

03

Многоразрядная актуаторная система для силового электрогидродинамического воздействия на пограничный слой аэродинамических поверхностей

© Б.С. Алешин¹, А.П. Курячий¹, И.Е. Ребров², В.Ю. Хомич²,
С.Л. Чернышев¹, В.А. Ямщиков^{2,¶}

¹ Центральный аэрогидродинамический институт им. профессора Н.Е. Жуковского, Жуковский

² Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Санкт-Петербург

¶ E-mail: yamschikov52@mail.ru

Поступило в Редакцию 11 августа 2016 г.

Приводятся результаты исследования новой многоразрядной актуаторной системы, предназначенной для активного управления газовыми течениями, на основе трехэлектродной схемы с экранирующим электродом, в которой роль ускоряющего электрода выполняет сплошная эквипотенциальная поверхность обшивки крыла. Дается сравнение таких основных параметров, как индуцированная скорость воздушного потока, средняя интегральная объемная сила, средняя потребляемая мощность и коэффициент энергетической эффективности, рассчитанных на единицу длины внешнего электрода как для новой многоразрядной актуаторной системы, так и для системы с классической схемой электродов.

DOI: 10.21883/PJTF.2017.01.44088.16457

На сегодняшний день применение плазменных технологий для активного управления аэродинамическими течениями рассматривается как одно из наиболее перспективных направлений в авиационной науке и технике. К их числу относится технология, основанная на процессе взаимодействия ионов разрядной плазмы с газовой средой, в результате которого образуется электрогидродинамический поток [1–3].

Устройствами формирования электрогидродинамического потока служат плазменные актуаторы, действующие на основе использования газового разряда с диэлектрическим барьером, которые применяются для эффективного силового воздействия на пограничный слой

аэродинамических поверхностей. Электрический разряд создается на поверхности диэлектрической пластины в промежутке, образованном тонкими (десятки микрон) полосками оголенного и изолированного электродов, расположенными на противоположных сторонах этой пластины, на которые подается высокое переменное напряжение. Основные достоинства плазменных актуаторов — отсутствие движущихся частей, возможность электронного управления, высокое быстродействие, простота конструкции и совместимость с формой аэродинамических поверхностей, устойчивость барьерного разряда к изменению давления и влажности, малое энергопотребление и небольшой вес, однако возможности этих устройств ограничены воздушными потоками с числом Рейнольдса менее 10^6 [4].

Фундаментальная проблема состоит в увеличении объемного силового воздействия на течение газа с помощью плазменных актуаторов, способных с высокой эффективностью создавать непрерывный одноплазменный воздушный поток на достаточно протяженных поверхностях. Один из основных способов увеличить индуцированный воздушный поток заключается в развитии площади плазменной поверхности за счет использования множества разрядных промежутков, расположенных на этой поверхности [5,6]. Такие устройства можно назвать многоразрядными актуаторными системами (МАС), однако, в отличие от актуаторов с одним разрядным промежутком, в МАС возникают эффекты, связанные со взаимовлиянием соседних электродов при уменьшении расстояния между ними, ограничивающие их применение [7]. Следующая проблема состоит в том, что разряд может зажигаться на обеих (активной и пассивной) кромках полоски оголенного электрода. В результате возникает противоток, что приводит к ослаблению кумулятивного эффекта. Для ограничения негативного влияния противотока были предложены различные решения: с использованием экранирующих электродов [8], с изолированными внутренними электродами, находящимися под плавающим потенциалом [9], с высоковольтным электродом из тонкой проволоки и последовательным чередованием высоковольтных и заземленных электродов [10], со схемой электродов биполярного типа [11].

Для решения указанных проблем в ФГУП ЦАГИ была предложена идея, состоящая в использовании многоразрядной актуаторной системы на основе новой трехэлектродной схемы с экранирующим электродом,

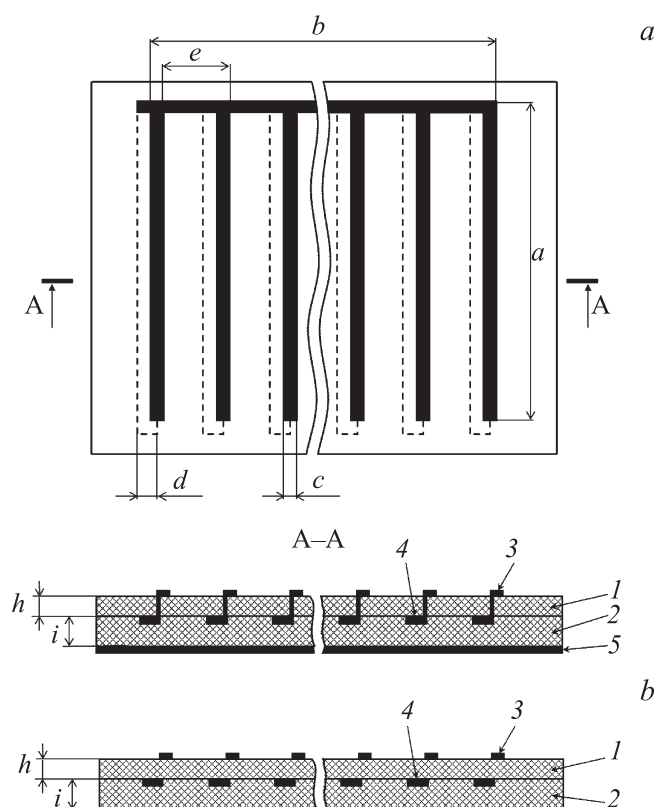


Рис. 1. Эскиз многозарядных актуаторных систем для модели 1 (а) и для модели 2 (b): 1 — внешний слой диэлектрика, 2 — внутренний слой диэлектрика, 3 — внешний активный электрод, 4 — изолированный экранирующий электрод, 5 — сплошной ускоряющий электрод.

в которой роль ускоряющего электрода выполняет сплошная эквипотенциальная поверхность обшивки крыла [12,13]. В настоящей работе приводятся результаты экспериментальных исследований и расчетов характеристик индуцированного барьерным разрядом потока воздуха и эффективности подобной многозарядной актуаторной системы, а также

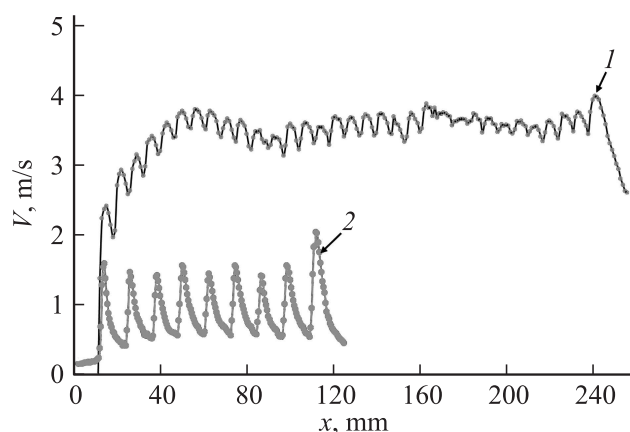


Рис. 2. Продольные профили индуцированной скорости $V(x)$ воздуха на высоте 0.5 mm от поверхности при амплитуде напряжения питания 4.8 kV и частоте разряда 12 kHz : 1 — для модели 1; 2 — для модели 2.

сравнение ее параметров с так называемой классической электродной системой [5,6].

Для представленных исследований была разработана и создана экспериментальная установка [14], включающая систему питания МАС на основе специально разработанного генератора импульсов напряжения до 16 kV , частотой повторения до 15 kHz , средней мощностью питания 2 kW [15] и автоматизированный измерительный комплекс для контроля параметров работы установки. В зависимости от схемы генератора форма выходного напряжения может быть прямоугольной, пилообразной или синусоидальной. Экспериментальная установка позволяет одновременную регистрацию выходных параметров генератора, токов и напряжений барьерного разряда, а также пространственное сканирование скоростных характеристик индуцированного потока у поверхности МАС. Достигнуты пространственное разрешение 0.5 mm и точность измерения скорости потока до 0.1 m/s .

Исследуемые модели МАС с разработанной нами, а также с классической электродной системами обозначены далее цифрами 1 и 2 соответственно. Они выполнены по технологии многослойных печатных

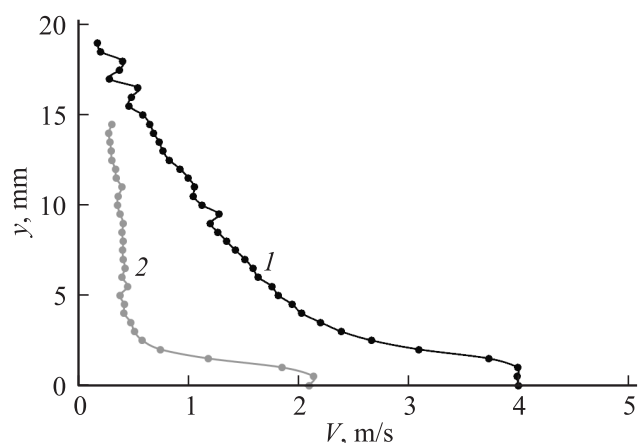


Рис. 3. Вертикальные профили индуцированной скорости $V(y)$ за последним по потоку разрядным промежутком при амплитуде напряжения питания 4.8 kV и частоте разряда 12 kHz: 1 — для модели 1; 2 — для модели 2.

плат с подложкой из стеклотекстолита и с толщиной омеднения $18 \mu\text{m}$. Эскиз обеих моделей показан на рис. 1, *a, b*. У классической модели 2 сплошной электрод отсутствует, а роль ускоряющих электродов выполняют электроды 4, которые в отличие от модели 1 были полностью изолированы от электродов 3. Основные параметры этих плат представлены в таблице ($a-i$), где a — ширина активной области, b — длина активной области, c — ширина внешнего активного электрода, d — ширина изолированного экранирующего (a) или ускоряющего (b) электрода, e — шаг электродов, h — толщина внешнего слоя диэлектрика, i — толщина внутреннего слоя диэлектрика.

Для предотвращения ламинарно-турбулентного перехода в потоке воздуха МАС должна создавать достаточно большую объемную силу, которая растет с повышением средней мощности питания. С другой стороны, энерговыделение в разряде желательно минимизировать, чтобы не оказывать негативного влияния объемного тепловыделения на устойчивость пограничного слоя [10].

С учетом этих обстоятельств были проведены исследования по оптимизации параметров МАС. Результаты измерений продольной ин-

Геометрические параметры многоразрядных актуаторных систем $a-i$, а также максимальные значения средней интегральной объемной силы F_1 , средней потребляемой мощности W_1 и энергетической эффективности отдельного актуатора C_{eff} для исследуемых моделей МАС

Обозначения	Модель 1	Модель 2
a, mm	245	115
b, mm	239.5	100
c, mm	1	2
d, mm	0.5	2.5
e, mm	7	12
h, mm	0.3	0.5
i, mm	0.5	0.5
$F_1, \text{mN/m}$	4	1.4
$W_1, \text{W/m}$	45	65
$C_{eff} \cdot 10^4, \text{s/m}$	0.9	0.2

дуцированной скорости воздуха на высоте $y = 0.5 \text{ mm}$ от поверхности модели при оптимальных значениях амплитуды импульсов до 4.8 kV , частоты разряда 12 kHz и средней мощности питания до 300 W для исследуемых моделей изображены на рис. 2. На рис. 3 представлены вертикальные профили скорости, измеренные за последним по потоку разрядным промежутком в сечении, соответствующем максимуму продольной скорости. Из рис. 2 видно, что у модели 2 с классической электродной системой скорость периодически спадает почти до нуля, что обусловлено наличием у поверхности встречных воздушных потоков. В то же время модель 1 способна создавать практически равномерный поток со значительно большей скоростью и высотой от поверхности платы.

Основными характеристиками, определяющими эффективность МАС, являются создаваемая ими осредненная по времени и интегральная по пространству горизонтальная объемная сила и средняя потребляемая электрическая мощность. Эти характеристики были рассчитаны по методике, описанной в работе [13], из них можно оценить коэффициент энергетической эффективности отдельного актуатора C_{eff} в рассмотренной системе, который определяется как отношение средней интегральной объемной силы F_1 , генерируемой одним актуатором, к

средней потребляемой им мощности W_1 , рассчитанное на единицу длины внешнего электрода $C_{eff} = F_1/W_1$. Для повышения надежности результатов измерений определение потребляемой актуаторами мощности производилось методом вольт-кулоновской [14] и вольт-амперной [13] характеристик, которые показали хорошее согласие обоих результатов. В таблице представлены результаты оценок максимальных значений F_1 , W_1 и C_{eff} для исследуемых моделей МАС.

Таким образом, в настоящей работе разработана и создана высокоэффективная многоразрядная система для активного управления газовыми течениями в пограничном слое на протяженных аэродинамических поверхностях. Основные параметры индуцированного воздушного потока, а также силовые и энергетические показатели созданной нами МАС существенно выше, чем у известных в настоящее время мировых аналогов.

Список литературы

- [1] Небогаткин С.В., Хасая Р.Р., Хомич В.Ю., Ямщиков В.А. // Прикладная физика. 2009. № 4. С. 111–118.
- [2] Мошкунов С.И., Небогаткин С.В., Ребров И.Е. и др. // Прикладная физика. 2011. № 6. С. 32–38.
- [3] Moshkunov S.I., Nebogatkin S.V., Rebrov I.E. et al. // Plasma Phys. Rep. 2012. V. 38. N 13. P. 1040–1045.
- [4] Moreau E. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2007. V. 40. P. 605–636.
- [5] Roth J.R., Sherman D.M., Wilkinson S.P. // Proceedings 36th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit. Reno, NV, 1998. AIAA. P. 98–0328.
- [6] Benard N., Moreau E. // Exp. Fluids. 2014. V. 55. P. 1846. 10.1007/s00348–014–1846–x.
- [7] Do H., Kim W., Capelli M.A., Mungal M.G. // Appl. Phys. Lett. 2008. V. 92. P. 071 504.
- [8] Benard N., Jolibois J., Mizuno A., Moreau E. // Non thermal plasma — Paper # P 1.17.
- [9] Berendt A., Podliński J., Mizeraczyk J. // Eur. Phys. J. Appl. Phys. 2011. V. 55. P. 13 804.
- [10] Debien A., Benard N., Eric Moreau E. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2012. V. 45. P. 215 201.
- [11] Hao JiangNan et al. // Sci. China Phys., Mechan. Astron. 2014. V. 57. N 2. P. 345–353.

- [12] *Курячий А.П., Русьянов Д.А., Скворцов В.В., Чернышев С.Л.* // Ученые записки ЦАГИ. 2013. Т. XLIV. № 3. С. 3–17.
- [13] *Гамируллин М.Д., Курячий А.П., Литвинов В.М., Чернышев С.Л.* // Ученые записки ЦАГИ. 2014. Т. XLV. № 6. С. 28–35.
- [14] *Гамируллин М.Д., Курячий А.П., Ребров И.Е.* и др. // Прикладная физика. 2015. № 5. С. 95–101.
- [15] *Малашин М.В., Мошкунев С.И., Ребров И.Е.* и др. // Приборы и техника эксперимента. 2014. № 2. С. 53–56.