

Общероссийский математический портал

В. А. Битюрин, А. Н. Бочаров, Н. А. Попов, Высокочастотный разряд  
над диэлектрической поверхностью,  
*ТВТ*, 2011, том 49, выпуск 5, 785–788

<https://www.mathnet.ru/tvt545>

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением  
<https://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 18.97.14.83

21 мая 2025 г., 20:23:57



## ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ РАЗРЯД НАД ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

© 2011 г. В. А. Битюрин, А. Н. Бочаров, Н. А. Попов

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

E-mail: bocharov@ihed.ras.ru

Поступило в редакцию 15.11.2010 г.

Одним из интересных и перспективных способов создания плазмы в газовых потоках является генерация плазмы с помощью высокочастотного генератора (ВЧ-генератора), работающего на частотах от сотен килогерц до мегагерц. Особенность ВЧ-генератора заключается в наличии лишь одного электрода, который может быть расположен внутри тела и может не иметь прямого контакта со средой. Роль ответного электрода выполняет окружающая среда, включающая, вообще говоря, и элементы установки.

С точки зрения воздействия на поток влияние разряда проявляется в основном в нагреве газа. Однако не следует исключать и заметного локального нетеплового воздействия разряда на течение в областях высоких значений электрического поля. Имеется в виду действие электростатической силы в слое объемного заряда, главным образом вблизи поверхности катода. В любом случае простейшие газодинамические модели течения, в которых влияние разряда моделируется заданием плотности энерговыделения и плотности силы, могут оказаться недостаточными. Причина заключается в том, что термодинамическое состояние плазмы и ее переносные свойства, определяющие протекание электрического тока, являются скорее функциями амплитуды электрического поля, а не давления и температуры, как в случае равновесных течений. При учете электрических сил в катодных слоях следует принимать во внимание и направление поля. Таким образом, моделирование ВЧ-разряда и его влияния на поток требует совместного описания и поля течения, и электродинамики, и характеристик плазмы.

В данной работе рассматривается физическая и математическая постановка задачи о ВЧ-разряде в потоке газа, основанная на совместном решении уравнений Навье–Стокса для нейтрального газа и переноса заряженных частиц, ионов и электронов, в рамках диффузионно-дрейфового приближения [1–3]. Схожая по постановке задача была недавно рассмотрена в [4]. Особое внимание уделяется постановке граничных условий на электродных поверхностях в условиях переменного электрического поля, а также постановке граничных условий на диэлектрических поверхностях, где возможно накопление заряда разного знака. Модель кинетики плазмы, учитывающая наиболее важные процессы

ионизации и рекомбинации заряженных частиц, а также доля энергии электронного газа, передаваемая нейтральному газу, рассчитываются на основе аппроксимаций, полученных решением уравнения Больцмана в так называемом двухчленном приближении [3].

Разработанная численная модель была применена для исследования ВЧ-разряда в потоке воздуха вокруг модели, представляющей сферически затупленный конус (рис. 1). Моделировались условия эксперимента [5], в которых разряд создавался приложением переменного напряжения частотой 500 кГц между ведущим металлическим электродом (ВЧ-электрод) и землей. Заземленным электродом считается металлический цилиндр внутри диэлектрической модели. Относительная диэлектрическая проницаемость материала диэлектрика предполагается равной пяти.

В данной работе используется модификация базовой модели [2, 3], связанная с аппроксимацией кинетики воздушной плазмы, трактовкой диэлектрических поверхностей и описанием внешней цепи, включающей источник переменного напряжения.

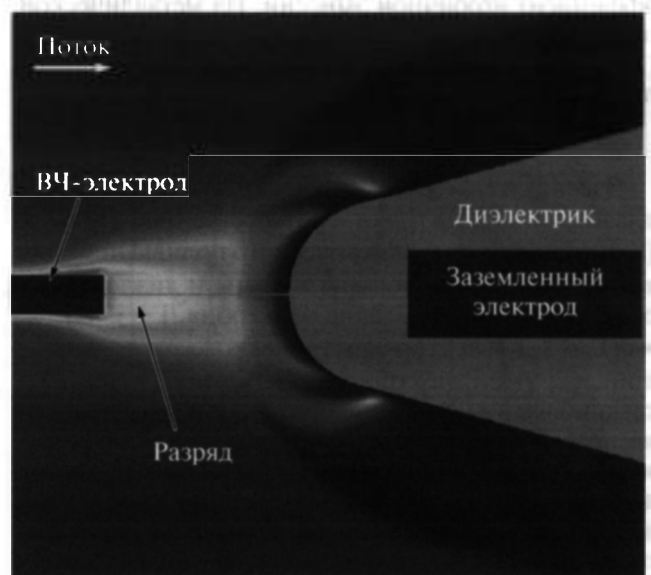


Рис. 1. Схема ВЧ-разряда в потоке вокруг тела с диэлектрическим покрытием.

Модификация базовой модели включает аппроксимацию скоростей ионизации и рекомбинации и источника члена, описывающего энерговклад от электронного тока. Последний аппроксимировался с учетом модели “быстрого нагрева” [3, 6], учитывающей повышенную скорость передачи энергии нейтральному газу при наличии диссоциации кислорода.

Граничные условия для концентраций и электрического потенциала ставились следующим образом. На оси симметрии задавались нулевые градиенты для всех переменных. На выходных участках границы также задавались нулевые градиенты для концентраций и потенциала. На электродных и диэлектрических участках тип граничных условий определялся в соответствии с режимом работы электродного участка. Если электрическое поле на поверхности направлено от электрода, данный участок считается анодом. В противоположном случае — катодом. В случае анода задавалась нулевая концентрация ионов, нулевой нормальный градиент электронной плотности. Граничные условия для потенциала определялись в зависимости от того, металлическая (ВЧ-электрод) или диэлектрическая поверхность модели рассматривается. На металлической поверхности задавался потенциал в виде

$$\varphi_{\text{HF}} = U(t) = U_0 \sin(2\pi\nu t), \quad (4)$$

где  $t$  — время,  $U_0$  — амплитуда напряжения,  $\nu$  — частота.

В случае катода граничные условия ставились следующим образом. Для ионной концентрации использовалось равенство нулю нормального градиента. Для определения электронной концентрации задавалось условие  $(\Gamma_e \cdot \eta) = -\gamma_e(\Gamma_i \cdot \eta)$ , где  $\Gamma_e$  и  $\Gamma_i$  — потоки электронов и ионов соответственно,  $\eta$  — единичный вектор нормали к поверхности,  $\gamma_e$  — коэффициент вторичной эмиссии. На металлической поверхности потенциал задается в соответствии с (1). В случае диэлектрической поверхности ставилось условие

$$\varepsilon_p(\mathbf{E}_p \cdot \eta) - \varepsilon_D(\mathbf{E}_D \cdot \eta) + (1/q) \int \mathbf{j} \cdot \eta dt = 0. \quad (5)$$

Здесь  $\varepsilon_p$  и  $\varepsilon_D$  — диэлектрические проницаемости плазмы и диэлектрика соответственно,  $(\mathbf{E}_p \cdot \eta)$  и  $(\mathbf{E}_D \cdot \eta)$  — проекции электрического поля на нормаль к поверхности со стороны плазмы и диэлектрика соответственно,  $q$  — заряд электрона,  $\mathbf{j} = \mathbf{j}_i + \mathbf{j}_e$ ,  $= q(\Gamma_i - \Gamma_e)$  — вектор электрического тока, являющийся суммой электронного и ионного токов. Последний член в (2) представляет аккумуляцию заряда на поверхности, обусловленную потоком заряженных частиц. Вообще говоря, уравнение Пуассона должно решаться во всей области, при этом внутри диэлектрика плотность заряда равна нулю, а условие сопряжения поля на границе плазма—диэлектрик (2) должно использоваться для сшивки потенциала в двух областях. В данной работе используем приближенное условие сопряжения, позволяющее каче-

ственно учесть и аккумуляцию заряда, и разрыв поля на поверхности диэлектрика. А именно, считаем, что в линейном приближении поле внутри диэлектрика линейно:  $(\mathbf{E}_D \cdot \eta) = -(\varphi_D - \varphi_G)/\Delta$ . Здесь  $\varphi_D$  — значение потенциала на поверхности;  $\varphi_G$  — потенциал заземленного электрода, встроенного в диэлектрик,  $\varphi_G = 0$ ;  $\Delta$  — характерная толщина диэлектрика, которая в принципе является переменной.

В [3, 5] исследовалась возможность управления обтеканием затупленного тела с помощью ВЧ-разряда. В постановке, близкой к экспериментальным условиям, рассмотрим течение вокруг конического тела со сферической насадкой, покрытого диэлектриком (справа на рис. 1). Радиус сферы равен 5 мм, диаметр ВЧ-электрода (слева на рис. 1) — 1 мм, расстояние между электродом и лобовой точкой сферы — 9 мм. Поток натекает на модель слева направо со скоростью 100 м/с, давление — 1 атм, температура газа в невозмущенном потоке — 300 К. Целью моделирования являлись оценка параметров плазмы в зоне разряда, геометрии разряда, оценка динамического воздействия ВЧ-разряда в прикатодных областях, оценка влияния диэлектрического покрытия на характеристики разряда. Рассматривался разряд с частотой  $\nu = 500$  кГц и амплитудой напряжения на тестовом электроде  $U_0 = 30$  кВ. Считалось, что внутри диэлектрического тела находится заземленный массивный металлический стержень.

На рис. 2 показаны фрагменты эволюции разряда, полученные на 31-м ВЧ-цикле, т.е. в режиме достаточно хорошо установившегося разряда. Более подробно эволюция разряда представлена в [3]. В анодной стадии режима работы ВЧ-электрода часть диэлектрика вблизи лобовой точки работает как катод. На верхних рисунках хорошо виден весьма толстый катодный слой перед лобовой частью диэлектрической модели. Представленный фрагмент соответствует моменту “пробоя” катодного слоя и переходу разряда в новую стадию. Эта стадия характеризуется наличием “плазменного языка” на конической части. И его размеры, и концентрация плазмы в нем периодически меняются. Примечательно то, что он не исчезает полностью. В то же время расчеты, в которых поверхность модели считалась металлической, показывали, что предпочтительная геометрия разряда — это разряд между ВЧ-электродом и лобовой частью сферы. Нечто похожее наблюдалось и в экспериментах [5]. Когда поверхность модели была металлической, разряд выглядел как хаотический набор отдельных разрядных нитей, непрерывно возникающих и исчезающих в промежутке между ВЧ-электродом и преимущественно лобовой частью сферы. В случае диэлектрической поверхности разряд выглядел однородно обволакивающим модель. Численное моделирование объясняет, что аккумуляция заряда на диэлектрике существенно перераспределяет электрическое

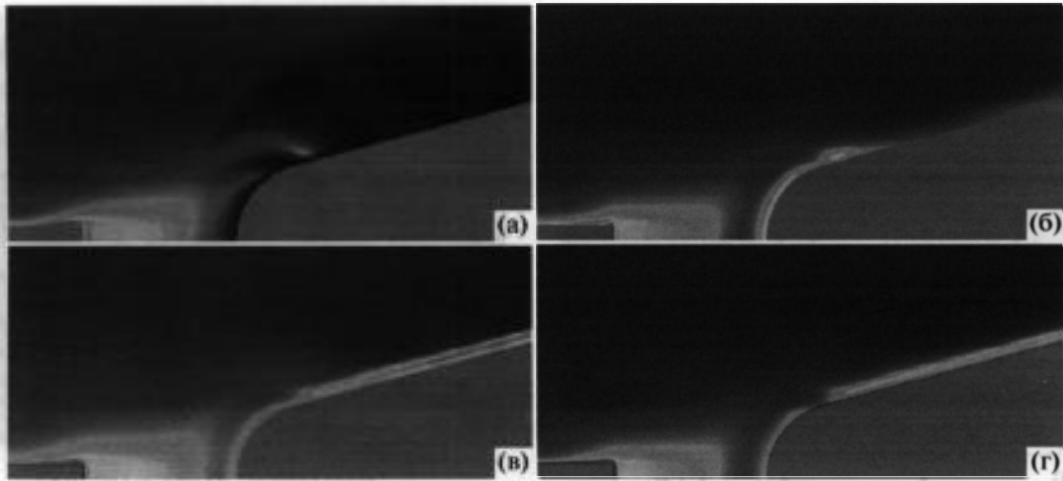


Рис. 2. Фрагменты эволюции концентрации электронов (а), (в) и ионов (б), (г) в течение ВЧ-цикла;  $n_e^{\max} = 2 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ,  $n_i^{\max} = 3 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ; (а), (б) – фазовый угол  $\phi = 72^\circ$  (анодный режим ВЧ-электрода); (в), (г) –  $\phi = 288^\circ$  (катодный режим ВЧ-электрода).

поле. Так что разряд над диэлектриком поддерживается не только напряжением между ВЧ- электродом и моделью (со средним потенциалом поверхности), но и полем с компонентой вдоль поверхности.

На рис. 3 показаны полный ток на ВЧ-электрод и полный ток на поверхность диэлектрика. Отметим, что амплитуды токов не совпадают. Причина заключается в том, что часть диэлектрика работает, например, как катод (электроны уходят от поверхности), в то время как остальная часть может работать как анод, т.е. часть тока (главным образом, электронного) перетекает из одной части диэлектрика в другую. Рис. 4 показывает, что в потоке действует средняя сила, направленная вдоль потока, точнее – к ди-

электрику. Это означает, что в среднем плазма положительно заряжена. Средняя по периоду продольная сила обусловлена в основном наличием катодного слоя вблизи модели. Вертикальная компонента силы приведена здесь для демонстрации заряженности плазмы. Полная вертикальная сила равна, естественно, нулю.

Приведенные результаты получены при некотором предположении, связанном с необходимостью разрешать как высокие частоты процессов, обусловленные ВЧ-разрядом ( $\tau_{\text{вч}} \sim 10^{-6} \text{ с}$ ), так и газодинамические ( $\tau_{\text{гд}} \sim 10^{-3} \text{ с}$ ). Ясно, что интегрирование полной системы уравнений в таких условиях практиче-

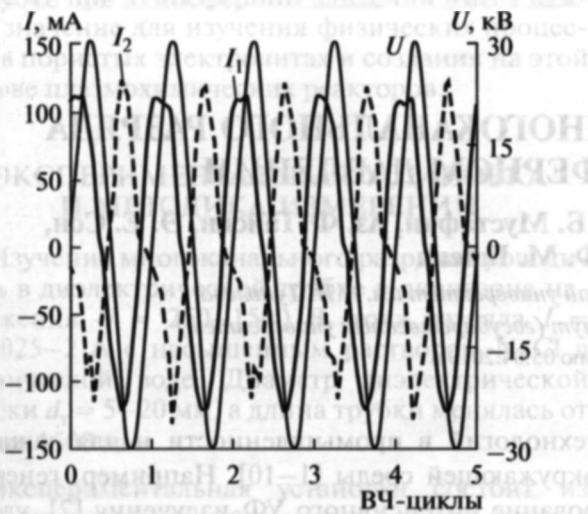


Рис. 3. Напряжение на ВЧ-электроде  $U$ , ток на ВЧ-электрод  $I_1$ , ток на поверхность диэлектрика  $I_2$ . Длительность ВЧ-цикла – 2 мкс.

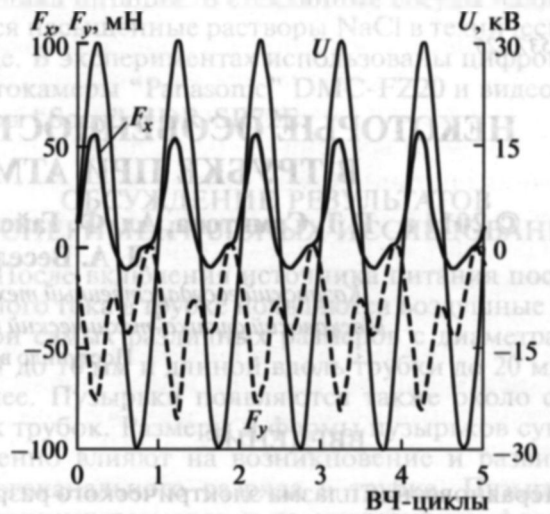


Рис. 4. Напряжение на ВЧ-электроде  $U$ ;  $F_x$  и  $F_y$  – компоненты силы.

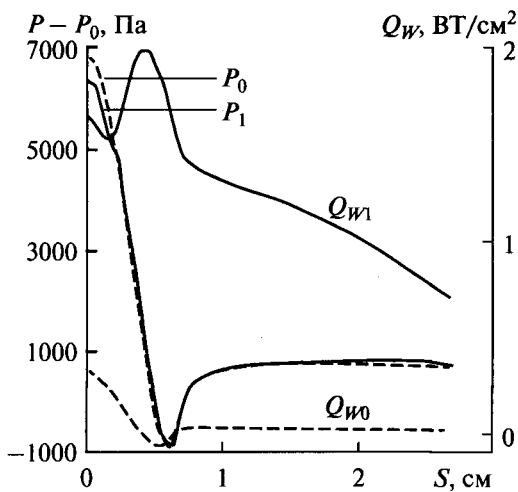


Рис. 5. Распределение давления  $P - P^*$  и теплового потока  $Q_w$  по поверхности модели без разряда ( $P_0, Q_{w0}$ ) и с разрядом ( $P_1, Q_{w1}$ );  $P^* = 10^5$  Па.

ски не реально. Для оценки влияния ВЧ-разряда на характеристики течения применена следующая процедура. Полная система уравнений интегрируется на протяжении одного или нескольких ВЧ-циклов. При этом в каждой точке пространства формируется источниковый член в уравнении Навье—Стокса (электростатическая сила и тепловыделение), имеющий смысл среднего по периоду (или нескольким периодам). Далее поле течения (без уравнений для плазмы) рассчитывается с этим средним источником на интервале времени порядка  $\tau_{\text{ид}}$ . Затем вновь решается полная система уравнений на одном или нескольких ВЧ-циклах и вновь рассчитывается только поле течения с осреднен-

ным источником. Такая процедура позволяет учесть не только влияние ВЧ-разряда на течение, но и изменение свойств разряда, обусловленное изменением характеристик течения, главным образом плотности и температуры газа. Все представленные результаты получены с применением такой процедуры после пяти циклов осреднения. При этом система поток + плазма считалась в течение 5 ВЧ-циклов, а система “осредненный поток” — в течение 500 ВЧ-циклов. На рис. 5 представлены некоторые характеристики, демонстрирующие влияние разряда на обтекание диэлектрической модели (рассматривалась изотермическая стенка с температурой  $T_w = 300$  К).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Райзер Ю.П., Суржиков С.Т. Математическое моделирование самостоятельного тлеющего разряда в двумерной постановке. Препринт № 304. М.: ИПМех АН СССР, 1987. 40 с.
2. Битюрин В.А., Бочаров А.Н., Попов Н.А. Численное моделирование электрического разряда в сверхзвуковом потоке // Изв. РАН. МЖГ. 2008. № 4. С. 161.
3. Bityurin V., Bocharov A., Klimov A., Moralev I., Tolkunov B. Surface HF Plasma Actuator in Airflow // AIAA Paper 2009-4073. 2009.
4. Суржиков С.Т. Квазистационарный высокочастотный емкостной тлеющий в поперечном магнитном поле разряд // ТВТ. 2010. Т. 48. № 1 (доп.). С. 102.
5. Klimov A., Bityurin V., Moralev I., Tolkunov B., Zhirnov K., Kutlaliyev V. Surface HF Plasma Aerodynamic Actuator // AIAA 2008-1411.
6. Popov N.A. Investigation of the Mechanism for Rapid Heating of Nitrogen and Air in Gas Discharges // Plasma Phys. Rep. 2001. V. 27. № 10. P. 886.

УДК 537.525

## НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ МНОГОКАНАЛЬНОГО РАЗРЯДА В ТРУБКЕ ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ

© 2011 г. Г. Т. Самитова, Ал. Ф. Гайсин, Т. Б. Мустафин, Аз. Ф. Гайсин, Э. Е. Сон, Д. А. Весельев, Ф. М. Гайсин

Казанский государственный технический университет им. А.Н. Туполева  
Московский физико-технический институт (государственный университет)

Поступило в редакцию 05.04.2010 г.

### ВВЕДЕНИЕ

Неравновесная плазма электрического разряда при атмосферном давлении с жидкими электродами привлекает внимание исследователей ввиду довольно широкого применения таких разрядов в медицине, использования для новых

технологий в промышленности и для защиты окружающей среды [1–10]. Например, генерирование интенсивного УФ-излучения [2], ударных волн и активных радикалов делает многоканальный разряд (МР) пригодным для стерилизации и очистки поверхностей. Исследование МР