

03;04;09;12

## Стримерный СВЧ разряд в сверхзвуковом потоке воздуха

© Л.П. Грачев, И.И. Есаков, К.В. Ходатаев

Московский радиотехнический институт РАН,  
113519 Москва, Россия

(Поступило в Редакцию 9 февраля 1998 г. В окончательной редакции 30 января 1999 г.)

Приведены результаты экспериментов по зажиганию импульсного инициированного стримерного СВЧ разряда в фокусе *ТЕМ*-волны сантиметрового диапазона в сверхзвуковой затопленной струе воздуха. Экспериментально показано, что при достигнутой скорости воздуха в струе до 500 м/с структура разряда качественно не меняется, оставаясь стримерной. Некоторую специфику разряду придает ограниченность размера поперечного сечения струи.

Газовый импульсный СВЧ разряд в электромагнитном (ЭМ) луче с *ТЕМ*-структурой поля сантиметрового диапазона длин волн  $\lambda$  при давлении газа  $p$  выше некоторого порогового значения  $p_{\text{пор}}$ , определяемого сортом газа, реализуется в стримерной форме [1]. Такой разряд с развитой пространственной структурой на интегральных фотографиях, выполненных с временем экспозиции  $t_e$ , превышающим длительность СВЧ импульса  $t_p$ , представляется в виде сложной композиции тонких плазменных каналов. Исследование процесса развития разряда во времени показывает, что образующие разряд каналы — стримеры непрерывно удлиняются и ветвятся.

Одно из основных свойств развитого стримерного СВЧ разряда заключается в том, что он поглощает практически всю падающую на него ЭМ энергию. Это существенно отличает стримерный СВЧ разряд от разрядов, реализующихся в пространственно однородной форме.

Другая важная особенность СВЧ стримерного разряда заключается в том, что составляющие его стримеры, как и стримеры в постоянном поле, могут прорасти в область ЭМ луча с амплитудой электрической компоненты исходного поля  $E_0$ , существенно меньшей критической амплитуды  $E_k$ , характеризующей порог пробоя [2]. На практике это позволяет реализовать стримерный СВЧ разряд в ЭМ луче, во всем объеме которого  $E_0 \ll E_k$ . При этом условие для пробоя создается специальными мерами лишь в локальной его области. На интегральных фотографиях такой подкритический инициированный разряд представляется в виде "клубка" плазменных каналов, размер которого от места инициации до границы разряда, обращенной к источнику СВЧ излучения, растет с ростом  $t_p$ , т. е. разряд распространяется в сторону излучателя и можно ввести понятие скорости его фронта  $V_{\text{fr}}$ . Скоростная фоторазвертка подкритического разряда показывает, что основные энергетические процессы в разрядной области идут именно на ее фронте [3]. В районе фронта отдельные стримерные участки, соизмеримые с  $\lambda/2$ , последовательно образуют резонансные плазменные вибраторы, обеспечивающие поглощение ЭМ энергии. За "фронтом" фактически начинается распад разрядной плазмы.

В воздухе стримерный СВЧ разряд с  $\lambda = 8.5$  см реализуется при  $p > p_{\text{пор}} = 60$  Торр, а его инициированный вариант с развитой структурой — при  $E_0 > 1.5$  кВ/см и  $t_p > 10$  мкс [4]. При этом фоторазвертка показывает, что резонансные участки стримеров, возникающие по фронту разряда, интенсивно светятся в оптическом спектре излучения в течение времени  $t_{\text{sv}}$ , равного нескольким микросекундам [3]. В указанных условиях средняя скорость фронта может быть оценена эмпирическим соотношением

$$V_{\text{fr}} = \left(1/\sqrt{3}\right) (3 \cdot 10^4 \sqrt{p} + 1.7 \cdot 10^{-2} E_0 p \lambda); \text{ см/с}, \quad (1)$$

где  $p$  имеет размерность Торр,  $E_0$  — В/см,  $\lambda$  — см [5]; второй множитель есть средняя скорость роста составляющих разряд стримеров  $V_{\text{str}}$ , а первый — отражает факт преимущественного прорастания их навстречу и поперек излучения.

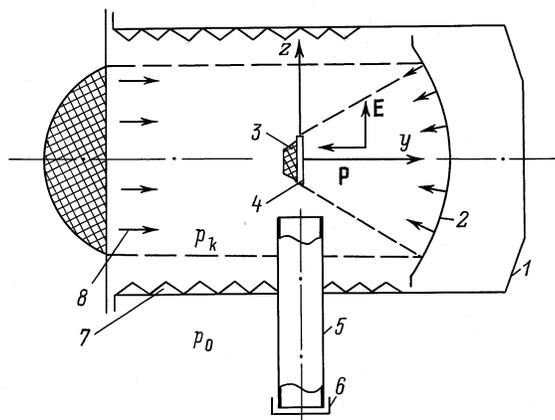
Из (1) видно, что при  $p$  в сотни Торр  $V_{\text{str}}$  имеет масштаб  $10^6$  см/с. Приведем также для справки значение  $E_k$  в воздухе [2]

$$E_k = 1.2 \cdot 10^{-15} n; \text{ В/см}, \quad (2)$$

где  $n$  — концентрация молекул воздуха, выраженная в  $1/\text{см}^3$ .

Указанные выше два свойства рассматриваемого типа разряда являются определяющими при разработке вопросов его практического применения. Действительно, с одной стороны, стримерный СВЧ разряд с высоким КПД утилизирует падающую на него ЭМ энергию, а с другой стороны, для реализации его инициированного подкритического варианта даже при очень высоком давлении газа требуются сравнительно маломощные и практически доступные СВЧ источники. В то же время для определенных приложений, например в аэродинамике [6–9], требуется знать, как поведет себя такой разряд в потоке газа, в том числе и в сверхзвуковом (СЗ). Ориентируясь на (1), можно предположить, что при скорости потока  $V_F \leq 10^5$  см/с структура разряда и его свойства существенно не изменятся. И тем не менее данное предположение требует экспериментальной проверки.

В настоящей работе приведены результаты экспериментов по зажиганию импульсного инициированного



**Рис. 1.** Схема эксперимента по зажиганию подкритического инициированного стримерного СВЧ разряда в сверхзвуковой струе воздуха: 1 — герметичная камера, 2 — фокусирующее зеркало, 3 — рейка, 4 — иницирующий вибратор, 5 — труба, 6 — разрушаемая диафрагма, 7 — СВЧ поглотители, 8 — ТЕМ-волна.

подкритического стримерного СВЧ разряда в ТЕМ-луче в СЗ потоке воздуха. Так как стримерный СВЧ разряд, реализуемый в ЭМ луче, в потоке газа пока не исследовался, то на данном этапе его изучения основное внимание было обращено на принципиальную сторону проблемы. Задавался вопрос, будет ли вообще подкритический СВЧ разряд при  $p > p_{\text{por}}$  в потоке развиваться и сохранять стримерную структуру.

В опытах использовалась определенным образом модернизированная установка, описанная в работах [1,3,4]. Схема эксперимента представлена на рис. 1. На ней показана вакуумная камера 1; зеркало 2, фокусирующее СВЧ излучение; иницирующий СВЧ вибратор 4, помещенный в фокус, и диэлектрическая труба 5, формирующая сверхзвуковую струю, обдувающую инициатор. В опытах СВЧ излучение фокусировалось в центре вакуумной камеры. Камера и труба предварительно откачивались до давления  $p_k$ . В заданный момент времени внешний конец трубы открывался в атмосферу с  $p_0 = 760$  Торг и начиналось натекание воздуха в камеру. Затем с фиксированной задержкой включался СВЧ генератор. Разряд, возникающий в области фокуса, фотографировался с  $t_e \gg t_p$ .

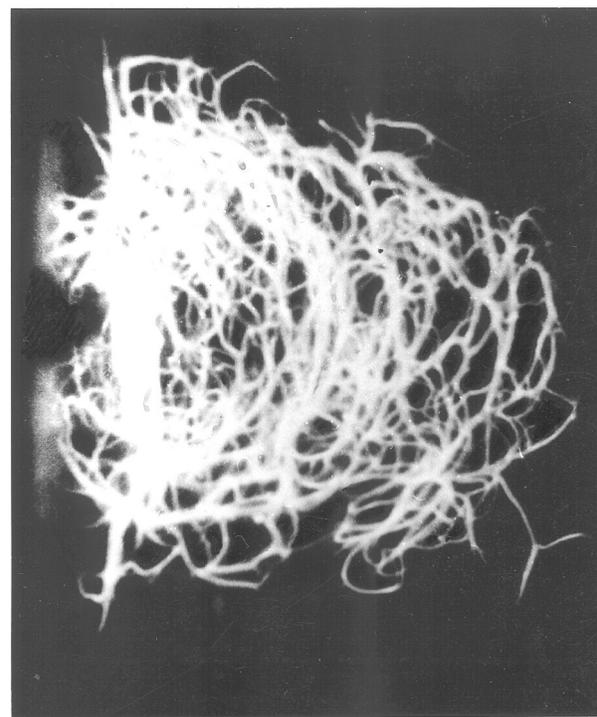
В опытах использовалось линейно поляризованное ТЕМ-излучение с плоским фазовым фронтом. Оно поступало в камеру на фокусирующее зеркало. В области фокуса в поперечном сечении пучка распределение амплитуды поля было близко гауссову с характерным размером около 5 см. Вдоль оси пучка поле было примерно однородным на длине нескольких сантиметров. Излучение с длиной волны  $\lambda = 8.5$  см имело амплитуду поля в фокусе  $E_0 \leq 7.2$  кВ/см и длительность импульса  $t_p = 40$  мкс.

Инициатор выполнялся из медного провода с диаметром 0.8 мм и длиной 4 см. Он располагался в фокусе

ЭМ пучка параллельно  $E_0$  и крепился посередине рейки (3 на рис. 1) из органического стекла шириной 25 мм и толщиной 6 мм. Рейка проходила через фокус и была перпендикулярна направлению излучения, характеризуемого вектором Пойнтинга  $P_0$ , и вектору  $E_0$ . Ее широкая сторона была параллельна  $E_0$ . Для уменьшения влияния рейки на поток воздуха в области предполагаемого разряда в своем поперечном сечении рейка имела фаски, как показано на рис. 1. Инициатор крепился к плоской стороне рейки, обращенной к  $P_0$ .

Диэлектрическая труба, формирующая сверхзвуковую струю, имела внутренний диаметр  $d_{\text{esc}} = 5.4$  см и длину 81 см. Ось трубы была коллинеарна оси инициатора. Открытый выходной конец трубы отстоял от фокуса на расстоянии 10 см. Внешний конец трубы герметизировался от атмосферы диафрагмой из полиэтилентерефталатной диэлектрической пленки толщиной 20 микрон (6 на рис. 1). С наружной стороны диафрагмы к ее поверхности прилегла нихромовая проволока диаметром 0.1 мм и длиной 3 см. Проволока включалась в цепь разряда высоковольтного конденсатора. При его разряде проволока взрывалась и разрушала пленку. С этого момента начиналось линейное во времени натекание воздуха в камеру с экспериментально измеренной скоростью, равной 0.38 Торг/мс.

В опытах задавалось время между моментом подрыва пленки и подачей СВЧ импульса  $\Delta t$ . Величина  $\Delta t$  предварительно оценивалась по ожидаемой скорости потока  $V_F$ . При этом имелось в виду, что в районе фокуса поток уже успел сформироваться, а последствия отражения струи от противоположной трубе стенки камеры, отстоя-



**Рис. 2.**

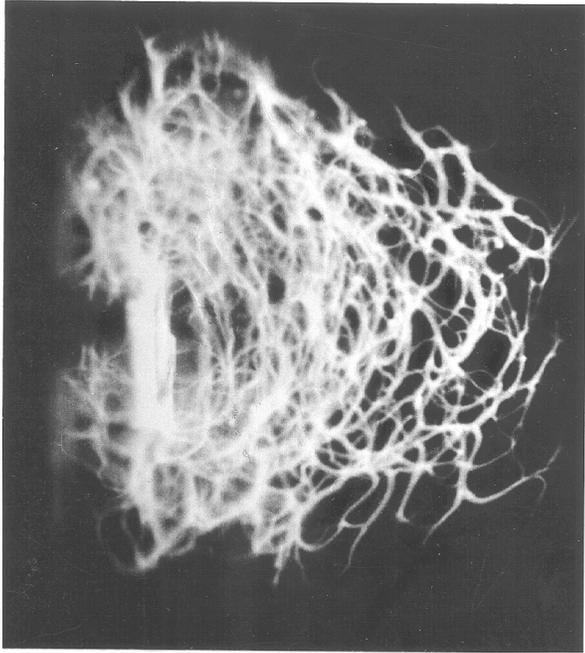


Рис. 3.



Рис. 4.

шей от фокуса на 45 см, еще не проявились. В процессе экспериментов величина  $\Delta t$  уточнялась, так как время разрушения диафрагмы предсказать было сложно (в опытах выяснилось, что оно лежало в диапазоне нескольких миллисекунд).

На рис. 2–7 приведены полученные в ходе экспериментов фотографии инициированных подкритических стримерных СВЧ разрядов. На них излучение поступает

справа налево и  $E_0$  лежит в плоскости рисунка и перпендикулярен  $P_0$ . Для объяснения ракурса съемки введем правую декартову систему координат с началом в фокусе ЭМ луча, осью  $Y$ , направленной навстречу  $P_0$ , и осью  $Z$ , направленной на рисунках вверх. Теперь если совместить с ней сферические координаты, то ось объектива фотоаппарата имела отсчитываемый от оси  $Z$  широтный угол  $\theta = 110^\circ$  и отсчитываемую от оси  $X$  долготу  $\varphi = 20^\circ$ . На фотографиях длина инициирующего вибратора может служить масштабом изображения.

На рис. 2 представлен разряд без потока при  $p_k = 300 \text{ Torr}$  и  $E_0 = 7.2 \text{ kV/cm}$ . Виден характерный "клубок" стримерных каналов, а слева — вертикальное свечение с разрывом посередине является бликом на вертикальном элементе крепления рейки, который далеко (на расстоянии около 35 см по оси  $X$ ) отстоит от области разряда. Яркое однородное образование с левой стороны "клубка" визуализирует разряд по поверхности рейки в месте ее контакта с вибратором. Выше и ниже его более ярко светятся концы инициирующего вибратора (свечение нижнего конца несколько четче). Протяженность разряда навстречу излучению около 6 см, что соответствует  $V_{fr} \cong 1.5 \cdot 10^5 \text{ cm/s}$  и, следовательно,  $V_{str} \cong 2.5 \cdot 10^5 \text{ cm/s}$  (оцененную по фотографии  $V_{fr}$  можно сравнить с этой величиной, рассчитанной по формуле

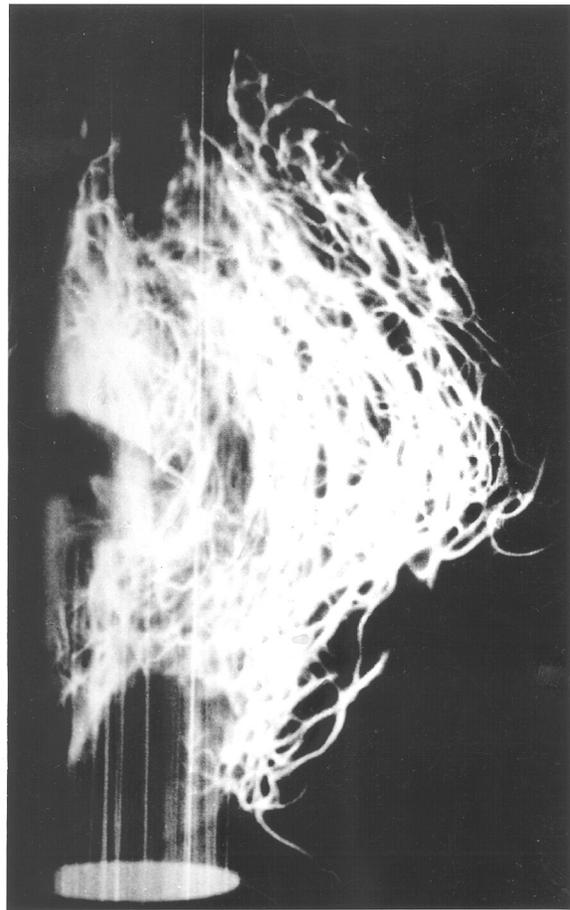


Рис. 5.

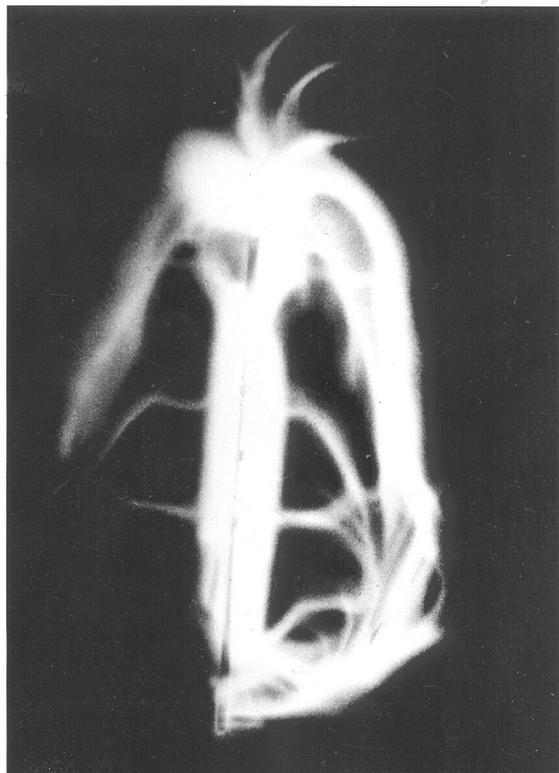


Рис. 6.

(1); при этом надо иметь в виду, что (1) отражает усреднение как в течение  $t_p$ , так и по серии импульсов, т. е. оцененная по рис. 2 средняя  $V_{fr}$  характеризует именно данную реализацию).

На рис. 3 приведен разряд при тех же  $p_k = 300$  Torr и  $E_0 = 7.2$  kV/cm, но уже со струей при  $\Delta t = 10$  ms. На ней снизу виден выходной конец трубы, формирующей струю. Он освещен вспышкой от взрывающейся проволоки, разрушающей герметизирующую трубу. Видны также треки, образованные "осколками" проволоки и диафрагмы, которые увлекаются потоком воздуха. Они в определенной мере визуализируют струю. С левой стороны области разряда по-прежнему видны блик и засветка от разряда по поверхности рейки. Видно, что расстояние, пройденное разрядом в сторону излучателя при наличии струи, существенно не изменилось, т. е. практически не изменились  $V_{fr}$  и  $V_{str}$ . В данной геометрии на начальных этапах своего развития разряд находится в потоке, а затем распространяется уже в неподвижном воздухе. На фотографии это проявляется в том, что стримерные каналы, находящиеся в области струи, как бы "смазаны" вдоль потока (ср. с рис. 2). Вне струи они имеют четкие очертания.

На рис. 4 приведен разряд без потока при  $p_k = 100$  Torr и  $E_0 = 7.2$  kV/cm. Видно, что при этом  $p_k$  стримерные каналы, составляющие разряд, имеют большую толщину и более диффузные, чем на рис. 2. На рис. 5 приведен разряд при тех же  $p_k$  и  $E_0$ , но уже при наличии струи при

$\Delta t = 50$  ms. На нем виден типично стримерный разряд. В то же время ограниченность размера поперечного сечения струи придает ему определенную специфику. Разряд в основном развивается вокруг струи, он как бы огибает струю, визуализируя ее границу.

Для более детального рассмотрения разряда именно внутри струи на рис. 6 и 7 приведены разряды без струи и со струей соответственно с  $p_k = 100$  Torr,  $\Delta t = 10$  ms, но уже при меньшем  $E_0 = 1.7$  kV/cm. Эти фотографии выполнены более длиннофокусным объективом, т. е. с меньшей глубиной резкости. На них четко виден инициатор.

На рис. 6 в центральной части иницирующего вибратора по-прежнему видна засветка рейки разрядом, возникающим по ее поверхности в месте прилегания к ней вибратора. Около верхнего его конца зафиксировано испарение материала вибратора. Испарение возникает в месте контакта с его поверхностью высокотемпературных плазменных каналов.

На рис. 7 границы потока, как и прежде, могут быть определены по трекам. На нем видно, что фотокартина разряда при наличии струи изменилась. В этих условиях отсутствует разряд вдоль вибратора на поверхности рейки. Разряд существенно вытянут по потоку. Он занимает больший объем. В то же время разряд инициирован именно вибратором, находящимся в потоке. Нижний конец вибратора подвергся испарению, т. е. поток существенно

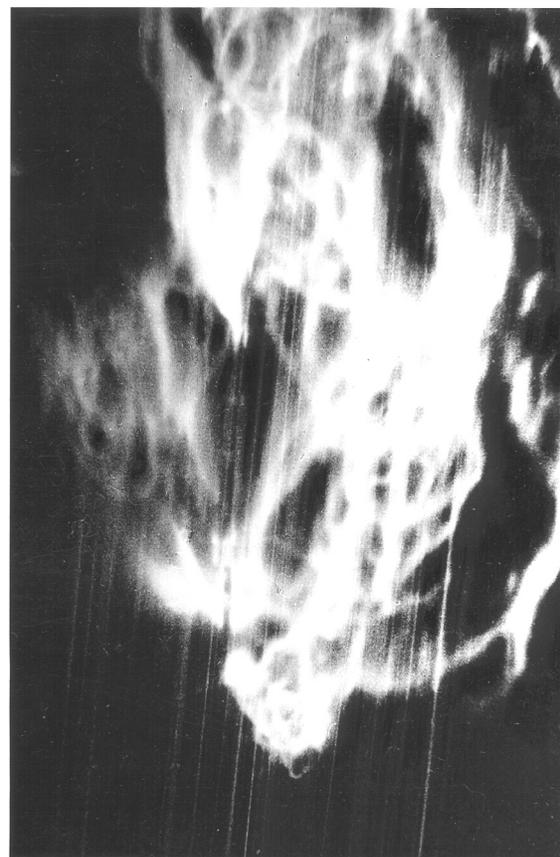


Рис. 7.

не снизил температуру плазменных каналов. Каналы, отходящие от верхнего конца вибратора, существенно "смазаны" вдоль потока.

Прокомментируем приведенные результаты с учетом оценки параметров струи, характерных для рис. 3 и 5,7. Будем считать, что на всем протяжении трубы реализуется критическое течение [10] (в экспериментах всегда  $p_0/p_k > 1.9$ ). Тогда в ее выходном сечении независимо от  $p_k$  получим статическое давление  $p_{esc} = 400 \text{ Torr}$ , температуру воздуха  $T_{esc} = 250 \text{ K}$ , скорость его потока  $V_{esc} = 310 \text{ m/s}$  при плотности молекул  $n_{esc} = 1.9 \cdot 10^{19} \text{ 1/cm}^3$ .

При  $p_{esc} > p_k$ , выходя из трубы, струя принимает форму "бочек" Маха. Первоначально она расширяется, а статическое давление в потоке  $p_F$  падает. При  $p_k = 300 \text{ Torr}$  давление  $p_F$  выровняется с  $p_k$  при увеличении диаметра струи  $d_F$  по сравнению с ее выходным размером  $d_{esc}$  всего на 2%. В этом сечении струи число Маха потока будет равно  $M_F = 1.23$ ,  $V_F = 370 \text{ m/s}$ , а концентрация молекул в потоке  $n_F = 1.3 \cdot n_k$ , где  $n_k = 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ . При  $p_k = 100 \text{ Torr}$  в сечении струи, где  $p_F$  сравняется с  $p_k$ , эти же величины равны:  $d_F = 1.3 d_{esc}$ ,  $V_F = 500 \text{ m/s}$ ,  $n_F = 1.8 n_k$ ,  $n_k = 3.4 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ .

Из приведенных цифр следует, что при  $p_k = 300 \text{ Torr}$  концентрация  $n_F$  в указанном сечении на 30% выше  $n_k$ , т.е. в потоке  $E_k$  на 30% выше критического поля в окружающей струю неподвижном воздухе. Последнее по (2) определяется как  $E_k = 12 \text{ kV/cm}$ . Таким образом, в рассматриваемом случае и в потоке, и вне его при  $E_0 = 7.2 \text{ kV/cm}$  может быть реализован только подкритический разряд. Следовательно, разряд, приведенный на рис. 3, является подкритическим инициированным и на начальном этапе развивается в потоке. Зафиксированная на фотографии диффузная размытость стримерных каналов внутри потока необязательно отражает изменения в процессе роста стримеров и их способности диссипировать ЭМ энергию. Она характеризует лишь длительность их свечения. Отметим, однако, что при оцененном в [3] времени  $t_{sv}$  абсолютное уширение вдоль потока перпендикулярных  $V_F$  стримерных каналов должно быть около миллиметра. На рис. 3 есть и существенно большие "уширения". Выяснение причин этого несоответствия требует дальнейшего исследования.

При  $p_k = 100 \text{ Torr}$  в камере  $E_k = 4 \text{ kV/cm}$ , а в потоке —  $7.2 \text{ kV/cm}$ . Очевидно, что в этом случае при  $E_0 = 7.2 \text{ kV/cm}$  разряд должен в основном "огнать" струю, что и зафиксировано на рис. 5. При  $E_0 = 1.7 \text{ kV/cm}$ , чему соответствует рис. 7, и в струе, и вне ее реализуются подкритические условия и разряд может быть только инициированным. Существенные изменения картины разряда на рис. 7 по сравнению с его картиной, зафиксированной на рис. 6, скорее всего, связаны с реализуемым в эксперименте увеличением концентрации молекул в районе инициатора при наличии потока.

Таким образом, эксперименты по зажиганию стримерного СВЧ разряда в струе при СЗ скорости потока,

достигающей  $500 \text{ m/s}$ , показали, что разряд и в этих условиях продолжает оставаться стримерным. Полученный результат делает реальными перспективы использования этого вида разряда в прикладной аэродинамике при излучении ЭМ энергии с борта летательного аппарата, например, основываясь на данных работ [8,9], для борьбы со звуковым ударом, возникающим при СЗ полете самолета, или для изменения аэродинамических характеристик летательных аппаратов. В то же время при проведении исследований СВЧ разряда в струйных методиках, как и при экспериментах в постоянном поле [6], надо учитывать ограниченность поперечного сечения струи и разницу параметров газа в ней и в окружающем пространстве. Неучет этих факторов может привести к существенным недоразумениям при интерпретации наблюдений.

Авторы выражают благодарность К.В. Александрову за помощь в проведении экспериментов.

## Список литературы

- [1] Грачев Л.П., Есаков И.И., Мишин Г.И. и др. // ЖТФ. 1985. Т. 55. Вып. 2. С. 389–391.
- [2] Мак-Дональд А. Сверхвысокочастотный пробой в газах. М.: Мир, 1969. 205 с.
- [3] Грачев Л.П., Есаков И.И., Мишин Г.И. и др. // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. Вып. 22. С. 34–38.
- [4] Грачев Л.П., Есаков И.И., Мишин Г.И. и др. // ЖТФ. 1994. Т. 64. Вып. 1. С. 74–88.
- [5] Грачев Л.П., Есаков И.И., Мишин Г.И. и др. // ЖТФ. 1995. Т. 65. Вып. 5. С. 21–30.
- [6] Грачев Л.П., Грицов Н.Н., Мишин Г.И. и др. // ЖТФ. 1991. Т. 61. Вып. 9. С. 185–189.
- [7] Витковский В.В., Грачев Л.П., Грицов Н.Н. и др. // ТВТ. 1990. Т. 28. № 6. С. 1156–1163.
- [8] Грачев Л.П., Есаков И.И., Мишин Г.И. и др. // ЖТФ. 1985. Т. 55. Вып. 5. С. 972–975.
- [9] Есаков И.И. // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. Вып. 1. 1990. С. 98–102.
- [10] Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1979. 904 с.