

04

Оптимизация эффективности диэлектрического барьерного разряда для создания синтетических струй

© В.М. Бочарников^{1,2}, В.В. Володин¹, В.В. Голуб¹

¹ Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

² Московский физико-технический институт (ГУ), Московская область,
Долгопрудный

E-mail: vova.m.bocha@gmail.com

Поступило в Редакцию 24 ноября 2015 г.

Проведено исследование синтетических струй, создаваемых диэлектрическим барьерным разрядом симметричного актуатора. Впервые использован параметр удельная тяга по мощности. Получены вольт-амперные характеристики диэлектрического барьерного разряда при различных значениях балластного сопротивления. Экспериментально определена зависимость удельной тяги по мощности от частоты питающего напряжения.

Часто для определения эффективности работы актуатора измеряют скорость создаваемой им струи [1,2]. Но при практическом применении актуаторов для активного управления потоком вокруг крыльев летательного аппарата важна не столько скорость, сколько импульс, передаваемый потоку [3]. Именно в такой постановке задача приобретает практическую ценность, так как скорость и удельный импульс набегающего потока значительно превосходят величины, которые достижимы в синтетической струе, создаваемой плазменным актуатором. Таким образом, задача сводится к тому, как малым аэродинамическим воздействием актуатора существенно повлиять на интегральные характеристики крыла — подъемную силу и лобовое сопротивление. Эксперименты показывают [4–6], что это возможно, если использовать актуатор как закрылок, но при этом в отличие от механических закрылков синтетическая струя, создаваемая актуатором, несущественно ухудшает аэродинамическое качество крыла, при этом увеличивая подъемную силу (C_y) до 15% при углах атаки от нуля до критического.

Для успешного применения диэлектрического барьерного разряда (ДБР) необходимо найти режим, при котором электрическая энергия разряда наиболее эффективно преобразуется в кинетическую энергию создаваемой им струи. Задачу усложняет тот факт, что для варьирования доступны множество параметров (амплитуда и частота переменного напряжения, материал электродов и изолятора, расстояние между внешними электродами и их геометрическая форма, величина балластного сопротивления) [7,8]. В работе [3] была измерена величина объемной силы при частотах питающего напряжения от 1 до 4 кГц.

Задача данной работы — найти режимы работы актуаторов, в которых наибольшая тяга синтетической струи достигается меньшими затратами электроэнергии. Эффективность разряда оценивается с позиции величины, называемой удельная тяга по мощности, но в специфике синтетической струи:

$$f_p = \frac{f}{P_{abd}},$$

где f — величина тяги синтетической струи, P_{abd} — электрическая мощность диэлектрического барьерного разряда. Диапазон частот (4–9 кГц) и форма сигнала (синусоидальный) были выбраны в соответствии с [2,10].

Использовался линейный симметричный актуатор с электродами из алюминия и расстоянием между внешними электродами $d = 15$ мм. Толщина электродов $40 \mu\text{m}$. В качестве изолятора использовался лавсан толщиной $500 \mu\text{m}$. Данные характеристики актуатора соответствовали максимуму удельной тяги синтетической струи при фиксированной частоте и амплитуде переменного напряжения. Методика измерения тяги синтетической струи представлена в [9], а типичная осциллограмма тока и напряжения ДБР в [2]. Зависимости напряжения тока $U(t)$ и тока $I(t)$ от времени аппроксимировались функцией

$$y = A \sin(\omega t + f),$$

где A — амплитуда, ω — круговая частота, f — фаза с фиксированным значением круговой частоты ω для $U(t)$ и $I(t)$. Погрешность аппроксимации не превышала 10%. Затем импеданс ДБР рассчитывался

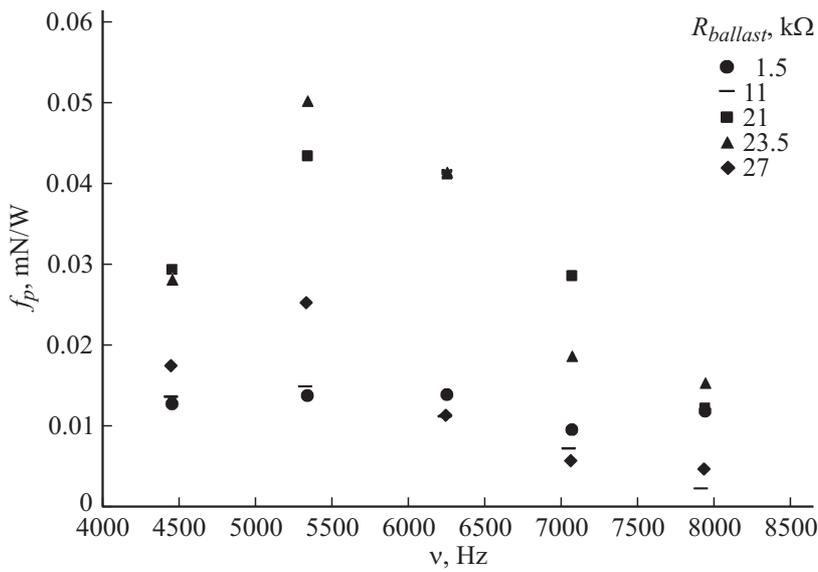


Рис. 1. Зависимость удельной тяги по мощности от частоты питающего напряжения при различных значениях балластного сопротивления.

следующим образом:

$$\text{Re}_z = \frac{U}{I} \cos(df),$$

$$\text{Im}_z = \frac{U}{I} \sin(df),$$

где U, I — аппроксимированная амплитуда напряжения и тока ДБР, df — разность фаз. Далее, мощность диэлектрического барьерного разряда рассчитывалась следующим образом:

$$P_{abd} = \frac{1}{2} U^2 / \text{Re}_z.$$

Таким образом, нахождение удельной тяги по мощности сводилось к нахождению отношения тяги синтетической струи f [mN] к рассчитанной мощности разряда. График зависимости f/P от частоты питающего напряжения при различных значениях балластного сопротивления показан на рис. 1.

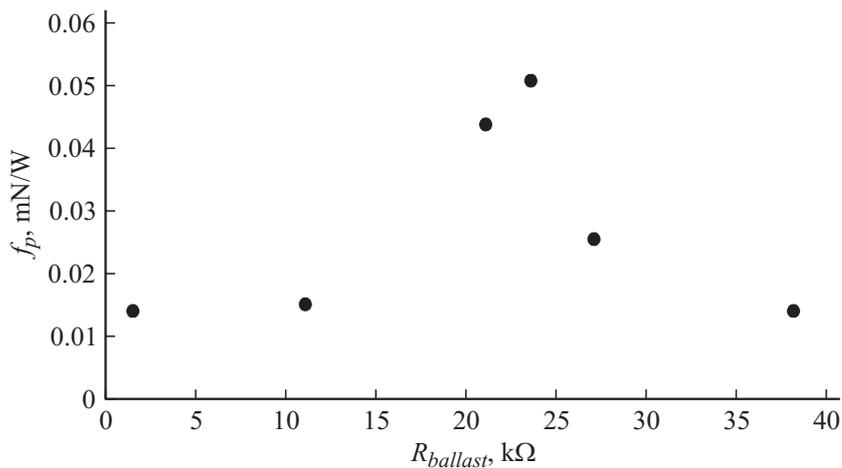


Рис. 2. Максимальная удельная тяга по мощности в зависимости от величины балластного сопротивления.

Обнаружено, что зависимость удельной тяги по мощности имеет максимум при значении частоты 5.3 kHz для всех представленных балластных сопротивлений (рис. 1), на основании чего можно заключить, что на этой частоте разряд наиболее эффективно преобразует электрическую энергию в кинетическую энергию синтетической струи. Также можно заметить, что максимальная величина удельной тяги по мощности в разы отличается для разных балластных сопротивлений.

На рис. 2 показана зависимость максимальной удельной тяги по мощности в зависимости от величины балластного сопротивления. Наличие экстремума объясняется тем, что балластное сопротивление, с одной стороны, является источником дополнительных потерь энергии на джоулево тепло, с другой — это элемент, который позволяет контролировать амплитуду флуктуаций тока, таким образом упорядочивая стримерную часть разряда, не влияя на диффузионную. То есть при той же электрической мощности, вкладываемой в разряд, величина объемной силы, действующей на поток, увеличивается. При малых значениях балластного сопротивления его эффект становится постоянным (рис. 2, точки 1.5 и 11 kΩ).

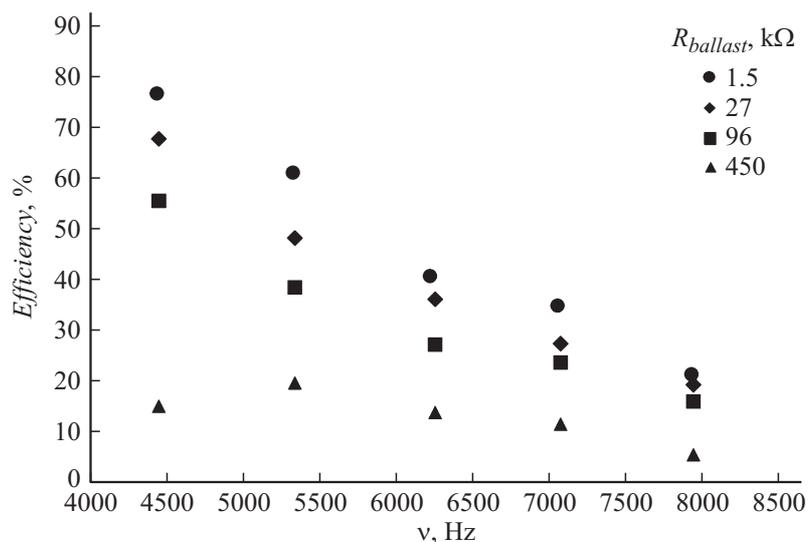


Рис. 3. Зависимость КПД разряда от частоты переменного напряжения при значениях балластного сопротивления 1.5, 27, 96 и 450 kΩ.

Зависимость КПД разряда, т.е. отношение ие мощности разряда P_{dbd} к вложенной мощности от частоты переменного напряжения показан на рис. 3. По приведенным зависимостям можно сделать вывод, что с повышением частоты переменного напряжения КПД разряда существенно уменьшается. Это связано с тем, что ДБР становится более неоднородным и в нем появляется большее количество случайно расположенных стримеров и, таким образом, существенно повышаются потери на тепловыделение и излучение, которые теперь происходят невблизи стационарно расположенных филамент, а вдоль всей кромки внешнего электрода. Следовательно, меньшая мощность оказывается передана ДБР и соответственно синтетической струе. Естественно, что с повышением балластного сопротивления КПД разряда также существенно уменьшается из-за расхода энергии на джоулево тепло в балластном сопротивлении.

Таким образом, получены зависимости удельной тяги по мощности симметричного плазменного актуатора от частоты переменного напря-

жения и величины балластного сопротивления. На основании экспериментальных данных предложены режимы работы актуаторов, в которых наибольший эффект достигается меньшими затратами электроэнергии, что необходимо для управления обтеканием и создания управляющих моментов крыльев летательного аппарата. Зависимости напряжения и тока от времени измерялись непосредственно в цепи актуатора и балластного сопротивления, следовательно, сделанные выводы носят универсальный характер и справедливы при использовании любого источника высокого переменного синусоидального напряжения.

Список литературы

- [1] *Santhanakrishnan A., Jacob J.D., Suzen Y.B.* // 3rd AIAA Flow Control Conference. 2006. P. 3033.
- [2] *Benard N., Moreau E.* // 6th AIAA Flow Control Conference. 2012. P. 3136.
- [3] *Kotsonis M., Ghaemi S., Veldhuis L., Scarano F.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2011. V. 44. P. 045 204.
- [4] *Budovsky A.D., Zanin B.Yu., Zverkov I.D.* et al. // 14th ICMAR. 2008.
- [5] *Leroy A., Podlinski J., Devinant P., Aubrun S.* // 6th EUCASS, 2015.
- [6] *Li-Hao Feng, Kwing-So Choi, Jin-Jun Wang* // J. Fluid Mech. 2015. V. 767. P. 595–626.
- [7] *Orlov D.M., Font G.I., Edelstein D.* // AIAA Journal. 2008. V. 46. P. 3142–3148.
- [8] *Moralev I., Boytsov S., Kazansky P., Bityurin V.* // Exp. Fluids. 2014. V. 55. P. 1747.
- [9] *Бочарников В.В., Голуб В.В.* // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. В. 18. С. 97.
- [10] *Soloviev V.R.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2012. V. 45.