

03;04

Влияние материала электродов на эффективность диэлектрического барьерного разряда

© В.М. Бочарников^{1,2}, В.В. Голуб¹¹ Объединенный институт высоких температур РАН, Москва² Московский физико-технический институт (ГУ), Московская область, Долгопрудный

E-mail: vova-bocha@phystech.edu

Поступило в Редакцию 5 мая 2014 г.

Исследовано влияние материала электродов на величину удельной тяги синтетической струи, создаваемой диэлектрическим барьерным разрядом симметричного актуатора. Во внимание принимались энергия ионизации и удельное электрическое сопротивление материалов. Проведено сравнение зависимостей удельной тяги от расстояния между внешними электродами для меди, алюминия и никеля.

Существует ряд работ, посвященных исследованию характеристик синтетических струй, создаваемых плазменными актуаторами. При этом варьировались как электродинамические параметры (напряжение на внешних электродах, частота) [1], так и форма актуатора (расстояние между внешними электродами, толщина диэлектрика, зазор между внешним и инкапсулированным электродами) [2,3], в то время как материалу электродов уделялось значительно меньше внимания. Формирование синтетической струи начинается в первую очередь из-за высвобождения электронов с поверхности электрода [1], а это значит, что энергия ионизации атомов материала существенно влияет на мощность создаваемой актуатором струи. Также большое влияние может оказать и удельное сопротивление материала [4], так как с ним непосредственно связан КПД преобразования электрической энергии в кинетическую энергию электронов и ионов. Ввиду низкого значения КПД для диэлектрического барьерного разряда ($\sim 0.1\%$) [5] даже небольшое изменение этой величины может сильно увеличить энергию создаваемой разрядом синтетической струи.

Влияние материала электродов на эффективность диэлектрического барьерного разряда

Материал	Энергия ионизации, kJ/mol	Удельное сопротивление, $n\Omega \cdot m$
Медь	745.5	16.8
Алюминий	577.5	28.2
Никель	737.1	69.3

В данной работе была исследована зависимость удельной тяги синтетической струи от расстояния между внешними электродами симметричного актуатора для 3 материалов с различным удельным сопротивлением и энергией ионизации. В таблице представлены значения энергии ионизации и удельного сопротивления для меди, алюминия и никеля. Медь и никель имеют близкую по значению энергию ионизации, но сильно отличающееся удельное сопротивление. Энергия ионизации алюминия на 20% меньше, чем у меди и никеля. Все электроды имеют одинаковую толщину ($40 \mu m$) и ширину (10 mm).

На рис. 1, *a* представлена схема симметричного актуатора. Актуатор представлял собой фторопластовую пластину (1) толщиной $400 \mu m$, на которую наклеены электроды из меди, алюминия или никеля толщиной $40 \mu m$. Ширина верхних электродов (2) 10 mm, ширина инкапсулированного электрода (3) равна ширине промежутка между внешними электродами d . Внешние электроды подсоединены через высоковольтный кабель с балластным сопротивлением 900Ω к регулируемому источнику высокого переменного напряжения частотой 50 kHz. Инкапсулированный электрод заземлен. Длина области разряда вдоль электродов 12–14 см.

На рис. 1, *b* представлена схема установки для измерения тяги синтетической струи, создаваемой симметричным актуатором. Актуатор (4) устанавливался на электронных весах (5) и подключался к источнику высокого переменного напряжения (6) через балластное сопротивление (7) при помощи высоковольтных проводов (8). При повышении напряжения на внешних электродах до 6 kV между электродами возникал диэлектрический барьерный разряд, который создавал синтетическую струю, что приводило к увеличению веса актуатора.

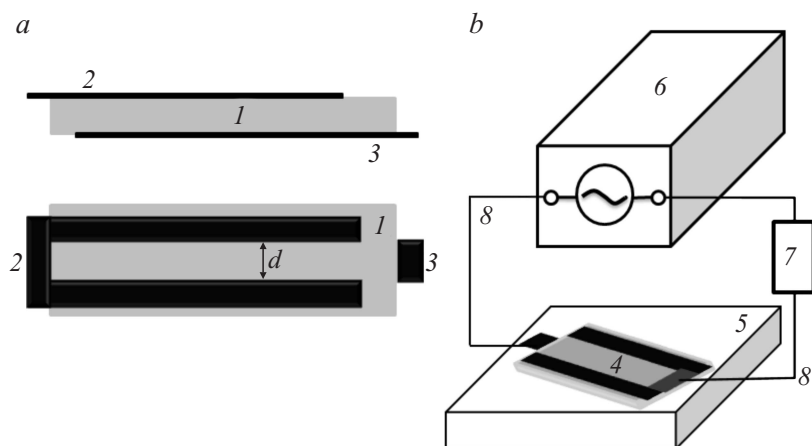


Рис. 1. Схема симметричного актуатора (а) и экспериментальной установки (б).

Полученное значение F , отнесенное к длине разрядной области вдоль электродов L , и считалось удельной тягой f , создаваемой актуатором синтетической струи:

$$f = \frac{F}{L}, \quad (1)$$

где F — увеличение веса работающего актуатора за счет тяги создаваемой им синтетической струи, L — длина области разряда вдоль электродов.

На рис. 2 изображены графики измеренной зависимости удельной тяги синтетической струи от расстояния между внешними электродами d при значениях напряжения 6 кВ и частоты 50 кГц для электродов из меди, алюминия и никеля. Энергия ионизации алюминия значительно меньше, чем у меди, что приводит к образованию большего количества свободных электронов. За счет этого повышается степень ионизации воздуха и увеличивается объемная сила, действующая на поток и создающая синтетическую струю. Как следствие, удельная тяга синтетической струи увеличивается на 15% при всех рассмотренных значениях расстояния между внешними электродами. Значения удельной тяги синтетической струи, близкие к экстремальному, для

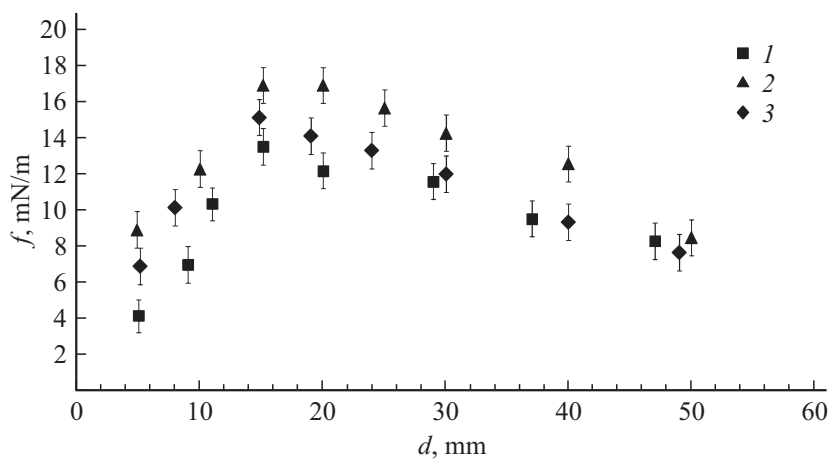


Рис. 2. Зависимость удельной тяги синтетической струи, создаваемой симметричным актуатором, от расстояния между внешними электродами: 1 — электроды изготовлены из меди, 2 — из алюминия, 3 — из никеля.

никелевых электродов больше, чем для медных. Никель обладает в 4 раза большим удельным сопротивлением, чем медь, и при этом такой же энергией ионизации. Ввиду того что в эксперименте струи были направлены вертикально вверх, конвективные потоки вносили положительный вклад в значение тяги синтетической струи и таким образом увеличивали КПД разряда, т.е. эффективность преобразования электрической энергии в кинетическую энергию синтетической струи. При увеличении расстояния между верхними электродами удельная тяга для меди и никеля совпадает. Это вызвано тем, что чем большее расстояние проходят пристеночные струи до столкновения, тем больше энергии теряют под воздействием как вязких сил, так и потоков джоулевого тепла от нагретых электродов [6]. Таким образом, положительный эффект, наблюдавшийся при экстремальном значении, компенсируется увеличенным тепловыделением с поверхности электродов.

На основании приведенных зависимостей можно сделать вывод, что снижение энергии ионизации материала электродов и повышение его удельного сопротивления способствуют увеличению тяги синтетической струи, создаваемой симметричным плазменным актуатором.

Наибольший эффект достигается при экстремальном ее значении относительно напряжения, частоты и расстояния между внешними электродами.

Список литературы

- [1] *Moreau E.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2007. V. 40. P. 605–636.
- [2] *Santhanakrishnan A., Jacob J.D., Suzen Y.B.* // 3rd AIAA Flow Control Conference. 2006. P. 3033.
- [3] *Forte M., Jolibois J., Pons J.* et al. // Exp Fluids. 2007. V. 43. P. 917–928.
- [4] *Seungyeob Lee, Youhwan Shin* // ISSN. 2012. P. 1226–9883.
- [5] *Benard N., Moreau E.* // 6th AIAA Flow Control Conference. 2012. P. 3136.
- [6] *Бочарников В.М., Семин Н.В., Савельев А.С.* и др. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. С. 14.