного разряда для затягивания ламинарно-турбулентного перехода, вызванного естественными возмущениями потока. Найдены оптимальное расположение электродов и режим работы генератора высоковольтных импульсов, питающего разряд, обеспечивающие максимальный сдвиг точки перехода вниз по потоку. Показано, что с помощью разряда на поперечных электродах можно получить увеличение длины ламинарной части пограничного слоя на 13%.

Ключевые слова: диэлектрический барьерный разряд, ламинарно-турбулентный переход, пограничный слой, управление течением.

Введение

В последнее время в нашей стране и за рубежом активно исследуется возможность применения диэлектрического барьерного разряда для управления течением газа. Этот тип разряда создается на плоских электродах, разделенных тонким слоем диэлектрика, к которым подводятся импульсы высокого напряжения с частотой порядка нескольких килогерц. На краях наружных электродов создается сильное электрическое поле, ионизирующее часть молекул воздуха и ускоряющее их. Эксперименты [1, 2] показали, что ускорение течения в пограничном слое разрядом действительно замедляет нарастание волны Толлмина – Шлихтинга, созданной вибратором. В [2] продемонстрирована возможность использовать барьерный разряд для подавления волны неустойчивости путем генерации искусственных возмущений в противофазе. Упомянутые эксперименты выполнены при внесении в пограничный слой искусственных возмущений достаточно большой амплитуды. Возможность применения барьерного разряда для предотвращения есте-

ственного перехода не очевидна, так как он является источником неустойчивых возмущений [3]. Настоящая работа посвящена исследованию влияния этого типа разряда на ламинарно-турбулентный переход, вызванный фоновыми флуктуациями потока.

Экспериментальная установка и методика измерений

Измерения проводились в пограничном слое на нижней стенке рабочей части малотурбулентной аэродинамической трубы Т-36И ЦАГИ. Степень турбулентности в ней при скорости потока 5–50 м/с не превышает 0.06%. Рабочая часть трубы длиной 2.6 м имеет прямоугольное поперечное сечение с шириной 500 мм и высотой 350 мм. На нижней стенке рабочей части размещалась пластина из стеклотекстолита толщиной 1.5 мм с тремя парами поперечных потоку электродов, на которых создавался разряд. Электроды толщиной 50 мкм были изготовлены методом травления медного покрытия пластины. Схема расположения пластины в рабочей части показана на рис. 1.

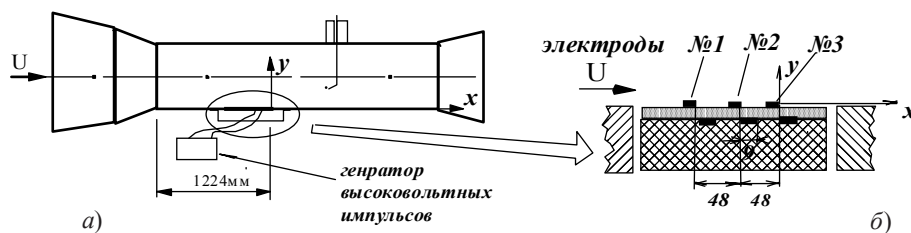


Рис. 1

Для возбуждения разряда использовался генератор высоковольтных импульсов. Длительность импульсов $\tau = 20$ мкс была постоянна, а их амплитуда V и частота f варьировались с целью исследования влияния характеристик разряда на эффективность управления пограничным слоем. Средние значения и пульсации продольной составляющей скорости потока измерялись термоанемометром постоянной температуры типа DISA 55M01. Все измерения выполнялись в вертикальной плоскости посередине рабочей части трубы. Для представления результатов работы использовалась декартова система координат с началом, расположенным на задней кромке электрода №3 (см. рис. 1б).

Воздействие разряда на ламинарно-турбулентный переход

В отсутствии разряда пограничный слой на нижней стенке рабочей части трубы хорошо соответствовал решению Блазиуса для плоской пластины. Число Рейнольдса, вычисленное по толщине вытеснения в точке перехода, составляло $R_{\delta^*} \approx 2000$ что соответствует числу Рейнольдса по длине эквивалентной пластины $R_x \approx 1.5 \cdot 10^6$. Относительно ранний ламинарно-турбулентный переход был вызван возмущениями, приходящими от турбулентного пограничного слоя, на боковых стенках рабочей части.

Сначала был выбран режим барьерного разряда, обеспечивающий максимальный сдвиг ламинарно-турбулентного перехода вниз по потоку. Для этого были измерены кривые нарастания пульсаций скорости в пограничном слое при скорости потока 10 м/с и разных режимах разряда на электроде №2. Результаты, представленные на рис. 2а, показывают, что наиболее эффективен режим 1, сдвигающий переход примерно на 150 мм. Режим 2, отличающийся от него в два раза большим интервалом между импульсами, также дает положительный результат, однако обеспечивает вдвое меньшее затягивание перехода. Два высокочастотных режима разряда 3 и 4 сдвигают переход вверх по потоку. Эти режимы, отличающиеся повышенной мощностью, вероятно, вносят большие возмущения в пограничный слой.

Воздействие разряда в режиме 1 на различных электродах на ламинарно-турбулентный переход при скорости потока 10 м/с показано на рис. 2б. Из него видно, что разряд на электродах №2 и 3, расположенных достаточно близко к точке перехода, смещает ее вниз по потоку примерно на 150 мм. При переносе его на элект-

род №1, расположенный выше по потоку, стабилизирующий эффект практически исчезает. При меньшей скорости потока (8 м/с) разряд на электроде №1, расположенном еще дальше от точки перехода, приводил к ее смещению вверх по потоку. При большей скорости потока (15 м/с) пропадает стабилизирующий эффект разряда на электроде №3, который был очень близок к точке перехода.

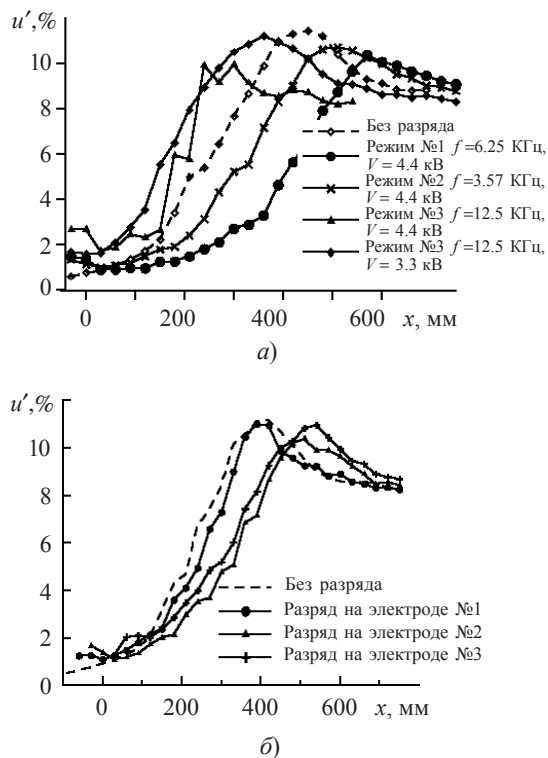


Рис. 2

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что наилучшее место расположения разряда для затягивания перехода приблизительно соответствует точке, где амплитуда пульсаций скорости равна 0.5–1.5%. Если разряд находится выше по потоку, вносимые им возмущения существенно превышают естественные пульсации в пограничном слое, и стабилизирующее действие разгона потока нивелируется повышением уровня возмущений. Наоборот, если разряд расположен слишком близко к точке перехода, сравнительно слабое изменение профиля скорости, индуцированное им, не способно остановить взрывообразное нарастание возмущений на нелинейной стадии перехода.

Авторы благодарят Н.В. Ростова за предоставление генератора высоковольтных импульсов для проведения эксперимента.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты №09-01-00375 и 10-08-01271.

Список литературы

1. Duchmann A. et al. // Seventh IUTAM Symposium on Laminar-Turbulent Transition. 2010. P. 153–158.
2. Grundmann S., Tropea C. // AIAA paper #2008-1369.
3. Курячий А.П., Литвинов В.М., Успенский А.А., Шумилкин В.Г. // Ученые зап. ЦАГИ. 2007. Т. 38, №1–2. С. 102–111.

LAMINAR-TURBULENT TRANSITION CONTROL BY DIELECTRIC BARRIER DISCHARGE

M.V. Ustinov

The use dielectric barrier discharge for the delay of laminar turbulent transition excited by natural flow disturbances is investigated experimentally. Optimal location of electrodes and the operational regime of high-voltage impulse generator providing maximal downstream shift of the transition location were found. It is demonstrated that the 13% increase of the laminar part of the boundary layer can be obtained using a barrier discharge on the cross-flow electrodes.

Keywords: dielectric barrier discharge, laminar-turbulent transition, boundary layer, flow control.