

04:09;12

## Механизмы распространения поверхностного сверхвысокочастотного разряда

© В.М. Шибков, С.А. Двинин, А.П. Ершов, Л.В. Шибкова

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
119992 Москва, Россия  
e-mail: shibkov@ph-elec.phys.msu.ru

(Поступило в Редакцию 22 июня 2004 г.)

Исследован микроволновый разряд на внешней поверхности диэлектрического тела. Экспериментально показано, что скорость распространения сверхвысокочастотного разряда вдоль поверхности диэлектрической антенны максимальна в начальной стадии импульса и растет с увеличением подводимой мощности. Волна пробоя определяет скорость распространения поверхностного разряда в первые моменты его возникновения ( $t = 1-3 \mu\text{s}$ ). Амбиполярная диффузия ответственна за механизм распространения разряда в стадии его развития ( $t = 3-100 \mu\text{s}$ ), тогда как механизм медленного горения возможен только на стационарной стадии существования разряда ( $t > 100 \mu\text{s}$ ). Электрическое поле локализовано в тонком приповерхностном слое толщиной  $\sim 1 \text{ mm}$ . Большое значение приведенного электрического поля  $E/n = 100-500 \text{ Td}$  ведет к эффективному вкладу энергии в плазму, т. е. к быстрому нагреву газа и эффективной наработке активных и заряженных частиц, что важно для использования данного типа разряда в сверхзвуковой аэродинамике.

### Введение

В работах [1-3] рассмотрен новый тип сверхвысокочастотного (СВЧ) разряда, создаваемого на диэлектрических телах поверхностной волной. Он представляет собой самосогласованную систему в виде плазменного волновода, по которому распространяется поверхностная волна, которая его же и создает, т. е. для существования поверхностной волны необходима плазменная среда, создаваемая самой поверхностной волной. При этом в широком диапазоне энергий и частот электромагнитного излучения можно получать плазменную область значительной протяженности и формы. Особенностью такого разряда являются возможность создания плазмы большого размера и принципиально высокая концентрация заряженных частиц, обусловленная тем, что разряд может существовать только при концентрациях электронов  $n_e$ , больших, чем критическая  $n_{cr}$ . Данный тип разряда был предложен в [4,5] для создания плазмы в сверхзвуковом потоке воздуха. Однако прежде чем применять данный тип разряда в плазменной аэродинамике, необходимо было в первую очередь выявить область внешних параметров (давление газа, подводимая к разряду энергия, длительность микроволнового импульса), в которой возможно существование поверхностного сверхвысокочастотного разряда. В [6] было показано, что скорость распространения поверхностного разряда в широком диапазоне условий превышает скорость звука в воздухе. Однако не выясненным остался механизм распространения разряда вдоль антенны. Известно [7-10], что распространение переднего фронта СВЧ разряда могут обеспечивать различные механизмы. При изменении режима создания разряда и условий его существования основными механизмами могут являться „волна пробоя“, амбиполярная диффузия, фотоионизация, тепло-

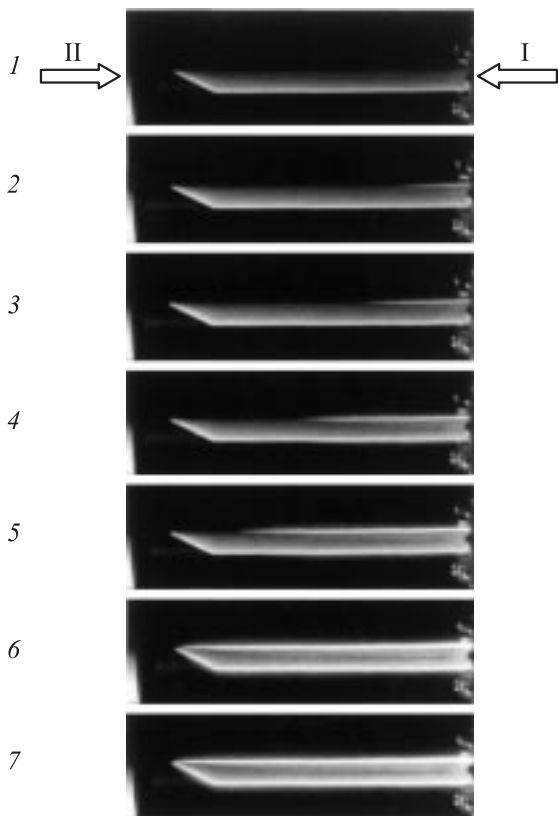
проводность (режим медленного горения), электронная теплопроводность и др. Основной целью данной работы является определение в зависимости от давления и подводимой мощности скорости распространения фронта поверхностного сверхвысокочастотного разряда вдоль антенны и выявление механизмов, ответственных за его распространение.

### Экспериментальные результаты

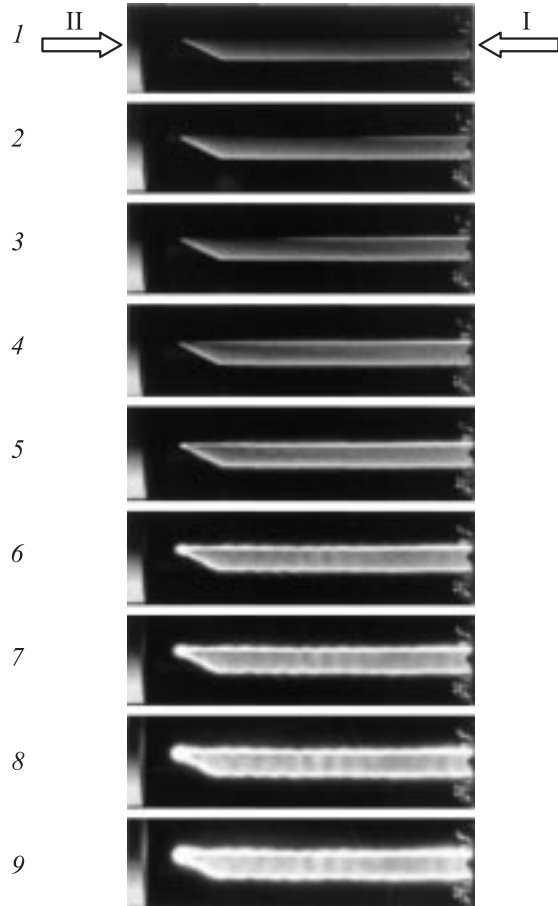
Экспериментальная установка, на которой исследовался поверхностный сверхвысокочастотный разряд, и применяемые методы диагностики описаны в [6]. В качестве источника СВЧ энергии использовался импульсный магнетронный генератор сантиметрового диапазона длин волн. Магнетронный генератор мог работать либо в разовом режиме, либо в режиме частых посылок. Он имел следующие характеристики: длина волны  $\lambda = 2.4 \text{ cm}$ , отдаваемая в тракт импульсная СВЧ мощность  $W < 300 \text{ kW}$ , длительность импульса могла плавно изменяться в пределах  $\tau = 1-200 \mu\text{s}$ , скважность в режиме повторяющихся импульсов  $Q = 1000$ , при этом средняя мощность не превышает  $300 \text{ W}$ . Вакуумная система позволяла проводить интересные исследования в широком диапазоне давлений воздуха от  $10^{-3}$  до  $10^3 \text{ Torr}$ . Разряд создавался на диэлектрической антенне, помещенной в цилиндрическую барокамеру диаметром  $1 \text{ m}$  и длиной  $3 \text{ m}$ . СВЧ энергия поступала в разрядную камеру по волноводному тракту прямоугольного сечения  $9.5 \times 19 \text{ mm}$ . Будем считать, что положительное направление оси  $OZ$  совпадает с направлением распространения вдоль антенны поверхностной сверхвысокочастотной волны. Координата  $z = 0$  соответствует концу волновода, по которому подводится электромагнитная энергия к антенне, на которой

формируется поверхностный СВЧ разряд. Направление распространения сверхзвукового потока (СЗП) противоположно направлению распространения поверхностной СВЧ волны, т. е. направлению распространения разряда.

На рис. 1 представлен общий вид поверхностного СВЧ разряда, создаваемого на диэлектрической антенне с клинообразной торцевой передней частью в неподвижном воздухе при различных значениях длительности импульса. Видно, что разряд локализован в тонком приповерхностном слое и с увеличением длительности воздействия все большая часть антенны покрывается плазмой, создаваемой поверхностной СВЧ волной. При увеличении СВЧ мощности либо длительности импульса больше величин, необходимых для создания плазмы на всей поверхности клинообразного диэлектрического тела, в эксперименте была реализована новая разновидность сверхвысокочастотного разряда, а именно комбинированный микроволновый разряд. Данный разряд представляет собой комбинацию поверхностного микроволнового разряда, создаваемого на антенне, и объемного СВЧ разряда, образующегося на передней кромке клинообразного тела (рис. 2). Видно, что при фиксированной мощности с течением времени плазма покрывает все большую часть антенны. При длитель-



**Рис. 1.** Динамика поверхностного СВЧ разряда на клинообразной диэлектрической антенне в воздухе при  $p = 40 \text{ Торг}$ ,  $W = 40 \text{ кВт}$  и длительности СВЧ импульса ( $I$ )  $\tau$ ,  $\mu\text{s}$ : 1 — 0, 2 — 2, 3 — 7, 4 — 25, 5 — 50, 6 — 100, 7 — 200. II — сверхзвуковой поток.

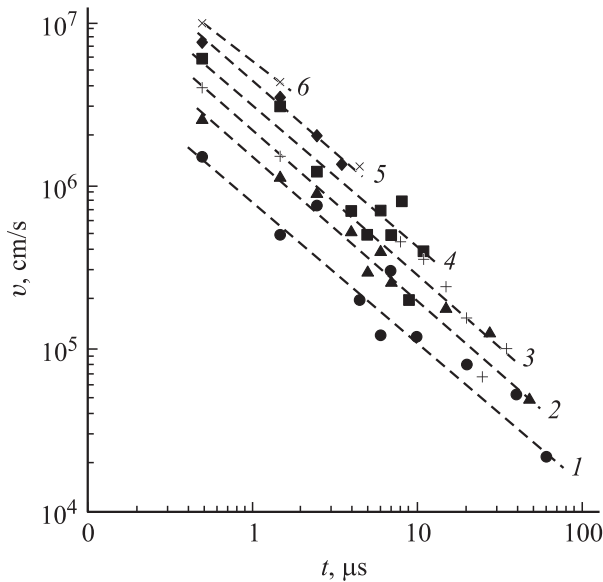


**Рис. 2.** Динамика комбинированного СВЧ разряда на клинообразной диэлектрической антенне в воздухе при  $p = 40 \text{ Торг}$ ,  $W = 60 \text{ кВт}$  и длительности СВЧ импульса ( $I$ )  $\tau$ ,  $\mu\text{s}$ : 1 — 0, 2 — 2, 3 — 10, 4 — 30, 5 — 50, 6 — 75, 7 — 100, 8 — 150, 9 — 200. II — СЗП.

ности СВЧ импульса  $\tau = 50 \mu\text{s}$  на передней кромке антенны начинает формироваться объемное плазменное образование. При дальнейшем увеличении длительности импульса его размеры возрастают.

Как показывают расчеты, при неполном покрытии поверхности антенны плазмой коэффициент отражения энергии от переднего фронта распространяющегося поверхностного разряда не превышает 0.15. Если же разряд занимает всю поверхность антенны, то коэффициент отражения от переднего конца антенны достигает 0.85. В этом случае на поверхности антенны формируется режим стоячей волны с характерной пространственной модуляцией свечения плазмы (рис. 2). По полученной структуре можно оценить концентрацию электронов в плазме.

При исследовании динамики развития поверхностного СВЧ разряда было получено, что продольные размеры разряда во всем исследованном диапазоне давлений воздуха  $p = 1-100 \text{ Торг}$  увеличиваются с ростом длительности СВЧ импульса и подводимой к антенне мощности. В качестве примера на рис. 3 в двойном логарифми-



**Рис. 3.** Временная зависимость продольной скорости распространения поверхностного СВЧ разряда при давлении воздуха  $p = 10 \text{ Torr}$  и импульсной СВЧ мощности  $W, \text{kW}$ : 1 — 25, 2 — 35, 3 — 55, 4 — 75, 5 — 100, 6 — 175.

ческом масштабе представлена временная зависимость продольной скорости распространения поверхностного разряда при  $p = 10 \text{ Torr}$ . Видно, что с увеличением подводимой мощности скорость распространения разряда растет. На начальных стадиях существования поверхностного разряда эта скорость велика и достигает значения  $v = 10^7 \text{ cm/s}$  при подводимой импульсной СВЧ мощности  $175 \text{ kW}$ , тогда как на поздних стадиях скорость распространения разряда уменьшается до  $v = 10^4 \text{ cm/s}$  при  $W = 25 \text{ kW}$ . Из рис. 3 также следует, что все прямые имеют одинаковый наклон. Аналогичные результаты были получены и при давлениях 40, 60 и 100 Torr. Обработка полученных результатов показывает, что временная зависимость продольной скорости поверхностного СВЧ разряда может быть описана законом

$$v = At^{-(0.875 \pm 0.035)}, \quad (1)$$

где  $A$  — коэффициент, зависящий от СВЧ мощности;  $t$  — время.

При давлении воздуха  $p = 10\text{--}100 \text{ Torr}$  коэффициент  $A$  прямо пропорционален  $W/W_0$ , где  $W_0$  — пороговая мощность, необходимая для возникновения поверхностного СВЧ разряда при данном давлении газа (рис. 4). Используя зависимость  $A = f(W)$ , можно получить зависимость продольного размера поверхностного разряда от СВЧ мощности

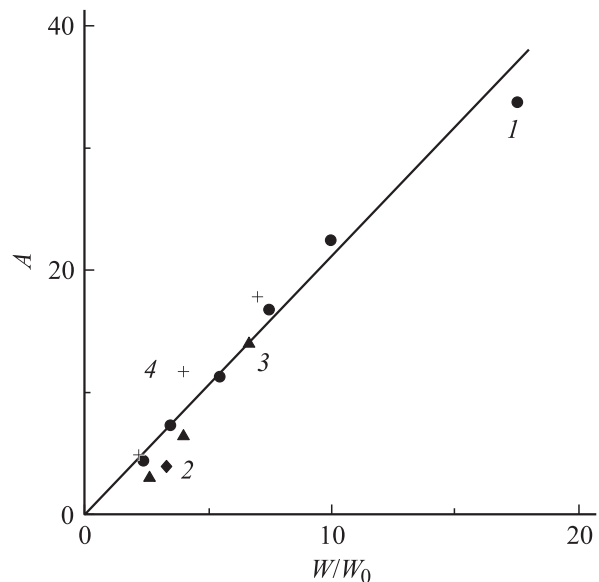
$$L = 17 \frac{W}{W_0} t^{(0.125 \pm 0.035)}, \quad (2)$$

где длина  $L$  поверхностного СВЧ разряда имеет размерность см, а время  $t$  — с.

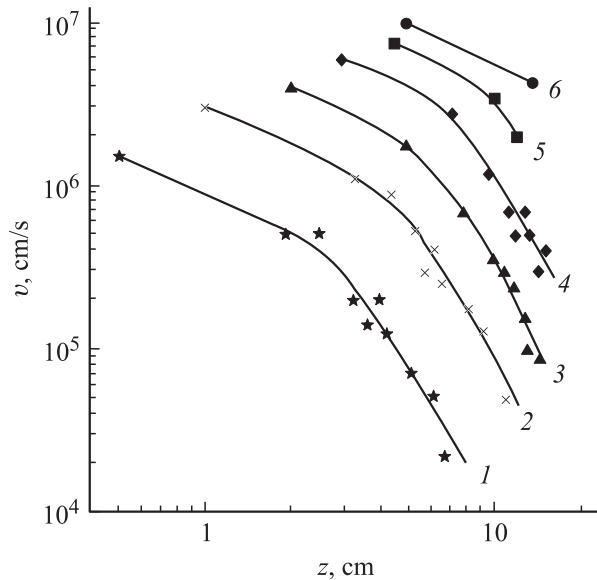
Отсюда видно, что на нашей экспериментальной установке можно получить поверхностный СВЧ разряд длиной до 1 м. Так как скорость распространения разряда намного превышает скорость звука в воздухе, то общий вид поверхностного сверхвысокочастотного разряда на диэлектрической антенне прямоугольного сечения и необходимая для его поддержания СВЧ мощность заметно не меняются в сверхзвуковом ( $M = 2$ ) потоке воздуха [6].

Известно [11], что подвод энергии в область пограничного слоя или локальный нагрев поверхности пластины в области турбулентного пограничного слоя приводит к заметному уменьшению локального коэффициента турбулентного трения за счет уменьшения поперечного градиента продольной скорости и увеличения толщины вытеснения. В случае поверхностного СВЧ разряда поле локализовано в тонком приповерхностном слое [2,3], что способствует эффективному вкладу энергии в плазму и быстрому нагреву газа [6], что приводит к изменению режима обтекания сверхзвуковым потоком газа поверхности тела [4,5].

Экспериментальные данные показывают, что скорость распространения разряда вдоль поверхности диэлектрической антенны больше скорости звука в воздухе, но намного меньше скорости распространения электромагнитной волны в вакууме. Такую скорость движения разряда можно объяснить, если сопоставить ее со скоростью ионизации молекул газа, т.е. с созданием критической концентрации электронов на переднем фронте распространяющегося разряда. Для того чтобы определить, изменяется ли механизм распространения разряда в течение его формирования и развития, проследим, как меняется скорость движения переднего фронта разряда в зависимости от длины поверхностного СВЧ разряда.



**Рис. 4.** Зависимость коэффициента  $A = f(W)$  от импульсной СВЧ мощности для различных давлений воздуха  $p, \text{Torr}$ : 1 — 10, 2 — 40, 3 — 60, 4 — 100.



**Рис. 5.** Зависимость скорости распространения разряда от продольной координаты для  $p = 10 \text{ Torr}$  и СВЧ мощности  $W, \text{ kW}$ : 1 — 25, 2 — 35, 3 — 55, 4 — 75, 5 — 100, 6 — 175.

Для этого в двойном логарифмическом масштабе построим зависимость скорости распространения разряда вдоль диэлектрической антенны от продольной координаты ( $z$ ). На рис. 5 представлены построенные таким образом зависимости  $v = f(z)$ . Как видно из рис. 5, на всех кривых наблюдается характерный излом, который указывает на то, что на начальной и конечной стадиях существования разряда за его распространение отвечают различные механизмы.

В начальные моменты времени  $t = 1-3 \mu\text{s}$  на участках антенны с координатами  $z = 1-2 \text{ cm}$ , прилегающих к подводимому микроволновую энергию волноводу, скорость распространения поверхностного СВЧ разряда в зоне его формирования превышает величину  $10^6 \text{ cm/s}$ . Такие большие скорости распространения разряда в области подвода электромагнитной энергии может обеспечить только механизм, связанный с волной пробоя. Движение поверхностного разряда из-за механизма медленного горения возможно только на поздних ( $t > 100 \mu\text{s}$ ) стадиях существования разряда при таких условиях, когда его скорость распространения становится меньше скорости звука. Наиболее вероятным механизмом, обеспечивающим распространение разряда на стадии его существования при низких давлениях газа, может быть амбиполярная диффузия, тогда как фотоионизация и/или электронная теплопроводность могут быть ответственны за распространение разряда при высоких давлениях.

Предположим, что основным механизмом распространения разряда является амбиполярная диффузия. Известно, что температура электронов в области переднего фронта поверхностного СВЧ разряда практически не меняется в процессе его распространения, поэтому в пределах погрешностей эксперимента ее изменением можно пренебречь. Положим также, что на переднем

фронте разряда  $T_e = 2 \text{ eV}$ ,  $T_i = T_g = 300 \text{ K}$ . Если амбиполярная диффузия является основным механизмом, определяющим потери заряженных частиц в плазме, то зависимость скорости  $v$  распространения поверхностного разряда от частоты ионизации  $\nu_i$  определяется формулой

$$v = 2\sqrt{D_a \nu_i}, \quad (3)$$

где  $D_a$  — коэффициент амбиполярной диффузии, равный

$$D_a = \frac{b_i k T_e}{e}, \quad (4)$$

где  $k$  — постоянная Больцмана;  $b_i$  — подвижность ионов, которая для воздуха в [12] определена как

$$b_i p = \frac{2.7 \sqrt{1 + M_g/M_i}}{\sqrt{(\alpha/a_0^3) 29 \cdot 10^{-3}}}. \quad (5)$$

Здесь  $p$  — давление газа в Torr,  $\alpha/a_0^3 = 11.54$ . В работе [13] для сверхвысокочастотного пробоя воздуха представлена зависимость частота ионизации от величины приведенного электрического поля

$$\frac{\nu_i}{p} = 8.35 \cdot 10^{-4} \left( \frac{E_{\text{ef}}}{p} \right)^{5.34}, \quad (6)$$

где  $E_{\text{ef}}$  — эффективное поле, связанное со значением  $E_0$  амплитуды напряженности электрического поля выражением

$$E_{\text{ef}} = \frac{E_0}{\sqrt{2}} \frac{v_{\text{en}}}{\sqrt{v_{\text{en}}^2 + \omega^2}}, \quad (7)$$

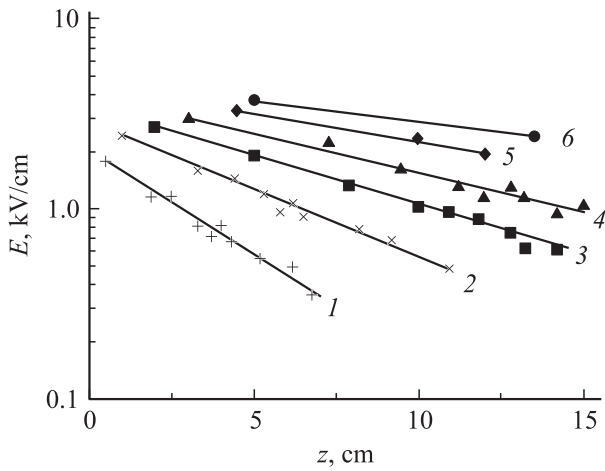
где  $\omega = 2\pi c/\lambda$  — круговая частота сверхвысокочастотного поля,  $\lambda = 2.4 \text{ cm}$ ,  $v_{\text{en}} = 5.3 \cdot 10^9 p$  — частота столкновений электронов с нейтральными молекулами воздуха.

Используя уравнения (3)–(7), для давления воздуха  $p = 10 \text{ Torr}$  получаем зависимость амплитуды напряженности электрического поля от скорости распространения поверхностного СВЧ разряда

$$E_0 = 45.3 \cdot v^{0.375}, \quad (8)$$

где размерность напряженности электрического поля —  $\text{V/cm}$ , а размерность скорости —  $\text{m/s}$ .

На рис. 6 в полулогарифмическом масштабе представлены для давления воздуха  $10 \text{ Torr}$  зависимости амплитуды напряженности электрического поля на фронте распространяющегося поверхностного разряда от продольной координаты  $z$ , вычисленные с использованием экспериментально измеренных зависимостей скорости распространения разряда вдоль антенны. Параметром кривых является подводимая СВЧ мощность. Аппроксимируя полученные зависимости к координате  $z = 0$ , получаем, что в условиях эксперимента амплитуда напряженности электрического поля на фронте поверхностного СВЧ разряда у среза волновода изменяется от  $2 \text{ kV/cm}$  при импульсной мощности  $25 \text{ kW}$  до  $\sim 5 \text{ kV/cm}$  при  $W = 175 \text{ kW}$ . Следует отметить, что



**Рис. 6.** Зависимость амплитуды напряженности электрического поля на фронте распространения поверхностной волны от продольной координаты для давления воздуха  $p = 10$  Торг и подводимой мощности  $W$ , kW: 1 — 25, 2 — 35, 3 — 55, 4 — 75, 5 — 100, 6 — 175.

полученные результаты не только не противоречат, но и удовлетворительно совпадают с величиной поля в волноводе, вычисленной по формуле

$$E_0 = 28\sqrt{S}, \quad (9)$$

где размерность плотности потока мощности  $S$  —  $W/cm^2$ , а размерность амплитуды  $E_0$  напряженности электрического поля —  $V/cm$ .

Например, при подводимой импульсной мощности  $W = 175$  kW амплитуда напряженности электрического поля в волноводе  $E_0 \approx 8$  kW/cm, а при  $W = 25$  kW амплитудное значение поля равно  $\sim 3$  kV/cm.

Для более высоких давлений были получены результаты, явно противоречащие экспериментальным условиям. Так, для давления 100 Торг амплитуда напряженности электрического поля в поверхностном разряде, рассчитанная в приближении распространения разряда за счет амбиполярной диффузии  $E_0 = 259 \cdot v^{0.375}$ , достигает 15 kV/cm, что противоречит вычисленным значениям поля в волноводе.

Предположим далее, что за распространение разряда отвечает механизм электронной теплопроводности. В этом случае зависимость скорости распространения разряда от напряженности электрического поля имеет вид

$$v = \frac{\sqrt{\chi_e \sigma T_e}}{\frac{3}{2} k T_e n_e} E_0, \quad (10)$$

где  $\chi_2 = 2.56 \cdot 10^{-3} T_e^{5/2} / \ln \Lambda$  — коэффициент электронной теплопроводности в  $W/cm \cdot K$ ,  $\sigma$  — электронная проводимость,  $T_e$  — температура электронов в eV.

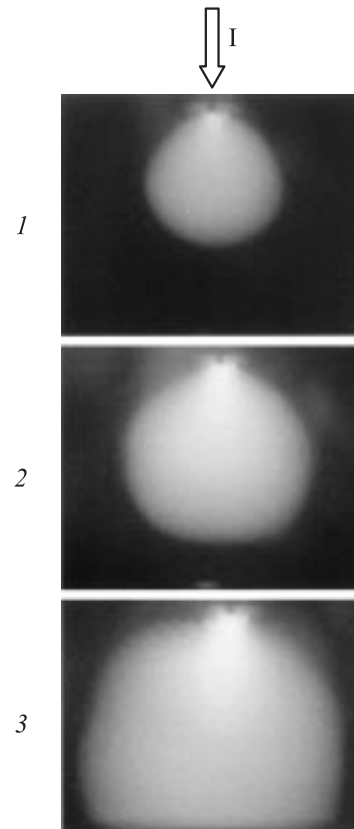
Для воздуха  $\chi_e = 1.93 W/m \cdot K$ ,  $\sigma p/n_e = 7.2 \cdot 10^{-18}$  Торг  $\cdot m^2/\Omega$  [12]. Окончательно получаем

$$E_0 = 1.46 \cdot 10^{-5} \sqrt{pv}, \quad (11)$$

где размерность скорости — m/s, давления — Торг, а напряженности электрического поля — V/cm.

При давлении  $p = 100$  Торг и скорости распространения разряда  $v = 10^5$  m/s максимальная амплитуда поля, полученная в предположении, что распространение разряда обеспечивается за счет электронной теплопроводности, равна 14.6 V/cm. Таким образом, полученные значения поля противоречат условиям эксперимента и соответственно механизм электронной теплопроводности не обеспечивает распространение разряда для всего диапазона исследованных давлений.

Были проведены также эксперименты по созданию поверхностного СВЧ разряда на плоской пластине (рис. 7). Для этого использовалась пластина из тефлона толщиной 1 см длиной 14 см и шириной 20 см. В месте возникновения плазмы происходит трансформация подводимой СВЧ энергии в поверхностную волну, которая распространяется во всех направлениях, создавая на поверхности диэлектрика тонкий ( $\sim 1$  мм) слой однородно светящейся плазмы. С увеличением мощности все большая часть поверхности пластины покрывается плазмой. Скорость распространения разряда на пластине также зависит от длительности и мощности СВЧ импульса, как и скорость распространения разряда на антенне. Так, при мощности  $W = 350$  kW за время  $t = 1 \mu s$  поверхностный СВЧ разряд покрывает всю пластину площадью  $14 \times 20$  см.



**Рис. 7.** Поверхностный СВЧ разряд (вид сверху) на диэлектрической пластине при  $p = 40$  Торг,  $\tau = 50 \mu s$  и подводимой импульсной СВЧ мощности  $W$  (I), kW: 1 — 50, 2 — 100, 3 — 150.

## Заключение

Исследована динамика микроволнового разряда, создаваемого на диэлектрических телах поверхностной волной. Показано, что для давлений воздуха меньше 40 Торг механизм амбиполярной диффузии определяет скорость распространения переднего фронта поверхностного СВЧ разряда. Скорость распространения разряда существенно превышает скорость звука в воздухе. Это обстоятельство является определяющим для применения данного типа разряда в новых технологиях в аэродинамике гиперзвуковых летательных аппаратов для улучшения их характеристик.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 02-02-17116) и Европейского управления аэрокосмических исследований и разработок (EOARD) (проект № 2248р Международного научно-технического центра).

## Список литературы

- [1] *Шибков В.М., Виноградов Д.А., Восканян А.В.* и др. // Вестник Московского ун-та. Сер. 3. Физика, астрономия. 2000. Т. 41. № 6. С. 64–66.
- [2] *Shibkov V.M., Chernikov A.V., Chernikov V.A.* et al. // Microwave Discharges: Fundamentals and Applications. М.: Yanus-K, 2001. P. 145–153.
- [3] *Shibkov V.M., Chernikov V.A., Dvinin S.A.* et al. // 15<sup>th</sup> Intern. Symposium on Plasma Chemistry. Vol. I Oral Contributions. France, 2001. P. 179–184.
- [4] *Shibkov V.M., Chernikov V.A., Ershov A.P.* et al. // American Institute of Aeronautics and Astronautics. AIAA Paper. 2001–3087. P. 1–8.
- [5] *Shibkov V.M., Alexandrov A.F., Chernikov A.V.* et al. // American Institute of Aeronautics and Astronautics. AIAA Paper. 2003–1193. P. 1–7.
- [6] *Шибков В.М., Ершов А.П., Черников В.А., Шибкова Л.В.* // ЖТФ. 2005. Т. 75. Вып. 4. С. 67–73.
- [7] *Райзер Ю.П.* Лазерная искра и распространение разрядов. М.: Наука, 1974. 308 с.
- [8] *Двинин С.А., Довженко В.А.* // Физика плазмы. 1988. Т. 14. № 1. С. 66–76.
- [9] *Гильденбург В.Б., Гуцин И.С., Двинин С.А., Ким Ф.В.* // ЖЭТФ. 1990. Т. 96. Вып. 4. С. 1151–1158.
- [10] *Зарин А.С., Кузовников А.А., Шибков В.М.* Свободно локализованный СВЧ разряд в воздухе. Нефть и газ. М., 1996. 204 с.
- [11] *Казаков А.В., Коган М.Н., Курячий А.П.* // ТВТ. 1995. Т. 33. № 6. С. 888–894.
- [12] *Райзер Ю.П.* Физика газового разряда. М.: Наука, 1987. 591 с.
- [13] *Maughan J.T.* // J. Appl. Phys. 1971. Vol. 42. N 13. P. 5362–5369.