

УДК 537.523.9

Экспериментальная установка для исследования плазменных актуаторов, создающих электрогидродинамический поток

М. Д. Гамируллин, А. П. Курячий, И. Е. Ребров, В. Ю. Хомич,
С. Л. Чернышев, В. А. Ямщиков

Описана установка на основе мощного высоковольтного генератора прямоугольных импульсов и автоматизированного измерительного комплекса для исследования плазменных актуаторов с разветвленной поверхностью барьерного разряда. Экспериментально исследовано влияние параметров электродной системы и толщины актуаторов на скорость электрогидродинамического потока и КПД актуаторов.

PACS: 45.75.-i

Ключевые слова: плазменный актуатор, барьерный разряд, высоковольтный генератор импульсов, электрогидродинамический поток.

Введение

Плазменным актуаторам, действие которых основано на барьерном разряде, зажигаемом на поверхности диэлектрической пластины, посвящены многочисленные научные исследования последних лет [1—6]. В результате электрогидродинамического взаимодействия между разрядной плазмой и окружающим газом происходит достаточно эффективное преобразование электрической энергии в кинетическую энергию газового потока в приповерхностном слое. Главные преимущества плазменных актуаторов: высокая надежность, простота конструкции, возможность интеграции их в аэродинамические поверхности, невысокий расход энергии, возможность управления потоком в реальном времени за счёт высокой частоты срабатывания. Все это определяет перспективность их применения в летательных аппаратах для силового воздействия на течение газа, снижения поверхностного трения и, следовательно, уменьшения расхода топлива и загрязнения атмосферы [4—6].

Работа плазменных актуаторов зависит от множества таких факторов, как геометрия электродной системы, толщина и материал применяемого диэлектрика, но особую роль играет их система питания. Заметим, что основной объем имеющихся экспериментальных данных относится к случаю питания актуаторов синусоидальным высоковольтным напряжением. Однако питание импульсно-периодическим напряжением прямоугольной формы с наносекундной длительностью фронта и спада представляет не меньший интерес, поскольку позволяет существенно поднять импульсную мощность барьерного разряда. Для актуаторов с многоимпульсной системой электродов [6—8] и большой площадью разряда ($\sim 10^5 \text{ см}^2$) важно создание генератора высоковольтных импульсов с высокой средней мощностью и возможностью плавной перестройки выходных параметров в широких пределах.

Целью данной работы являлась разработка и создание установки на основе мощного высоковольтного генератора прямоугольных импульсов, а также сопутствующего автоматизированного измерительного комплекса для исследования плазменных актуаторов с разветвленной поверхностью барьерного разряда.

Экспериментальная установка

При исследованиях плазменных актуаторов необходимо сочетать надежную регистрацию параметров барьерного разряда с измерением динамических характеристик газовых потоков в условиях значительных электромагнитных помех, производимых источником питания и разрядом. Поэтому нами разработана и создана установка на основе мощного высоковольтного генератора на-

Гамируллин Марат Джаудатович, вед. научный сотрудник¹.
Курячий Александр Петрович, вед. научный сотрудник¹.
Ребров Игорь Евгеньевич, старший научный сотрудник².
Хомич Владислав Юрьевич, вр. и.о. директора².

Чернышев Сергей Леонидович, и.о. генерального директора¹.
Ямщиков Владимир Александрович, зав. лабораторией².

¹ФГУП «ЦАГИ».

Россия, 140180, г. Жуковский, Московская область,
ул. Жуковского, 1.

Тел. 8 (499) 556-29-72. E-mail: gamirullin@gmail.com

²Институт электрофизики и электроэнергетики РАН.

Россия, 191186, г. Санкт-Петербург, Дворцовая набережная, 18.

Тел. 8 (499) 135-11-95. E-mail: yamschikov52@mail.ru

Статья поступила в редакцию 2 октября 2015 г.

© Гамируллин М. Д., Курячий А. П., Ребров И. Е., Хомич В. Ю.,
Чернышев С. Л., Ямщиков В. А., 2015

носекундных импульсов, а также автоматизированный измерительный комплекс для исследования актуаторов с разветвленной поверхностью барьерного разряда.

Блок-схема экспериментальной установки с указанием основных элементов представлена на рис. 1.

Схема питания плазменного актуатора и регистрации параметров барьерного разряда изображена на рис. 2. Высоковольтный генератор импульсов состоит из регулируемого высоковольтного источника постоянного напряжения (ВИПН) Spellman 2000 с максимальным напряжением до 20 кВ и током до 100 мА, двух

высоковольтных ключей 1 и 2, включенных по полумостовой схеме и работающих в режиме полного управления, задающего генератора, формирующего длительность импульса питания. Управление транзисторами коммутаторов Q₁₁-Q₁₅ и Q₂₁-Q₂₁₅ (IRGB20B120UD) осуществляется с помощью драйверов U1 и U2 через одновитковые трансформаторы, обеспечивающие гальваническую развязку его входа и выхода [9]. Ключи включаются поочередно с управляемой задающим генератором задержкой и временем открытого состояния, что позволяет перенастраивать временные параметры высоковольтного сигнала в широких пределах.



Рис. 1. Блок-схема экспериментального комплекса

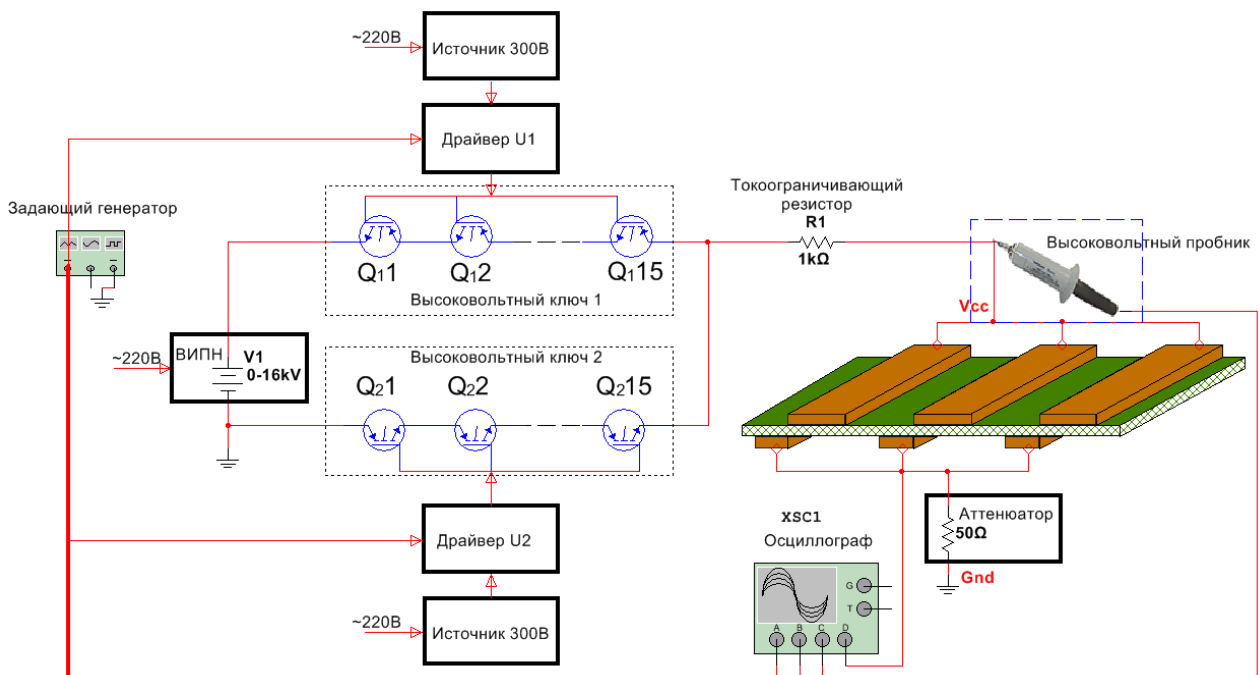


Рис. 2. Схема системы питания и регистрации параметров плазменного актуатора

Генератор работает следующим образом. Высоковольтный ключ 1 по приходу сигнала от драйвера U1 коммутирует высокое напряжение через резистор R1 на актуатор. Время открытого состояния t (см. рис. 3) вариативно, но ограничено, с одной стороны, скоростью нарастания напряжения через ключ, а с другой, насыщением трансформатора управления. Токоограничивающий резистор R1 служит для защиты генератора от короткого замыкания, а также задает фронты напряжения на рабочих электродах. Из-за малых токов утечки высокое напряжение сохраняется на актуаторе до прихода второго импульса управления на высоковольтный ключ 2, разряжающий актуатор через R1 на землю. Частота повторения ограничена рассеиваемой мощностью и при нагрузке емкостью 1 нФ составляет 15 кГц.

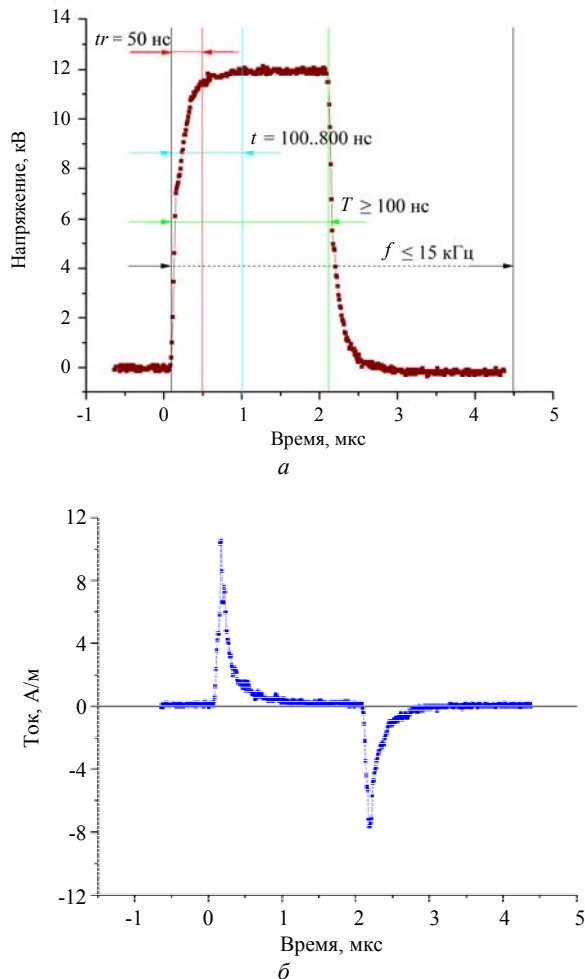


Рис. 3. Типичные осциллограммы напряжения и тока на актуаторе при длительности импульсов 2 мкс, частоте 1,82 кГц и рабочем напряжении 12кВ

Основные технические характеристики генератора представлены в табл. 1.

Регистрация сигналов напряжения питания и тока актуатора осуществлялась высоковольтным пробником Tektronix P6015A, токовым шунтом с

аттенуатором и осциллографом LeCroy WR104Xi-A. Актуаторы планарной конструкции с различной геометрией электродов [10] подключались к генератору через высоковольтный коаксиальный кабель, оплетка которого соединялась с низковольтным электродом актуатора через токовый шунт. Типичные импульсы напряжения и тока через актуатор представлены на рис. 3. В отличие от традиционных синусоидальных генераторов, импульсы разрядного тока сосредоточены на коротком фронте и спаде напряжения.

Таблица 1

Технические характеристики генератора

Рабочее напряжение, U	0,6—16 кВ
Коммутируемый импульсный ток, I	120 А
Прямое падение напряжения, U_{IGBT}	600 В
Время открытого состояния коммутатора, t_o	100—800 нс
Время между импульсами управления, T	не менее 100 нс
Время нарастания напряжения, t_f	50 нс
Время задержки срабатывания, t_d	15 нс
Частота повторения импульсов, f	0—15 кГц
Максимальная мощность, W	2000 Вт

Измерение скорости электрогидродинамического (ЭГД) потока, производимого плазменным актуатором, основано на методе преобразования гидродинамического напора в статическое давление [11]. В отличие от термоанемометрии этот метод защищен от импульсных помех и статического заряда, переносимого ионами в потоке, а по сравнению с методом PIV [12] значительно проще в реализации и не требует громоздкого и дорогостоящего оборудования.

Блок измерения статического давления состоял из металлической пневмотрассы, пластикового насадка полного напора (НПН) и дифференциального датчика давления ASP1400 [13]. Блок установлен на подвижном микрокоординатном столике, обеспечивающим три степени свободы с пространственным разрешением не хуже 0,01 мм. Регистрация давления осуществлялась в диапазоне от 0,002—100 Па с разрешением не хуже 0,01 Па. Специализированное программное обеспечение позволяло управлять с ПК положением подвижного стола и одновременно регистрировать, записывать и обрабатывать показания микроманометра.

Для нивелирования гидродинамических потерь в подводных каналах применялся воздуховод с большим диаметром (6 мм) и НПН в форме конической трубки (диффузора) с диаметром входного отверстия 0,5 мм. С учетом гидродинамического сопротивления всех подводных каналов поправочный коэффициент k составлял 1,18.

Калибровка системы осуществлялась параллельным подключением поверенного микроманометра ЦАГИ [14] к данному устройству.

Результаты исследования

Для исследований по оптимизации работы плазменных актуаторов было создано пять моделей на основе диэлектрика FR4. Схема расположения медных электродов и диэлектрической пластины показана на рис. 4. Геометрические параметры актуаторов приведены в табл. 2.

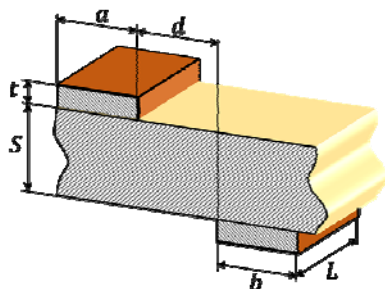


Рис. 4. Схематическое изображение расположения медных электродов

Потребляемая энергия за интервал времени $[t_1, t_2]$, равна

$$E = \int_{t_1}^{t_2} U(t) \cdot I(t) dt, \quad (1)$$

где $U(t)$ и $I(t)$ — измеренные по осциллограммам значения напряжения и тока актуатора. Часть этой

энергии выделяется в разряде и преобразуется в тепло, а также в кинетическую энергию ЭГД-потока. Другая часть обусловлена потерями в диэлектрике. И, наконец, третья часть — это энергия меняющихся электрических и магнитных полей:

Расчет мощности проводился с помощью вольт-кулоновых характеристик (ВКХ) [15—18]. Согласно данному методу, вычислялось значение заряда $Q(t)$, перенесенного из генератора в актуатор за время t , строилась зависимость напряжения на актуаторе от заряда и вычислялась площадь замкнутой кривой:

$$E = \oint U(Q) dQ. \quad (2)$$

Помимо этого, вольт-кулоновские характеристики полезны тем, что наглядно показывают зависимость емкости актуатора от напряжения $C(t) = Q(t) / U(t)$ [16].

Согласно описанной выше методике, на экспериментальной установке проводилась регистрация мгновенных значений $U(t)$ и $I(t)$. Затем с помощью средств постобработки вычислялся $Q(t)$ и строились ВКХ, определялись погрешности измерения. Емкости актуаторов рассчитывались в четырех фазах работы: на фронте и спаде импульса напряжения до возникновения разряда ($C_{\downarrow\text{собств}}$) и во время его горения ($C_{\downarrow\text{раз}}$) [15, 17]. Пример ВКХ для $f = 1,8$ кГц и различных значений U , а также фотография разряда на актуаторе приведены на рис. 5.

Таблица 2

Геометрические характеристики актуаторов

Номер образца	Ширина электрода a , мм	Ширина зазора d , мм	Ширина электрода b , мм	Толщина диэлектрика S , мм	Толщина электрода t , мкм	Длина электрода L , мм
1	1	1	1	0,9	18	50
2	2	0	1,5	0,9	18	50
3	1	2	1	0,9	18	50
4	0,5	1,5	0,5	0,4	18	50
5	1	2	1	0,4	18	50

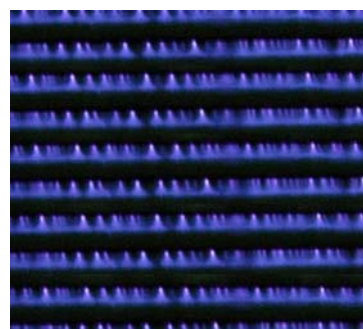
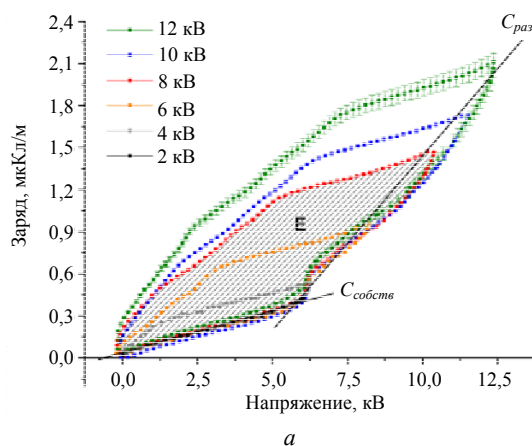


Рис. 5. Экспериментальные результаты: а — типичные вольт-кулоновые характеристики актуатора с 95% достоверным интервалом при $f = 1,8$ кГц и $U = 2—12$ кВ; б — фотография барьерного разряда актуатора со множеством активных электродов на основе геометрии № 5

Согласно [19], мощность, потребляемая актуатором, может быть найдена из формулы

$$P = f \cdot U_{заж} \cdot (U_{max} - U_{заж}) (C_{раз} - C_{собств}) \quad (3)$$

где $U_{заж}$ — напряжение зажигания разряда, U_{max} — амплитуда напряжения, $C_{раз}$ — емкость системы во время разрядных процессов, $C_{собств}$ — собственная емкость актуатора.

На рис. 6, а изображен типичный профиль скорости воздушного потока в зависимости от высоты над поверхностью актуатора и продольного положения измерительного датчика относительно кромки рабочего электрода. Этот профиль имеет в поперечном сечении колоколообразную форму (рис. 6, б). Максимальная скорость, в данном случае 2,5 м/с, приходится на передний край нижнего электрода и на высоты, очень близкие к 0. При этом следует учитывать, что высота 0 соответствует положению, при котором трубка НПН касается самой поверхности актуатора, а разрешение по высоте составляет 0,5 мм. С удалением от активного электрода профиль «расплывается» — максимальная скорость падает, а ширина растет.

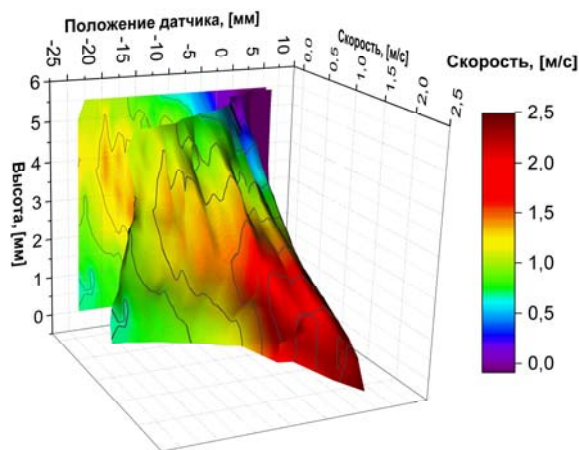
КПД работы актуатора рассчитывается из отношения механической мощности газового потока к подводимой электрической мощности в следующем виде:

$$\eta = \frac{P_{газ.поток}}{P_{электр.}} = \frac{\rho \cdot \iint v^3(x_1, x_2) dx_1 dx_2}{\frac{1}{T} \int_0^T I(t)U(t)dt} \quad (4)$$

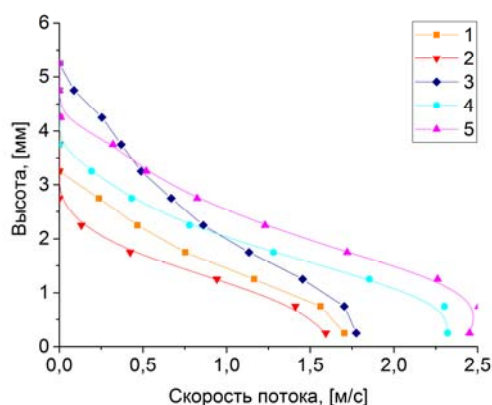
где ρ — плотность воздуха, $v(x_1, x_2)$ — профиль скорости воздушного потока, T — период повторения импульсов питания.

Данные измерений параметров работы актуаторов при $f = 1,8$ кГц и $U = 12$ кВ (рис. 6, б) сведены в табл. 3.

Видно, что наибольшая скорость воздушного потока достигается на моделях актуаторов геометрии 4 и 5. Особенность этих моделей заключается в наличии зазора между электродами и малой толщине диэлектрической подложки (0,5 мм).



а



б

Рис. 6. Экспериментальные результаты: а — профиль скорости аэродинамического потока у поверхности актуатора № 5; б — профили распределения скорости в вертикальной плоскости для разных моделей актуаторов при $U = 12$ кВ и $f = 1,8$ кГц

Как следует из табл. 2 и 3, при одинаковых параметрах питания наиболее эффективными оказываются модели с наименьшей собственной емкостью, а, следовательно, с наименьшими потерями на ее перезарядку, а также те, у которых шире плазменная область (d) при равной толщине диэлектрика, где и происходит взаимодействие заряженных и нейтральных частиц, создающих газовый поток.

Таблица 3

Параметры актуаторов

Образец №	$C_{собств}$, пФ/м	Нормированная средняя мощность, Вт/м	Максимальная скорость потока, м/с	Максимальная эффективность, %
1	33,4	27,1	1,7	0,18
2	58,4	15,4	1,6	0,16
3	31,8	17,2	1,8	0,29
4	24,8	29,3	2,3	0,35
5	23,8	32,4	2,5	0,47

Заключение

Разработана и создана установка для исследования многоэлектродных плазменных актуаторов с площадью поверхности разряда $\sim 10^3$ см², включающая систему питания на основе генератора прямоугольных импульсов напряжения до 16 кВ, с частотой повторения до 15 кГц и средней мощностью питания 2 кВт, а также автоматизированный измерительный комплекс для контроля параметров работы установки. Экспериментальная установка позволяет одновременную регистрацию выходных параметров генератора, токов и напряжений барьерного разряда, а также пространственное сканирование скоростных характеристик электрогидродинамического потока у поверхности актуатора. Достигнуты пространственное разрешение в 0,5 мм и точность измерения скорости потока до 0,1 м/с.

Показано, что для эффективной работы актуаторов важную роль играет оптимизация как параметров системы питания, так и параметров электродной системы, от которых зависят потребляемая электрическая мощность и мощность, передаваемая газовому потоку. Уменьшение собственной емкости актуатора приводит к уменьшению потерь и увеличению коэффициента полезного действия. Отмечено, что скорость растет с расширением плазменной области, в которой происходит взаимодействие заряженных и нейтральных части, создающее газовый поток.

ЛИТЕРАТУРА

1. Martiqua L. // AIAA Journal. 2004. V. 42. No. 11. P. 2177.
2. Seraudie A., et al. // AIAA paper. 2006. V. 3350.
3. Balcon N., et al. // Journal of Electrostatics. 2009. V. 67. No. 2–3. P. 140.
4. Thomas F. O., et al. // AIAA journal. 2009. T. 47. No. 9. P. 2169.
5. Мошкунев С. И. и др. // Прикладная физика. 2011. № 6. С. 32.
6. Курячий А. П. и др. // Ученые записки ЦАГИ. 2013. С. 1.
7. Гамируллин М. Д. и др. // Ученые записки ЦАГИ. 2015. Т. 46. № 6. С. 60.
8. Небогаткин С. В. и др. // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 6. С. 595.
9. Мошкунев С. И., Ребров И. Е., Хомич В. Ю. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 5. С. 630.
10. Курячий А. П., Мануйлович С. В. // Уч. Зап. ЦАГИ. 2011. Т. 42. № 3. С. 41.
11. Хансваров К. И., Цейтлин В. Г. Техника измерения давления, расхода, количества и уровня жидкости, газа и пара. — М.: Издательство стандартов, 1990.
12. Захаров Д. Л. // Электронный журнал «Труды МАИ». Выпуск № 45.
13. ASP1400 Datasheet — April 2008 v2. URL: http://www.sensirion.com/_ASP1400_Datasheet_V2.pdf. 2008. (дата обращения: 18.06.2015).
14. Коган М. Н. и др. // Ученые записки ЦАГИ. 2012. Т. 43. № 5. С. 3.
15. Kriegseis J., et al. // J. of Applied Physics. 2011. V. 110. No. 1. P. 013305.
16. David E. A., Matthew C. L., Elmer L. G. // AIAA–2012–0823. 2012. V. 1. P. 1.
17. Jiang H., et al. // Dielectrics and Electrical Insulation. 2013. V. 20. No. 4.
18. Zaidi S. H., et al. // Proceedings of 49th AIAA. 2011.
19. Manley T. C. // Tr. of the electrochemical society. 1943. V. 84. No. 1. P. 83.

The experimental setup for study of plasma actuators generating an electrohydrodynamic flow

M. D. Gamirullin¹, A. P. Kuryachii¹, I. E. Rebrov², V. Yu. Khomich²,
S. L. Chernyshev¹, and V. A. Yamshchikov²

¹Central Aerohydrodynamic Institute
1 Zhukovsky str., Zhukovsky, Moscow Region, 140180, Russia
E-mail: gamirullin@gmail.com

²Institute for Electrophysics and Electric Power of Russian Academy of Sciences
18 Dvortzovaya nab., St.-Petersburg, 191186, Russia
E-mail: yamshchikov52@mail.ru

Received October 2, 2015

Experimental setup on the basis of a powerful high-voltage rectangular pulses generator and automated measuring complex for actuators with large dielectric discharge surface are described. The effect of the parameters of electrode system and thickness of actuators on the speed of an electrohydrodynamic stream and efficiency is experimentally investigated.

PACS: 45.75.-i

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

REFERENCES

1. L. Martiqua, *AIAA Journal* **42**, 2177 (2004).
2. A. Seraudie, et al., *AIAA Paper* **3350**, (2006).
3. N. Balcon, et al., *Journal of Electrostatics* **67**, 140 (2009).
4. F. O. Thomas, et al., *AIAA Journal* **47**, 2169 (2009).
5. S. I. Moshkunov, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 6, 32 (2011).
6. A. P. Kuryachii, et al., *Uchen. Zapiski TsAGI* **1** (2013).
7. M. D. Gamirullin, et al., *Uchen. Zapiski TsAGI* **46** (6), 60 (2015).
8. S. V. Nebogatkin, et al., *Uspekhi Prikladnoi Fiziki* **2**, 595. (2014)
9. S. I. Moshkunov, I. E. Rebrov, and V. Yu. Khomich, *Uspekhi Prikladnoi Fiziki* **1**, 630. (2013).
10. A. P. Kuryachii and S. V. Manuilovich, *Uchen. Zapiski TsAGI* **42** (3), 41 (2011).
11. K. I. Khansuvarov and V. G. Tseitlin, *Measurements of Pressure, Flow Rate, Quantity and Level of Liquid, Gas, and Vapor* (Izdat. Standart., Moscow, 1990) [in Russian].
12. D. L. Zakharov, *Electron. Zhurn. "Trudy MAI"*, No. 45.
13. *ASP1400 Datasheet* (April 2008 v2. URL: http://www.sensirion.com/_ASP1400_Datasheet_V2.pdf. 2008).
14. M. N. Kogan, et al., *Uchen. Zapiski TsAGI* **43** (5), 3 (2012).
15. J. Kriegseis, et al., *J. of Applied Physics* **110**, 013305 (2011).
16. E. A. David, C. L. Matthew, and L. G. Elmer, *AIAA-2012-0823*. **1**, 1 (2012).
17. H. Jiang, et al., *Dielectrics and Electrical Insulation* **20** (4), (2013).
18. S. H. Zaidi, et al., in *Proceedings of 49th AIAA*. (2011).
19. T. C. Manley, *Tr. of the Electrochemical Society* **84** (1), 83 (1943).