04

Взаимодействие внешних электродов симметричного плазменного актуатора в дозвуковом потоке для управления подъемной силой крыла

© *В.М. Бочарников, В.В. Володин, А.Е. Ельянов*

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия
E-mail: vova.m.bocha@gmail.com

Поступило в Редакцию 22 мая 2025 г.
В окончательной редакции 11 июля 2025 г.
Принято к публикации 11 июля 2025 г.

Предложен механизм взаимодействия внешних электродов симметричного актуатора с набегающим дозвуковым потоком, качественно объясняющий экспериментальные данные без использования терминов „пристеночная“ и „синтетическая“ струи. Управление обтеканием таким образом осуществляется кулоновской силой, воздействующей на заряженный внешний поток. Поток ионов от электрода выше по потоку увеличивает циркуляцию скорости в пространстве между электродами и на внешней границе отрывного пузыря, возникающего у электрода ниже по потоку. Применение оценки подъемной силы по предложенному механизму к экспериментальным данным показывает, что оптимальное сочетание периода питающего напряжения и пролетного времени позволяет увеличить модуль подъемной силы при неизменной питающей мощности.

Ключевые слова: диэлектрический барьерный разряд, симметричный актуатор, синтетическая струя, отрывной пузырь.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.20.61394.20380

В последние годы существенное внимание уделяется плазменным актуаторам, функционирующим на основе диэлектрического барьерного разряда (ДБР). Для управления течениями газа используются объемные силы, возникающие в приповерхностном диэлектрическом барьерном разряде [1]. При этом в качестве основной управляющей единицы рассматривается синтетическая струя, возникающая в неподвижной среде [2]. Двумя главными их недостатками являются ограничения на величину создаваемой объемной силы, обусловленные физикой разряда, и низкая эффективность передачи импульса от носителей заряда нейтральным компонентам слабоионизованной среды, возникающей в разряде [3]. Синтетические струи, создаваемые ДБР-актуаторами, обладают малым скоростным напором, и асимметричные актуаторы ранее показывали свою эффективность лишь в затягивании отрыва у передней кромки крыла [4]. Потенциал симметричного ДБР-актуатора заключается не столько в создании струи, перпендикулярной поверхности крыла, при отсутствии внешнего потока, сколько в комплексном взаимодействии электродов выше и ниже по потоку. Это взаимодействие выражается в придании отрицательного электрического заряда внешнему потоку и управлении им кулоновской силой электродов и заряженной поверхности под достаточно высоким напряжением (в настоящей работе $6-7$ kV). При этом на функционирование разряда требуется небольшая погонная мощность (менее 100 W/m).

Основные экспериментальные данные, послужившие базой для модели взаимодействия диэлектрического барьерного разряда с набегающим дозвуковым потоком, были получены на экспериментальной установке, схема которой представлена на рис. 1. Экспериментальная установка состояла из аэродинамической трубы прямоугольного сечения 110×55 mm с длиной 1.5 m, оснащенной ячеистой структурой для ламинаризации потока (honeycomb) на числа Рейнольдса $1000-3000$, вентилятором VENT-250L для создания потока скоростью до 16 m/s и парой трубок Пито (вдоль и поперек потока) для измерения скорости течения с помощью дифференциального манометра Testo 510. На выходе аэродинамической трубы на рычаге устанавливался симметричный профиль из оргстекла с хордой 10 cm и размахом 17 cm. Симметричный актуатор крепился заподлицо на крыло следующим образом: на крыловой профиль приклеивался инкапсулированный электрод, выполненный из полосы алюминиевой фольги толщиной $50\,\mu$m и шириной 28 mm. На инкапсулированный электрод наклеивался диэлектрик из лавсана толщиной $H = 500\,\mu$m, на диэлектрик — внешние электроды, также выполненные из полосы алюминиевой фольги толщиной $h = 50\,\mu$m и шириной 0.5 cm. Длина электродов L составляла 10 cm. Расстояние между внешними электродами d равно ширине инкапсулированного электрода. К актуатору подводилось высокое синусоидальное напряжение с амплитудой $6.5-7$ kV и частотой $3-4$ kHz. После подачи высокого напряжения частота подбиралась таким образом, чтобы амплитуда напряжения на внешних электродах актуатора была максимальной при неизменной выходной мощности источника. Источником высокого пере-

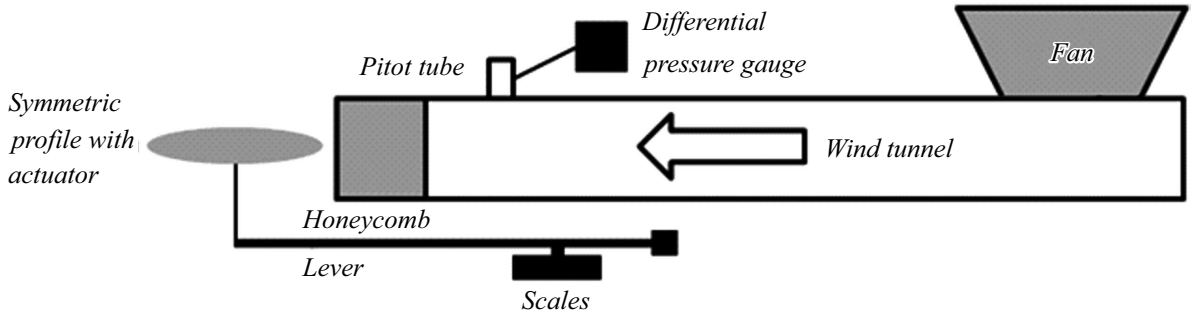


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для шлирен-визуализации течения. Скоростная камера Video Sprint направлена на профиль, плоскость ее обзора совпадает с плоскостью схемы.

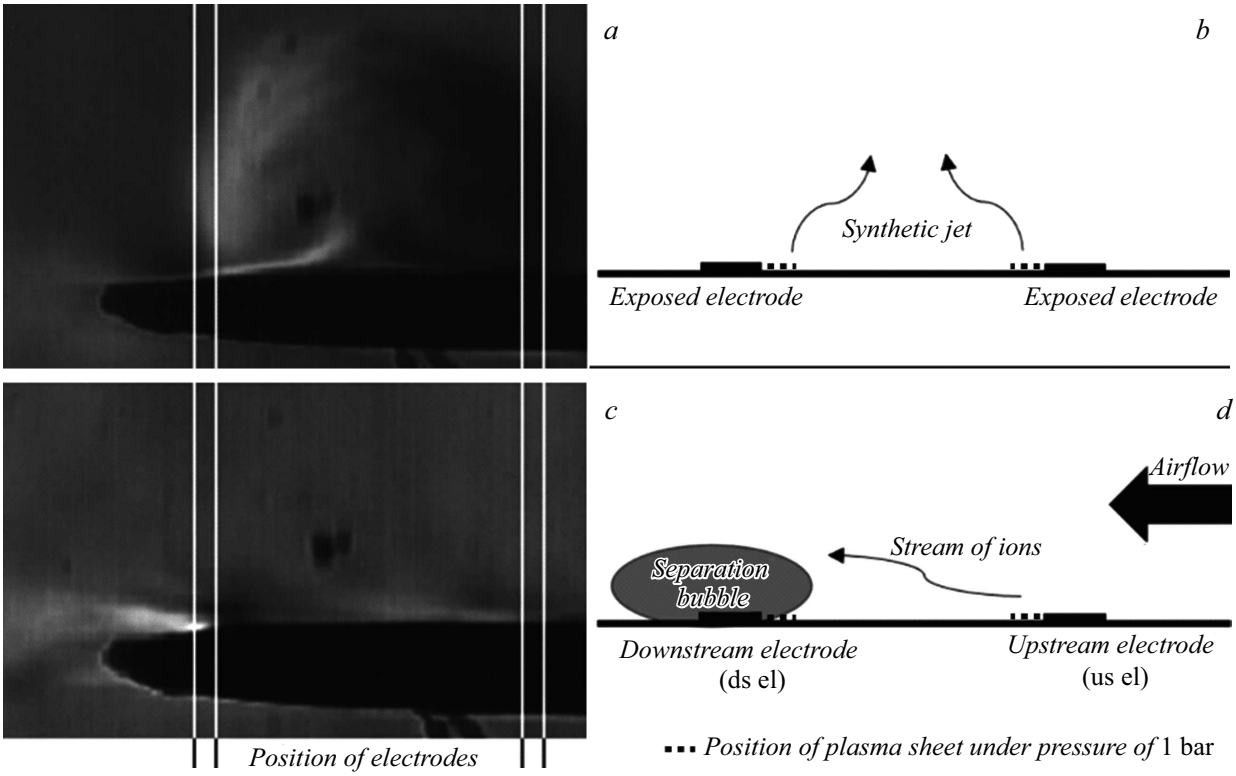


Рис. 2. Теневые фотографии синтетической струи. *a* — без потока, *c* — в потоке, *b* — схема возникновения синтетической струи, *d* — схема взаимодействия ДБР симметричного актуатора с набегающим потоком ($v_0 = 6$ m/s).

менного напряжения служил звуковой генератор ГЗ-33 в сочетании с транзисторным усилителем, питаемым источником постоянного напряжения АКТАКОМ APS 1503 и масляной катушкой зажигания ТУ 37.466.072-96. Подъемная сила измерялась при помощи ювелирных весов ($\delta = \pm 0.01$ g) и рычага 1 : 8, на котором был установлен симметричный профиль с ДБР-актуатором.

В покоящемся воздухе при работе симметричного актуатора происходит столкновение пристеночных струй от каждой его половины с образованием синтетической струи, направленной перпендикулярно поверхности актуатора (рис. 2, *a* и *b*). Необходимо заметить, что основным фактором в образовании объемной силы являются отрицательно заряженные ионы воздуха [5]. Из-за разницы концентраций (рекомбинация [6]) возвратное течение во время положительного полупериода питающего напряжения незначительно. Оптимальное расстояние между внешними электродами определяется соотношением между напряженностью электрического поля и вязкими потерями до столкновения пристеночных струй. При оптимальном расстоянии между внешними электродами без набегающего потока суммарная тяга пристеночных струй лишь на 5 % меньше тяги сформированной ими синтетической струи [7]. В набегающем потоке роли электродов выше и ниже по потоку существенно различны. Далее рассмотрены процессы, связанные с электродами выше (us el) и ниже (ds el) по потоку (рис. 2, *d*).

При взаимодействии актуатора с потоком возникает длинный отрывной пузырь, размеры которого определяются как электрическими характеристиками разряда,

так и скоростью набегающего потока. Рассмотрим случай, когда точка отрыва и точка присоединения потока находятся на поверхности крыла. Точка присоединения потока также может находиться и за границами профиля, образуя „виртуальный профиль", обладающий большим аэродинамическим качеством при малых углах атаки. Теневая съемка показывает, что величина отрыва потока от поверхности крыла достигает стационарного значения за то же время, за которое пристеночные струи от каждой половины актуатора формируют синтетическую струю. Это время составляет порядка 0.1 s. В дальнейшем сформировавшееся течение в обоих случаях подвержено пульсациям, связанным с периодическим воздействием ДБР-актуатора.

Электрод ниже по потоку создает пристеночную струю, направленную против потока. Вертикальная компонента напряженности поля поверхностного заряда E_y ускоряет отрицательные ионы перпендикулярно поверхности актуатора, что приводит к отрыву потока перед кромкой ds el на расстоянии половины длины распространения плазменного листа, которое соответствует максимуму плотности электронов. Из-за того, что горизонтальная составляющая скоростного напора ионного ветра по порядку величины меньше скоростного напора набегающего потока, отрыв затягивается на расстоянии пролета невозмущенного потока за половину периода питающего напряжения ниже задней кромки ds el. Таким образом, существенная часть энергии разряда не расходуется на увеличение циркуляции скорости сегмента, занятого отрывным пузырем, в соответствии с формулой Жуковского

$$\mathbf{F}_1 = \rho \mathbf{v}_0 \times \Gamma l,$$

где $\mathbf{F}_1$ — подъемная сила рассматриваемого сегмента крыла, ρ — плотность воздуха невозмущенного потока, $\mathbf{v}_0$ — скорость набегающего потока, Γ — циркуляция скорости, l — длина отрывного пузыря.

Электрод выше по потоку создает пристеночную струю, сонаправленную с набегающим потоком, и не создает отрывного пузыря. Однако поток ионов, ускоряемых us el, вносит существенный вклад в процесс. Во-первых, увеличивает скоростной напор на внешней границе пузыря за время половины периода питающего напряжения. Результатом кулоновского отталкивания потока от us el поверхностным зарядом является увеличение высоты и длины отрывного пузыря. Происходит рост скорости течения на верхней границе пузыря, являющейся по сути новой границей профиля в набегающем ламинарном потоке. Таким образом, происходит рост циркуляции сегмента крыла, занятого отрывным пузырем (рядом с ds el). Во-вторых, происходит увеличение циркуляции сегмента крыла, оснащенного симметричным ДБР-актуатором, в том числе на сегменте промежутка между внешними электродами (рис. 2, *c*).

При наблюдении отрывного пузыря при помощи шлирен-визуализации можно заметить его пульсации с частотой 1–2 Hz. Такого рода пульсации вызваны неравномерностью распределения объемной силы во времени. Причины этого указаны выше. В случае асимметричного актуатора повлиять на этот процесс не представляется возможным, так как единственный внешний электрод рассматривается как самостоятельная цельная система, взаимодействующая с набегающим потоком. В случае же симметричного актуатора дополнительным фактором является us el. Ионизированный поток от us el модифицирует отрывной пузырь и при соблюдении условий пролетного резонанса может существенно снизить амплитуду пульсаций. В данном случае порция ионизованного газа, возникшая у us el, двигается вниз по потоку к оси симметрии актуатора, при этом подвижность ионов быстро убывает из-за влияния ds el и созданного им поверхностного заряда. Если данная порция прибудет к оси симметрии в начале положительного полупериода, то получит дополнительный разгон от кулоновской силы при смене полярности внешних электродов. При прохождении над ds el напряжение на нем снова меняет знак, ускоряет порцию ниже по потоку, в то время как выше по потоку за счет растущего отрицательного потенциала формируется новая порция ионизованного газа для создания отрыва у ds el и его модификации us el.

В целом снижение циркуляции отрывного пузыря во время положительного полупериода может быть скомпенсировано порциями ионизированного газа от us el при оптимальном сочетании периода питающего напряжения и пролетного времени, определяемого плотностью среды, расстоянием между внешними электродами и скоростью набегающего потока. В простейшей форме условие пролетного резонанса можно сформулировать как равенство периода питающего напряжения T и пролетного времени τ_i ионов от us el к ds el через промежуток d:

$$\frac{1}{\nu} = T = \tau_i = \frac{d}{v_{dr}^x + v_0},$$

где ν — частота питающего напряжения, d — расстояние между внешними электродами, v_{dr}^x — проекция средней дрейфовой скорости ионов на горизонтальную ось, v_0 — скорость набегающего потока.

При оптимальном сочетании электрических и газодинамических параметров можно добиться существенного снижения амплитуды пульсаций с одновременным увеличением циркуляции скорости сегмента крыла, занятого отрывным пузырем, т. е. использовать для увеличения подъемной силы крыла всю мощность диэлектрического барьерного разряда, за исключением тепловых потерь, которые при частотах порядка нескольких килогерц составляют не более 20 % [8]. С учетом соблюдения условий пролетного резонанса можно методом размерностей оценить максимальное увеличение подъемной

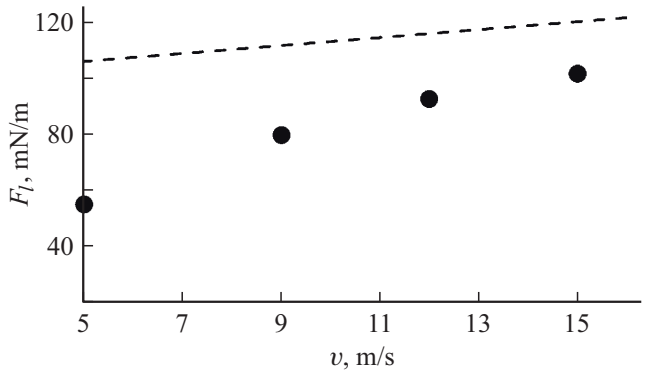


Рис. 3. Подъемная сила, возникающая при взаимодействии ДБР симметричного актуатора с набегающим потоком. Точки — эксперимент (тяга синтетической струи в покоящейся среде: 20 mN/m, $U = 6.5$ kV, $\nu = 3.7$ kHz, $p = 1$ atm, $d = 28$ mm), штриховая линия — оценка сверху при условии пролетного резонанса.

силы, вызванное взаимодействием ДБР с потоком:

$$|\Delta F_l| \leqslant \frac{4}{5} P_{dbd} \left(v_{dr}^{x} + v_0\right) / \left(dv\right)^2, \qquad (1)$$

где P_{dbd} — мощность диэлектрического барьерного разряда [7]. На рис. 3 представлена зависимость подъемной силы, обусловленной влиянием симметричного ДБР-актуатора, установленного на тонком симметричном профиле, от скорости набегающего потока ($\mathrm{Re} \sim 50\,000$). Линия — оценка по формуле (1), показывающая увеличение подъемной силы при приближении системы к пролетному резонансу. Таким образом, оценочная прямая по формуле (1) является асимптотой экспериментально полученной зависимости, так как отражает максимальные возможности влияния электрической системы актуатора на поток, обтекающий профиль, в соответствии с законом сохранения энергии при неизменной мощности источника питания. Энергия низкодобротной [7] электрической колебательной системы ДБР-актуатора передается отрицательно заряженным ионам, а от них нейтральным атомам через межмолекулярные столкновения.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] S. Dalvand, S.G. Pouryoussefi, A. Doostmahmoudi, M.R. Hosseini, Phys. Fluids, **37** (2), 027125 (2025). DOI: 10.1063/5.0250849

[2] П.А. Поливанов, О.И. Вишняков, В.А. Кисловский, А.А. Сидоренко, ЖЭТФ, **163** (5), 717 (2023). DOI: 10.31857/S0044451023050103 [P.A. Polivanov, O.I. Vishnyakov, V.A. Kislovskii, A.A. Sidorenko, JETP, **136** (5), 638 (2023). DOI: 10.1134/S1063776123050047].

[3] И.В. Селивонин, И.А. Моралев, ТВТ, **62** (1), 3 (2024). DOI: 10.31857/S0040364424010013 [I.V. Selivonin, I.A. Moralev, High. Temp., **62** (1), 1 (2024). DOI: 10.1134/S0018151X24700160].

[4] N. Md Daud, Y. Kozato, S. Kikuchi, S. Imao, J. Vis., **19** (1), 37 (2016). DOI: 10.1007/s12650-015-0283-0

[5] V.R. Soloviev, J. Phys. D, **45** (2), 025205 (2011). DOI: 10.1088/0022-3727/45/2/025205

[6] А.В. Туркин, ЖТФ, **84** (11), 14 (2014). [A.V. Turkin, Tech. Phys., **59** (11), 1591 (2014). DOI: 10.1134/S1063784214110255].

[7] В.М. Бочарников, В.В. Володин, В.В. Голуб, И.В. Трифанов, Д.Г. Серебряков, ЖТФ, **90** (12), 2060 (2020). DOI: 10.21883/JTF.2020.12.50122.63-20 [V.M. Bocharnikov, V.V. Volodin, V.V. Golub, I.V. Trifanov, D.G. Serebryakov, Tech. Phys., **65** (12), 1969 (2020). DOI: 10.1134/S1063784220120063].

[8] L. Xie, D. Yuan, L. Wang, G. Zhang, B. Peng, L. Wei, Z. Ling, Appl. Therm. Eng., **250**, 123453 (2024). DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2024.123453