

03;04;15

Тягово-энергетические характеристики плазменных актуаторов при различных давлениях

© В.М. Бочарников¹, И.В. Трифанов^{1,2}, В.В. Голуб¹¹ Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия² Московский физико-технический институт (Государственный университет), Долгопрудный, Московская обл., Россия
E-mail: vova.m.bocha@gmail.com

Поступило в Редакцию 15 октября 2018 г.

Проведено исследование зависимостей от давления погонной тяги и удельной тяги по мощности синтетических струй, создаваемых диэлектрическим барьерным разрядом симметричного актуатора при пониженных давлениях. При уменьшении давления увеличивается длина плазменного листа. Тяга синтетической струи достигает максимума при определенном давлении, зависящем от геометрии актуатора.

DOI: 10.21883/PJTF.2019.02.47220.17562

На данный момент существует множество работ, посвященных исследованию диэлектрического барьерного разряда (ДБР) и создаваемых им струй [1–3]. В частности, эти работы ориентированы на использование ДБР актуаторов в качестве элементов управления потоком вокруг крыльев летательного аппарата [4,5]. В таком качестве актуаторы эффективны при небольших скоростях полета (до 25 м/с) и числе Рейнольдса $Re \sim 10^4$. Данные условия достижимы на высотах порядка 20 км. Но при этом как плотность, так и давление окружающего воздуха снижаются более чем на порядок. Также в работе [6] было обнаружено, что при уменьшении давления увеличивается объем плазменного листа. В настоящей работе исследованы тяга синтетических струй и мощность ДБР при различных давлениях, соответствующих высотам полета до 20 км.

Схема экспериментальной установки и симметричного актуатора представлена на рис. 1. Для экспериментов использовались актуаторы с электродами из алюминия

толщиной $50 \mu\text{m}$ и шириной 0.5 см. Длина электродов составляла величину порядка 10 см. Диэлектриком служил лавсан толщиной $500 \mu\text{m}$. Актуатор помещался в барокамеру на рычаге с соотношением плеч 1 к 8. Через гермоввод подводилось высокое синусоидальное напряжение амплитудой 6.5–7 кВ и частотой 3 кГц. При зажигании разряда возникала синтетическая струя, направленная перпендикулярно поверхности актуатора вверх. Тяга струи определялась при помощи электронных весов. Мощность разряда измерялась при помощи вольт-кулоновской характеристики. Методика измерения мощности ДБР подробно рассмотрена в [7].

Для определения эффективности ДБР использовались два параметра:

1) погонная тяга

$$F = \frac{f}{L},$$

где f — тяга синтетической струи, L — длина разряда вдоль внешних электродов;

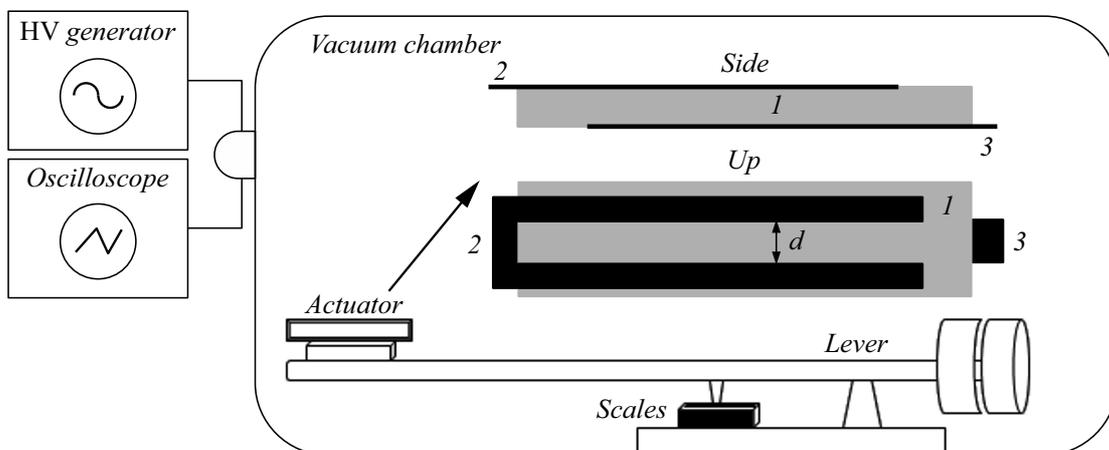


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для измерения тяги синтетической струи и мощности разряда. Схема актуатора вид сбоку и сверху: 1 — диэлектрик, 2 — внешние электроды, 3 — инкапсулированный электрод.

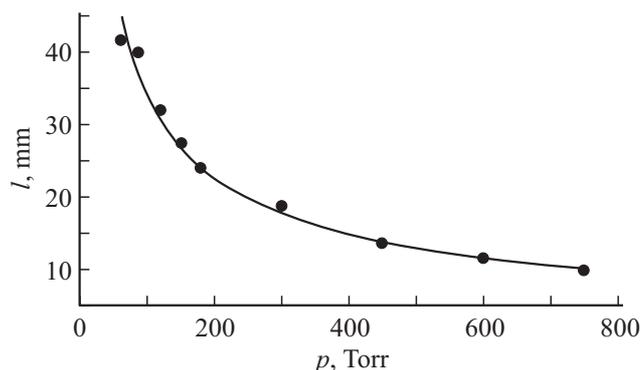


Рис. 2. Зависимость длины плазменного листа от давления.

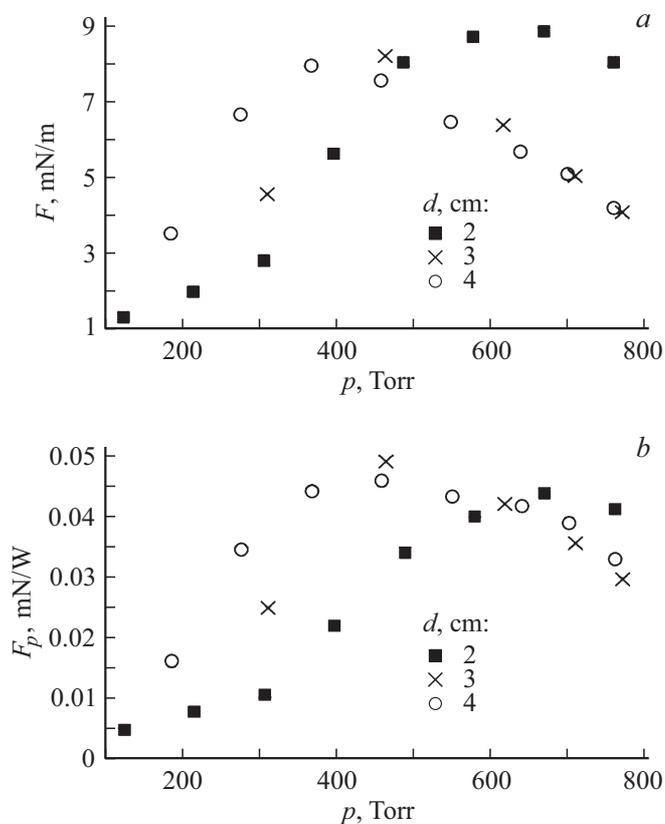


Рис. 3. Зависимости погонной тяги (а) и удельной тяги по мощности (б) от давления при различных расстояниях между внешними электродами d .

2) удельная тяга по мощности

$$F_p = \frac{f}{P_{dbd}},$$

где P_{dbd} — электрическая мощность, потребляемая диэлектрическим барьерным разрядом.

При помощи фотоаппарата с экспозицией 1 с производилась съемка горящего разряда. Такая экспозиция позволяла зарегистрировать суммарное свечение ДБР за множество периодов (~ 3000) и точнее определить

границы плазменного листа. На рис. 2 показана зависимость длины плазменного листа от давления. Можно отметить, что при изменении давления в барокамере от 100 до 750 Torr длина разряда уменьшается в 4 раза. Это явление связано со снижением плотности воздуха, которое приводит к увеличению длины свободного пробега электронов. При понижении давления электроны проходят большее расстояние и набирают большую энергию для ионизации молекул воздуха (O_2 , N_2). С другой стороны, концентрация самих молекул снижается. Образовавшиеся ионы в свою очередь приобретают большую энергию до рекомбинации. Как следствие на зависимости тяги синтетической струи от давления появляется максимум. На рис. 3, а показаны зависимости погонной тяги синтетической струи от давления для актуаторов с разным расстоянием между внешними электродами d . Можно заметить, что при увеличении расстояния между внешними электродами положение максимума сдвигается в область более низких давлений. Такая же тенденция наблюдается и для зависимости удельной тяги по мощности от давления (рис. 3, б). Полученный результат можно связать с увеличением длины плазменного листа при уменьшении давления. Если расстояние между внешними электродами d сравнимо с зоной распространения плазмы (удвоенная длина распространения плазменного листа l)

$$d \leq 2l.$$

то наложение поля от обоих электродов приводит к уменьшению компоненты вектора напряженности электрического поля, направленной вдоль поверхности диэлектрика. Как следствие происходит уменьшение величины объемной силы, действующей на заряженные частицы, и суммарного импульса, который эти частицы передают нейтральным частицам воздуха при столкновениях. Если выполняется обратное условие

$$d > 2l,$$

то увеличиваются потери кинетической энергии пристеночных струй до их столкновения. Результатом является монотонное снижение тяги синтетической струи.

Таким образом, при изменении давления, при котором горит диэлектрический барьерный разряд, изменяются его тягово-энергетические свойства. Показано, что в зависимости от давления окружающего воздуха погонная тяга и удельная тяга по мощности достигают максимума. Положение максимума определяется в том числе и геометрией актуатора, в первую очередь расстоянием между внешними электродами. Причиной этого является увеличение длины плазменного листа при уменьшении давления.

Работа выполнена при поддержке программы РАН № I.56.

Список литературы

- [1] *Moralev I., Boytsov S., Kazansky P., Bityurin V.* // *Exp. Fluids*. 2014. V. 55. N 5. P. 1747.
- [2] *Глазырин Ф.Н., Знаменская И.А., Мурсенкова И.В., Наумов Д.С., Сысоев Н.Н.* // *Письма в ЖТФ*. 2016. Т. 42. В. 2. С. 16–22.
- [3] *Бочарников В.М., Володин В.В., Голуб В.В.* // *Успехи прикл. физики*. 2017. Т. 5. № 6. С. 559–567.
- [4] *Feng L.H., Choi K.S., Wang J.J.* // *J. Fluid Mech.* 2015. V. 767. P. 595–626.
- [5] *Baleriola S., Leroy S., Devinant P., Aubrun S.* // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2016. V. 753. N 5. P. 052001.
- [6] *Starikovskiy A.* // *Experimental investigation of dynamic stall in a wide range of Mach numbers by plasma actuators with combined energy/momentum action* // 47th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conf. Washington, 2016. AIAA 2016-4017. P. 196–210.
- [7] *Biganzoli I., Barni R., Gurioli A., Pertile R., Riccardi C.* // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2014. V. 550. P. 012039.