

УДК 533.6:533.932

© 2006 г. В. М. ЛИТВИНОВ, В. В. СКВОРЦОВ, А. А. УСПЕНСКИЙ

О РОЛИ СТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ ПО УПРАВЛЕНИЮ ТЕЧЕНИЯМИ С ПОМОЩЬЮ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ ЕМКОСТНЫХ РАЗРЯДОВ

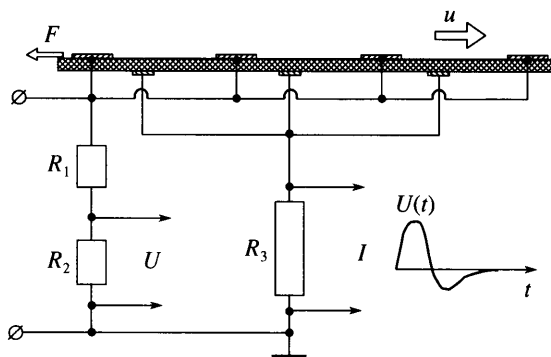
Исследовано влияние статического давления на реактивную силу, действующую на пластину, над поверхностью которой индуцировалось течение газа при возбуждении емкостного (барьерного) разряда. В проведенных экспериментах при снижении давления от атмосферного до 200 Тор разряд перестраивался так, что при фиксированной мощности, подведенной к разряду, происходило увеличение реактивной силы и соответствующего импульса, уносимого нейтральным потоком. Отмечается важная роль эффекта перезарядки в формировании результирующего течения газа. Показано, что в условиях эксперимента эффект увеличения силы при снижении давления связан с увеличением объема плазмы перед электродами и общего числа ионов в этом объеме.

Ключевые слова: электрогазодинамическое управление течением, статическое давление, емкостной разряд, пластина, весовые измерения.

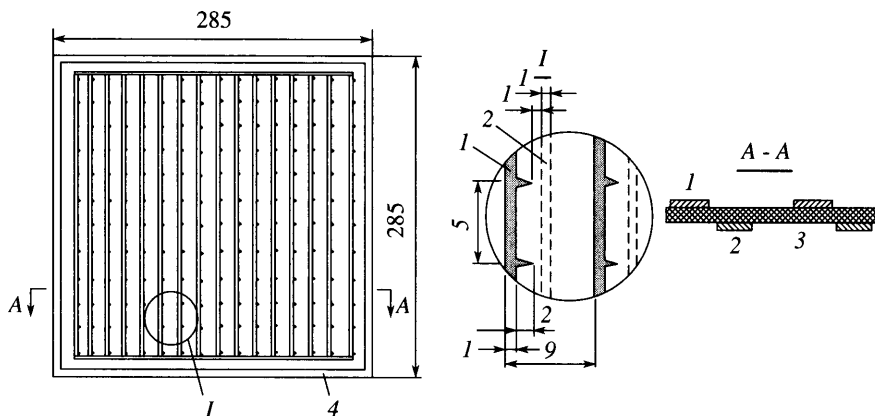
Приповерхностные разряды рассматриваются как один из возможных способов управления течением в пограничном слое [1, 2]. В этом направлении проводились [2, 3] и проводятся [4–7] исследования в классических аэродинамических трубах при атмосферном давлении. Наряду с экспериментами, в которых для электрогазодинамического способа управления течениями используются униполярные коронные разряды с характерными концентрациями заряженных частиц 10^8 – 10^9 см⁻³, ведутся аналогичные исследования с использованием приповерхностных емкостных частотных разрядов, получивших в литературе название диэлектрических барьерных [8]. В них пиковые значения концентрации заряженных частиц могут иметь более высокие значения. Диэлектрический промежуток, разделяющий электроды при создании разряда по такой схеме, играет роль большого по величине реактивного сопротивления, при котором не возникает явление контракции тока и перехода разряда в искровой [5, 8].

Для практических целей как униполярные, так и емкостные разряды предполагается использовать в основном на высотах 10–18 км, где статическое давление лежит в диапазоне 200–50 Тор, т.е. существенно ниже нормального атмосферного. Это означает, что в натуральных условиях пристеночные разряды могут иметь тип, существенно отличающийся от того, который реализуется при атмосферном давлении. В проведенной работе необходимость исследований при реальных давлениях была показана на примере изучения зависимости от статического давления импульса течения газа, возникающего над пластиной под действием емкостного разряда, и соответствующей реактивной силы.

1. Методика эксперимента и полученные результаты. Эксперименты были выполнены на модели в виде плоской пластины размером 285 × 285 мм, изготовленной из фольгированного фторопласта, которая устанавливалась на аэродинамических весах в вакуумной камере диаметром 1 м и длиной 2.2 м. Эксперименты были проведены в диапазоне давлений 750–200 Тор. Более низкие давления не были реализованы из-за появления пробойных явлений между электродами модели. На фиг. 1 показана схема подключения модели к высоковольтной цепи генератора электрических импульсов и индуцируемого разрядом течения газа над пластиной. Электроды модели выполнялись путем электро-



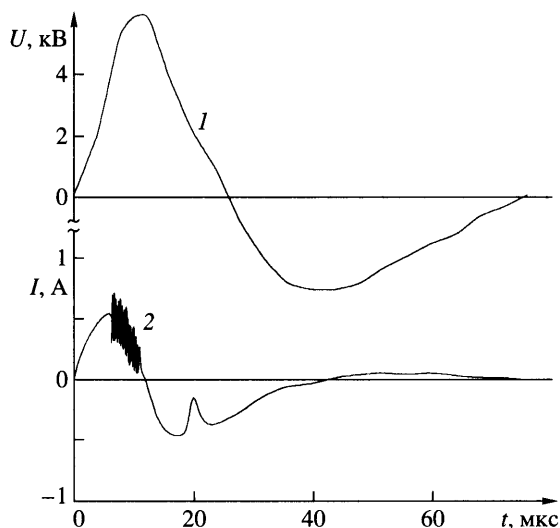
Фиг. 1. Схема эксперимента: $U(t)$ – форма сигнала на выходе генератора высоковольтных импульсов, u – скорость нейтрального потока, индуцированного разрядом, F – индуцированная сила, действующая на модель



Фиг. 2. Фрагмент конструкции модели: 1 – верхний, 2 – нижний электроды, 3 – диэлектрик, 4 – металлическая окантовка

литического травления нанесенного на фторопластовую пластину покрытия из меди толщиной 0.05 мм. На обтекаемой стороне пластины электроды (фиг. 2) имели форму полос шириной 1 мм. Одна сторона полос имела зубчатую форму с остроконечными расположенными тангенциально к пластине треугольными выступами высотой 2 мм. Общее число полос было равно 27, шаг полос 9 мм, расстояние между вершинами острий 5 мм. Такая конструкция модели была предназначена для обеспечения надежного зажигания разрядов в ряде экспериментов, в которых могли применяться различные по номиналам и частоте источники напряжения.

Электроды на нижней стороне пластины были выполнены в виде полос шириной 1 мм, параллельных полосам верхней стороны. Край каждой полосы на нижней стороне был смещен относительно выступов на 1.0 мм для создания продольной компоненты электрического поля. По периферии на рабочей поверхности модели имелась полоса шириной 3 мм, которая находилась под тем же потенциалом, что и потенциал нижних электродов для замыкания поля на пластине. Эта полоса была отделена от последней полосы верхнего электрода охранной диэлектрической зоной шириной 15 мм. Пластина жестко монтировалась на плоском основании из органического стекла.



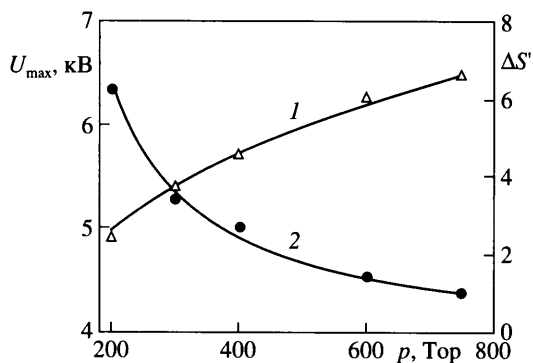
Фиг. 3. Осциллограммы импульсов напряжения (1) и тока (2) ($p = 400 \text{ Тор}$)

Весы с пластиной устанавливались в вакуумной камере таким образом, чтобы минимизировать электростатическое взаимодействие плавающего элемента весов с расположенными вблизи деталями корпуса камеры. Отсутствие электростатических эффектов контролировалось по сохранению показаний весов при подаче напряжения между электродами пластины до 3 кВ от стабилизированного источника напряжения.

Питание разряда осуществлялось от генератора высоковольтных импульсов, который обеспечивал последовательность импульсов частотой 5 кГц и амплитудой до 7 кВ. Компьютерные осциллограммы импульсов напряжения и тока приведены на фиг. 3. Наличие емкостного разряда фиксировалось на осциллограмме тока как область высокочастотного шума, который отсутствовал, если напряжение между электродами было ниже напряжения зажигания (фиг. 3). Резкий максимум на отрицательной полуволне осциллограммы тока соответствовал моментам разрыва первичной цепи генератора, которые производились транзисторным ключом. Средняя мощность, подведенная к системе электродов, определялась путем интегрирования произведений $U(t)I(t)\tau$, рассчитанных по осциллограммам, аналогичным показанным на фиг. 3, в интервале от $t = 0$ до момента указанного скачка тока и последующего осреднения полученного результата за период. Такая методика расчета предполагала, что на остальном интервале времени подведенная мощность диссипирует в системе, но не используется для создания разряда. В этих обработках величина τ была равна 1 или 2 мкс.

Эксперименты проводились при амплитудном значении положительной полуволны тока, равном 0.5 А, которое соответствовало оптимальным условиям работы генератора. Это значение устанавливалось по осциллограмме тока на экране осциллографа. Определенная в результате обработки осциллограмм величина средней мощности, выделяемой во вторичной цепи генератора при горении разряда, составляла около 30 Вт.

Действие разряда на пластину определялось по разнице показаний весов на небольшом интервале времени сразу после включения разряда, в начале которого отклонение весов происходило практически скачком, а затем устанавливалось на определенном уровне. Одновременно фиксировались осциллограммы напряжения и тока. Анализ их перестройки при уменьшении давления позволил объяснить зарегистрированный эффект изменения реактивной силы.



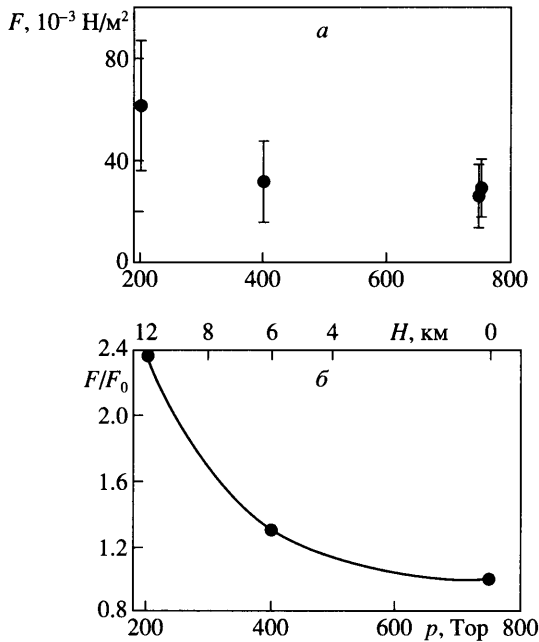
Фиг. 4. Зависимость напряжения на разряде $U(p)$ (1) и относительной площади, занимаемой плазмой на поверхности диэлектрика $\Delta S' = \Delta S_0 / \Delta S$ (2), от статического давления p (линии – аппроксимация)

Как показал анализ осциллограмм, при такой схеме эксперимента с уменьшением давления происходит некоторое уменьшение амплитуды напряжения на пластине (фиг. 4). Данная зависимость может быть аппроксимирована функцией $(p/p_0)^{1/5}$, где p – текущее давление, p_0 – нормальное атмосферное давление. Визуальное наблюдение картины свечения разряда свидетельствовало о том, что площадь светового пятна около каждого острия увеличивалась с уменьшением давления. Анализ осциллограмм тока при разных давлениях показал, что при снижении давления имеется тенденция к увеличению разности амплитуд положительной и отрицательной полуволн. Можно предположить, что этот эффект обусловлен влиянием слоя плазмы как дополнительной проводящей поверхности, которая возникала на положительной полуволне реактивного тока и отсутствовала на отрицательной полуволне. Наличие этого слоя на диэлектрике увеличивало емкость модели и, как следствие, реактивный ток. При этом предположении разность амплитуд тока, о которой упоминалось выше, пропорциональна площади слоя ΔS . В относительных единицах зависимость $\Delta S'$ от давления аппроксимируется функцией $(p_0/p)^{7/5}$ (фиг. 4).

На фиг. 5, а приведены результаты измерений силы при различных значениях статических давлений в камере в расчете на 1 м^2 поверхности. По оси абсцисс нанесены также соответствующие значения высоты, рассчитанные по данным о плотности воздуха в камере по таблице параметров стандартной атмосферы. Фигура 5, б, где за базовое значение взята сила, зарегистрированная при атмосферном давлении, отчетливо иллюстрирует увеличение эффекта при снижении давления.

2. Обсуждение результатов. Как сам факт возникновения результирующего импульса на пластине, так и его увеличение при уменьшении давления не являются очевидными. Действительно, результирующий импульс, полученный пластиной вследствие возникновения рассматриваемого разряда, является векторной суммой импульсов от положительных ионов и отрицательно заряженных частиц (отрицательных ионов и электронов), которые образуются в разряде. Силы, действующие между отдельным верхним электродом, имеющим положительный потенциал, и отрицательно заряженными частицами, являясь внутренними силами в системе, не могут привести пластину в движение относительно начального положения, поскольку после прихода этих частиц на электрод положение равновесия будет восстановлено.

Можно указать два механизма, вследствие которых пластина смещается из-за взаимодействия положительных ионов и электрического поля между верхними и нижними электродами. Первый из них малоэффективен и связан с возможностью ухода на беско-



Фиг. 5. Зависимость абсолютной (а) и относительной (б) величин силы, действующей со стороны разряда на пластину, от статического давления

нечность ионов, которые образуются около полосы, находящейся на краю пластины. Другой, как представляется, основной механизм состоит в том, что положительные ионы, получающие импульс от электрического поля, становятся быстрыми нейтральными молекулами вследствие эффектов резонансной и нерезонансной перезарядки, а вместо них возникают медленные ионы, которые имеют низкую температуру и не покидают пластину.

Механизм перезарядки в отличие от упругих столкновений более эффективен потому, что возникающие быстрые молекулы имеют практически тот же импульс, что и первоначальные ионы. Кроме того, эффективное сечение резонансной перезарядки больше, чем сечение упругих столкновений [9]. Согласно экспериментальным данным [9, 10], сечение перезарядки σ для молекулярных ионов кислорода (а именно эти ионы в основном образуются в разряде) при энергии $eU \sim 1$ кэВ составляет $(1-1.5) \cdot 10^{-15}$ см², поэтому средняя длина свободного пробега ионов до перезарядки при $p \approx 750$ Торр оказывается примерно $(1.2-2) \cdot 10^{-4}$ см. Для молекулярных ионов азота $\sigma \approx (2-3) \cdot 10^{-15}$ см² и $\lambda \approx 2 \cdot 10^{-5}$ см. При $p \approx 80$ Торр средняя длина свободного пробега до перезарядки хотя и становится на порядок больше, но остается много меньше, чем расстояние между соседними полосами, поэтому для всего диапазона давлений, представляющих интерес для аэродинамических приложений, второй механизм обмена импульсом между положительными ионами и пластиной является основным. Резонансная перезарядка имеет место также и для отрицательных молекулярных ионов кислорода [10].

Перезарядкой объясняется то, что над поверхностью пластины возникает нейтральный поток, скорость которого практически постоянна по длине пластины: он образуется из-за локальных эффектов, которые действуют независимо у каждой полосы.

Оценочный анализ показывает, что увеличение силы, действовавшей на пластину со стороны потока, при уменьшении статического давления было связано в условиях эксперимента с увеличением общего числа ионов в разряде, которые передают свой им-

пульс нейтральным молекулам, а последние – пластине. Рассмотрим эффект на примере одной пары электродов. В одномерном приближении величина этой силы f в расчете на единицу длины электрода равна

$$f = e \int_0^{l_d} n_p E(l) \Delta S dl \quad (2.1)$$

где e – заряд иона, ось l совпадает с вектором напряженности поля E , ΔS – площадь разряда, нормаль к которой совпадает с осью l , l_d – длина разряда по оси l . Интеграл берется по линии тока. В условиях квазинейтральности $\text{div } E = 0$. В одномерном приближении $E = \text{const}$, $\Delta S = \text{const}$, и для двух различных давлений

$$\frac{f_2}{f_1} \cong \frac{N_{p2} \langle E_2 \rangle}{N_{p1} \langle E_1 \rangle} \quad (2.2)$$

где N_p – общее число ионов одного знака около электрода.

Сравним для примера результаты, полученные при давлениях 750 и 200 Тор. Для оценки эффективной напряженности поля воспользуемся средним за четверть периода значением напряжения, так как форма сигнала на этом временном интервале близка к синусоиде: $\langle U \rangle \approx (2/\pi)U_0$, где U_0 – амплитудное значение напряжения. В первом случае $U_{01} = 6.5$ кВ. Длина разряда по визуальным наблюдениям $l_{d1} \approx 2$ мм, поэтому $\langle E \rangle$ составляла примерно 20.7 кВ/см. При давлении $p_2 = 200$ Тор, согласно полученным осциллограммам, $U_{02} \cong 5$ кВ, а длина разряда, по визуальным наблюдениям, была равна приблизительно 5–6 мм, поэтому $\langle E \rangle_2 \approx 5.8$ кВ/см. Так как отношение $f_2/f_1 \approx 2.4$, из (2.2) следует, что $N_{p2}/N_{p1} \cong 9$. Этот эффект связан с увеличением объема плазмы перед электродом. В то же время более детальные оценки на основе кинетики процессов и следствий, вытекающих из зависимостей, приведенных на фиг. 4, показали, что концентрация ионов уменьшалась при снижении давления.

Заключение. Для условий проведенных экспериментов зафиксирована существенная роль величины статического давления в эффекте силового воздействия течения, индуцированного приповерхностным емкостным разрядом, на пластину, на которой возбуждался разряд. При уменьшении статического давления до значений, соответствующих реальным условиям полета (200 Тор), и сохранении мощности разряда эта сила возрастала более чем в 2 раза. Указанный эффект обусловлен значительным ростом площади, занимаемой плазмой разряда около электродов, что приводит к увеличению общего числа ионов и, как следствие этого, импульса нейтрального потока, несмотря на снижение концентрации ионов. Важную роль в формировании результирующего течения нейтрального газа, возбуждаемого приповерхностным разрядом, играют эффекты перезарядки ионов, ускоренных электрическим полем, на молекулах пристеночного слоя воздуха.

Авторы благодарят А.П. Курячего за полезное обсуждение результатов работы и Н.В. Ростова за предоставление для экспериментов генератора высоковольтных импульсов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (№ 04-01-00228) и Государственной программы поддержки ведущих научных школ (грант НШ-1984.2003.1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Казаков А.В., Курячий А.П. Оценка эффективности электрогазодинамического метода уменьшения аэродинамического сопротивления // Изв. РАН. МЖГ. 2001. № 2. С. 76–84.

2. Мхитарян А.М., Лабинов С.Д., Фридланд В.Я. Электрогидродинамический метод управления пограничным слоем // Некоторые вопросы аэродинамики и электрогидродинамики. Киевск. ин-т инженеров гражд. авиации. 1964. Вып. 1. С. 3–14.
3. Мхитарян А.М., Боярский Г.Н., Ударцев Е.П., Голего А.Н. Исследование пристенной электрогидродинамической струи // Некоторые вопросы аэродинамики и электрогидродинамики. Киевск. ин-т инженеров гражд. авиации. 1970. Вып. 6. С. 92–98.
4. Roth J.R., Sherman D.M., Wilkinson S.P. Electrohydrodynamic flow control with a glow discharge surface plasma // AIAA Journal. 2000. V. 38. № 7. P. 1166–1172.
5. Roth J.R., Sherman D.M., Wilkinson S.P. Boundary layer flow control with one atmospheric uniform glow discharge plasma // AIAA Paper. 1998. № 98–2957.
6. Roth J.R., Madhan R. Ch. M., Yadav M., Rahel J., Wilkinson S.P. Flow field measurements of paraelectric, peristaltic and combined plasma actuators based on one atmosphere uniform glow discharge plasma // AIAA Paper. 2004–845.
7. Коган М.Н., Макашев Н.К., Скворцов В.В., Кузнецов Ю.Е., Иванов В.В., Шумилкин В.Г. Исследование перспектив использования электрических разрядов для снижения аэродинамического сопротивления и управления аэродинамическими течениями // ЦАГИ – основные этапы научной деятельности. М.: Физматлит, 2003. С. 457–459.
8. Massines F., Ben G.R., Rabehi A., Decomps Ph., Segur P., Mayoux Ch. Experimental and theoretical study of a glow discharge at atmospheric pressure flow controlled by dielectric barrier // J. Appl. Phys. 1998. V. 83. № 6. P. 2950–2957.
9. Лозанский Э.Д., Фирсов О.Б. Теория искры. М.: Атомиздат, 1975. 271 с.
10. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1987. 591 с.

Москва

Поступила в редакцию
25.III.2005