

## Оптимизация параметров многоразрядной актуаторной системы

С. В. Небогаткин, И. Е. Ребров, В. Ю. Хомич, В. А. Ямщиков

*Исследована многоразрядная актуаторная система (МАС) на основе усовершенствованной трехэлектродной схемы с экранирующим электродом. Проведена оптимизация геометрических и физических параметров подобной МАС с целью повышения скорости и энергетической эффективности создаваемого потока. Получены экспериментальные зависимости скорости воздушного потока на выходе МАС от частоты, амплитуды напряжения и средней мощности питания. Также представлены зависимости максимальной скорости от суммарной толщины диэлектрической подложки.*

*Ключевые слова:* актуатор, барьерный разряд по поверхности диэлектрика, высоковольтный генератор импульсов, электрогидродинамический поток.

### Введение

На сегодняшний день применение плазменных технологий для активного управления течениями газа в пограничном слое на аэродинамических поверхностях рассматривается, как одно из наиболее перспективных направлений в авиационной науке и технике. К их числу относится технология, основанная на процессе взаимодействия барьерного разряда и газовой среды, в результате которого образуется электрогидродинамический (ЭГД) поток [1–6]. Устройствами формирования ЭГД-потока служат плазменные актуаторы, которые применяются для эффективного силового воздействия на пограничный слой аэродинамических поверхностей. При этом газовый разряд с диэлектрическим барьером 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, возмож-

ность 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.

Для получения непрерывного, однонаправленного воздушного потока на достаточно протяженных поверхностях используются устройства с множеством разрядных промежутков, расположенных на этой поверхности, которые называются многоразрядными актуаторными системами (МАС) [6, 7].

В [8–11] представлена многоразрядная актуаторная система на основе усовершенствованной трехэлектродной схемы с экранирующим электродом. Цель настоящей работы состояла в оптимизации геометрических и физических параметров подобной МАС для повышения скорости и энергетической эффективности создаваемого потока.

### Параметры экспериментальной установки и актуаторных систем

Исследования плазменных актуаторов проводились на установке, которая подробно описана в [12]. Она состояла из системы питания актуаторов на основе специально разработанных высоковольтного генератора наносекундных импульсов [13, 14] и автоматизированного измерительного комплекса для контроля параметров работы установки. В данных экспериментах питание МАС осуществлялось напряжением пилообразной формы с временем нарастания 1,2 мкс и линейным спадом. Амплитуда выходного напряжения и час-

---

Небогаткин Сергей Вячеславович, с.н.с., к.т.н.  
 Ребров Игорь Евгеньевич, зав. лаб., к.т.н.  
 Хомич Владислав Юрьевич, директор, д.ф.-м.н., академик РАН.  
 Ямщиков Владимир Александрович, директор московского филиала, д.т.н., чл.-корр. РАН.  
 Институт электрофизики и электроэнергетики РАН.  
 Россия, 191186, Санкт-Петербург, Дворцовая набережная, 18.  
 Тел. 8 (499) 135-11-95. E-mail: snebogatkina@mail.ru

Статья поступила в редакцию 26 июня 2018 г.

© Небогаткин С. В., Ребров И. Е., Хомич В. Ю., Ямщиков В. А., 2018

тока импульсов генератора плавно регулировались в диапазоне  $U_m = 1 \div 10$  кВ и  $f = 6 \div 20$  кГц – соответственно.

Применявшиеся в данной работе 5 моделей многоразрядных актуаторных систем выполнены по технологии многослойных печатных плат. Диэлектрической подложкой слоев служил стеклотекстолит, а толщина омеднения составляла 18 мкм. Общая схема конструкции МАС представлена на рис. 1, а основные геометрические размеры моделей с № 1–5 приведены в таблице. Обозначения рис. 1 соответствуют табличным:  $a$  – ширина активной области;  $b$  – длина активной области;  $c$  – ширина верхнего электрода;  $d$  – ширина нижнего электрода;  $e$  – шаг между разрядными промежутками;  $h$  – толщина верхнего слоя диэлектрика;  $i$  – толщина нижнего слоя диэлектрика.

Также, в таблице указаны измеренные значения полной емкости  $C$  и погонной емкости  $C/b$  для этих МАС.

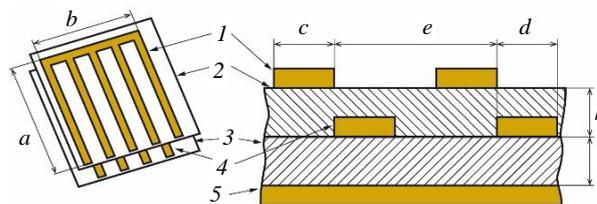


Рис. 1. Схема конструкции многоразрядных актуаторных систем: поперечный разрез – справа, общий вид – слева. 1 – верхний электрод, 2 – верхний слой диэлектрика, 3 – нижний слой диэлектрика, 4 – нижний электрод, 5 – проводящая подложка.

Таблица

Геометрические размеры многоразрядных актуаторных систем

МАС №	Размеры	$a$ , мм	$b$ , мм	$c$ , мм	$d$ , мм	$e$ , мм	$h$ , мм	$i$ , мм	$n$	$h + i$ , мм	$C$ , пФ	$C/b$ , пФ/мм
1		128	84,5	0,5	0,5	6	0,3	0,4	15	0,7	307	3,6
2		100,5	64,5	1,5	1	9	0,5	0,9	8	1,4	161	2,5
3		127,5	110	2	2	12	0,3	1,4	10	1,7	207	1,9
4		85,5	71	1	0,5	7	0,3	0,5	11	0,8	151	2,1
5		86	72	2	1	14	0,3	0,7	6	1,0	105	1,5

### Экспериментальные исследования и оптимизация параметров электрогидродинамических систем

Расчет мощности питания многоразрядных актуаторных систем проводился с помощью вольт-кулоновых характеристик [12, 15–17]. Согласно данному методу, по осциллограммам тока  $I(t)$ , и напряжения  $U(t)$  питания МАС при различных значениях амплитуды напряжения  $U_m$  и частоты  $f$ , сначала вычислялось значение удельного заряда  $Q(t)$  перенесенного из генератора в актуатор за время  $t$ .

$$Q(t) = \int_0^t I(t) dt.$$

По измеренным и рассчитанным значениям строились зависимости напряжения  $U(Q)$  от заряда  $Q$ , за полный период колебаний напряжения. Эти зависимости представляли собой замкнутые кривые, по которым вычислялась площадь, заключенная под замкнутой кривой равная энергии  $E$  рассеиваемой в плазменном актуаторе за один период колебаний напряжения:

$$E = \oint U(Q) dQ.$$

Таким образом, потребляемая МАС мощность рассчитывается как:  $P = Ef$ . Экспериментальные кривые линейно зависели от  $f$  и повыша-

лись с ростом  $U_m$ .

Результаты измерений продольной индуцированной скорости воздуха, а также вертикальные профили скорости приведены в [8–11]. В настоящей работе скорость измерялась на выходе МАС за последним по потоку разрядным промежутком в сечении, соответствующем максимуму продольной скорости. Типичные экспериментальные зависимости скорости  $V$  воздушного потока от частоты  $f$  при разных значениях амплитуды  $U_m$  напряжения питания представлены на рис. 2 на примере МАС № 4. Также на рис. 3 показаны экспериментальные зависимости  $V$  от потребляемой мощности  $P$  при разных  $U_m$ .

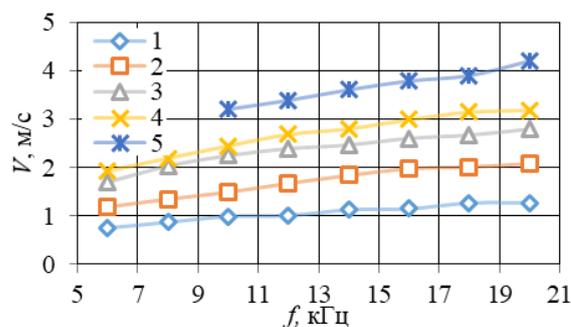


Рис. 2. Скорость воздушного потока  $V$  для МАС № 4 в зависимости от частоты  $f$  при разных амплитудах напряжения  $U_m$  питания (1 – 3,5 кВ, 2 – 4 кВ, 3 – 4,5 кВ, 4 – 5 кВ, 5 – 5 кВ).

5 – 5,5 кВ).

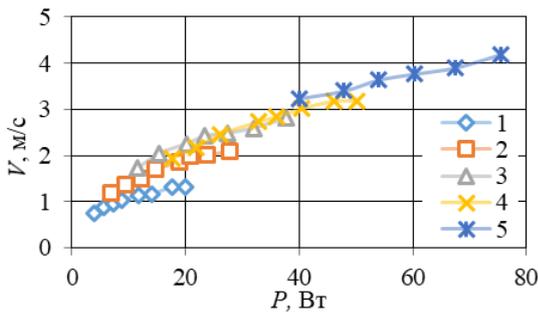


Рис. 3. Скорость воздушного потока  $V$  для МАС № 4 в зависимости от потребляемой мощности  $P$  при разных амплитудах напряжения  $U_m$  питания (1 – 3,5 кВ, 2 – 4 кВ, 3 – 4,5 кВ, 4 – 5 кВ, 5 – 5,5 кВ).

Из этих зависимостей следует, что скорость ЭГД-потока на выходе многоразрядных актуаторных систем растет с увеличением мощности питания. Однако, зависимости скорости от мощности не являются однозначными и носят насыщающийся характер. Причем, при одинаковых значениях мощности, чем больше  $U_m$  тем выше скорость и больше мощность при которой начинается насыщение скорости.

Этот экспериментальный факт, можно объяснить тем, что ширина плазменного слоя барьерного разряда, определяемая расстоянием между границей разряда и кромкой активного электрода от которой он распространяется, увеличивается с повышением  $U_m$  [18]. В результате, все большее количество заряженных частиц плазмы «вливаются» в воздушный поток, пока их не ограничит конечный размер шага  $e$  между разрядными промежутками. Это предположение подтверждается тем, что насыщение скорости и даже ее падение с ростом мощности происходило особенно заметно как при пониженных  $U_m$ , так и при больших  $e$  (например, МАС № 5) т. е. в условиях, когда ширина плазменной зоны разряда была существенно уже ширины шага  $e$  между соседними промежутками.

Эффективность многоразрядных актуаторных систем определяется осредненной по времени и интегральной по пространству горизонтальной объемной силой, возникающей над актуатором и средней потребляемой электрической мощностью [9–11, 19]. Поэтому, по соотношению скоростей потока, полученных при близких значениях потребляемой мощности, можно судить о соотношении эффективностей отдельных МАС. На рис. 4 изображены зависимости максимальной скорости  $V_{\text{макс}}$ , достигнутой на выходе различных МАС от суммарной толщины  $h + i$  диэлектрика для трех значений  $U_m$ . У них проявляется четкая закономерность указывающая на то, что независимо от других геометрических и физических параметров

МАС, чем меньше толщина  $h + i$  диэлектрической подложки тем больше  $V_{\text{макс}}$ . Вероятно, это обусловлено как повышением напряженности поля (и эквивалентно увеличению  $U_m$ ) в разрядных промежутках МАС, так и снижением диэлектрических потерь при уменьшении  $h + i$ .

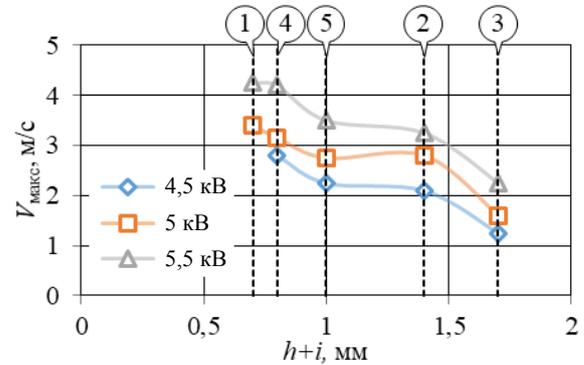


Рис. 4. Зависимость максимальной скорости  $V_{\text{макс}}$  от суммарной толщины  $h + i$  диэлектрика. Цифрами в кружках указан номер МАС.

## Заключение

Исследована многоразрядная актуаторная система на основе усовершенствованной трех-электродной схемы с экранирующим электродом. Проведена оптимизация геометрических и физических параметров подобной МАС с целью повышения скорости и энергетической эффективности создаваемого потока.

Экспериментально показано, что зависимости скорости воздушного потока от мощности питания не являются однозначными и носят насыщающийся характер. Причем, при одинаковых значениях мощности, чем больше амплитуда напряжения питания, тем выше скорость и больше мощность при которой начинается насыщение скорости.

Экспериментально установлено, что уменьшение толщины диэлектрика совместно с сокращением расстояния между разрядными промежутками улучшает скоростные и энергетические характеристики МАС. Это может быть обусловлено увеличением напряженности поля в разрядных промежутках МАС и снижением диэлектрических потерь при уменьшении указанных параметров, а также это свидетельствует о целесообразности дальнейшей миниатюризации поперечных размеров разрядных промежутков МАС.

грант № 16-38-60194.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Roth R. J. // Physics of plasmas. 2003. Vol. 10. No. 5. P. 2117.
2. Roth R. J., Dai X. / 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit Aerospace Sciences Meetings (Reno, USA. 2006). P. 1203.
3. Небогаткин С. В., Ребров И. Е., Хомич В. Ю., Ямщиков В. А. / Сборник тезисов докладов XLIII Международной Звенигородской конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу (Звенигород. 2016). С. 248.
4. Мошкунов С. И., Небогаткин С. В., Ребров И. Е., Хомич В. Ю., Ямщиков В. А. // Прикладная физика. 2011. № 6. С. 32.
5. Небогаткин С. В., Ребров И. Е., Хомич В. Ю., Ямщиков В. А. // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 6. С. 595.
6. Benard N., Moreau E. // Experiments in Fluids. 2014. Vol. 55. No. 11. P. 1.
7. Roth J. R., Sherman D. M., Wilkinson S. P. // AIAA Journal. 2000. Vol. 38. No. 7. P. 1166.
8. Алейшин Б. С., Хомич В. Ю., Чернышев С. Л. // ДАН. 2016. Т. 471. № 6. С. 1.
9. Chernyshev S. L., Gamirullin M. D., Kuryachii A. P., Litvinov V. M., Manuilovich S. V., Rusyanov D. A., Khomich V. Y., Moshkunov S. I., Rebrov I. E., Yamshchikov V. A. // Aerospace Science and Technology. 2016. Vol. 59. P. 155.
10. Алейшин Б. С., Курячий А. П., Ребров И. Е., Хомич В. Ю., Чернышев С. Л., Ямщиков В. А. // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43. № 1. С. 45.
11. Хомич В. Ю., Ямщиков В. А. // Успехи физических наук. 2017. Т. 187. № 6. С. 653.
12. Гаμιруллин М. Д., Курячий А. П., Ребров И. Е., Хомич В. Ю., Чернышев С. Л., Ямщиков В. А. // Прикладная физика. 2015. № 5. С. 95.
13. Малашин М. В., Мошкунов С. И., Ребров И. Е., Хомич В. Ю., Шериунова Е. А. // ПТЭ. 2014. № 2. С. 53.
14. Малашин М. В., Мошкунов С. И., Хомич В. Ю., Шериунова Е. А. // ПТЭ. 2016. № 2. С. 71.
15. Kriegseis J., Grundmann S., Tropea C. // J. of Applied Physics. 2011. Vol. 110. No. 1. P. 013305.
16. David E. A., Matthew C. L., Elmer L. G. / Proc. AIAA. 2012. P. 1–24.
17. Jiang H., Shao T., Zhang C., Yan P., Niu Z., Zhou Y. // IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP 2013). P. 1030.
18. Pons J., Moreau E., Touchard G. / Proc. 28th ICPIG (Prague, Czech Republic. 2007). P. 953.
19. Гаμιруллин М. Д., Курячий А. П., Литвинов В. М., Чернышев С. Л. // Ученые записки ЦАГИ. 2014. Т. 45. № 6. С. 28.

PACS: 47.65.-d

## Optimization of multi-discharge actuator system

S. V. Nebogatkin, I. E. Rebrov, V. Yu. Khomich, and V. A. Yamshchikov

Institute for Electrophysics and Electric Power of Russian Academy of Sciences  
18 Dvortzovaya nab., St.-Petersburg, 191186, Russia  
E-mail: snebogatkina@mail.ru

Received June 26, 2018

***The Multi-Discharge Actuator System (MDAS) based on an improved three-electrode circuit with a screening electrode was investigated. The geometric and physical parameters of this MDAS were optimized in order to increase the speed and energy efficiency of the created air flow. Experimental dependences of the airflow rate at the output of the MDAS on the frequency, voltage range and average power were obtained. The dependences of the maximum speed on the total board thickness of the dielectric substrate were also presented.***

**Keywords:** actuator, plasma actuator, barrier discharge, high voltage pulse generator, electrohydrodynamic flow.

### REFERENCES

1. R. J. Roth, Physics of plasmas, **10** (5), 2117 (2003).
2. R. J. Roth and X. Dai, 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit Aerospace Sciences Meetings (Reno, USA. 2006), p. 1203.
3. S. V. Nebogatkin, I. E. Rebrov, V. Y. Khomich, and V. A. Yamshchikov, Book of abstracts XLIII International Zvenigorod Conference on Plasma Physics and Controlled Fusion (Zvenigorod, Russia, 2016), p. 248.
4. S. I. Moshkunov, S. V. Nebogatkin, I. E. Rebrov, V. Y. Khomich, and V. A. Yamshchikov, Plasma Physics Reports, **38** (13), 1040 (2012).
5. S. V. Nebogatkin, I. E. Rebrov, V. Y. Khomich, and V. A. Yamshchikov, Usp. Prikl. Fiz., **2** (6), 595 (2014).
6. E. Moreau, J. Phys. D: Appl. Phys., **40** (3), 605 (2007).

7. J. R. Roth, D. M. Sherman, and S. P. Wilkinson, *AIAA Journal*, **38** (7), 1166 (2000).
8. B. S. Aleshin, V. Y. Khomich, and S. L. Chernyshev, *Doklady Physics*, **417** (6), 1 (2016).
9. S. L. Chernyshev, M. D. Gamirullin, A. P. Kuryachii, V. M. Litvinov, S. V. Manuilovich, D. A. Rusyanov, V. Y. Khomich, S. I. Moshkunov, I. E. Rebrov, and V. A. Yamshchikov, *Aerospace Science and Technology*, **59**, 155, (2016).
10. B. S. Aleshin, A. P. Kuryachii, S. L. Chernyshev, I. E. Rebrov, V. Y. Khomich, and V. A. Yamshchikov, *Technical Physics Letters*, **43** (1), 64 (2017).
11. V. Y. Khomich and V. A. Yamshchikov, *Physics-Uspeski*, **187** (6), 653, (2017) [in Russian].
12. M. D. Gamirullin, A. P. Kuryachii, I. E. Rebrov, V. Y. Khomich, S. L. Chernyshev, and V. A. Yamshchikov, *Plasma Physics Reports* **5**, 95 (2015) [in Russian].
13. M. V. Malashin, S. I. Moshkunov, I. E. Rebrov, V. Y. Khomich, and E. A. Shershunova, *Instruments and Experimental Techniques*, **57** (2), 140 (2014).
14. M. V. Malashin, S. I. Moshkunov, V. Y. Khomich, and E. A. Shershunova, *Instruments and Experimental Techniques*, **59** (2), 71 (2016).
15. J. Kriegseis, S. Grundmann, and C. Tropea, *J. of Applied Physics*, **110** (1), 013305 (2011).
16. E. A. David, C. L. Matthew, and L. G. Elmer, *Proc. AIAA*, 2012, pp. 1–24.
17. H. Jiang, T. Shao, C. Zhang, P. Yan, Z. Niu, and Y. Zhou, *IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP 2013)*, p. 1030.
18. J. Pons, E. Moreau, and G. Touchard, *Proc. 28th ICPIG (Prague, Czech Republic. 2007)*, p. 953.
19. M. D. Gamirullin, A. P. Kuryachii, V. M. Litvinov, and S. L. Chernyshev, *TsAGI Science Journal*, **45** (6), 28 (2014) [in Russian].