

03;04;09;12

## Регулярная система газовых разрядов на поверхности диэлектрика в квазиоптическом пучке СВЧ-излучения

© К.В. Александров, И.И. Есаков, П.Б. Лавров, А.А. Раваев, К.В. Ходатаев

Московский радиотехнический институт РАН,  
117519 Москва, Россия  
e-mail: lpbmos@gmail.com

(Поступило в Редакцию 11 октября 2011 г.)

Рассмотрены различные методы создания системы регулярных плазменных образований с помощью пассивных вибраторов в поле квазиоптического пучка электромагнитного излучения СВЧ-диапазона, предназначенные для формирования периодической вихревой структуры на поверхности обтекаемого диэлектрического тела. Описаны свойства глубоко подкритического поверхностного разряда в потоке, его структура, пространственные и энергетические характеристики.

### Введение

В последнее десятилетие все более активно разрабатываются новые методы управления аэродинамическими характеристиками пограничного слоя на поверхности обтекаемого тела. В работе [1] был рассмотрен метод управления пограничным слоем под воздействием объемных сил. Метод базируется на управлении характеристиками потока посредством селективного стимулирования присущей потоку вихревой структуры. Управление переходным и турбулентным пограничными слоями потока осуществляется путем создания на обтекаемой поверхности регулярного температурного распределения, периодического по поперечной потоку координате. Такое распределение обеспечивалось в опыте системой нагреваемых электрическим током элементов, расположенных регулярно в поперечном к потоку направлении. Сформированное такой системой температурное распределение приводит к образованию вихревой структуры на поверхности аэродинамической модели. Однако технологически подвод электропитания к используемой в опытах системе нагревательных элементов достаточно сложен. Кроме того, такой метод создания температурного распределения обладает большой тепловой инерцией. Теплопроводный контакт нагреваемых элементов с обтекаемым телом, в который они вмонтированы, приводит к общему повышению температуры поверхности с малой пространственной модуляцией.

В отличие от [2–4] и многих других работ, в которых для управления потоком используются различные типы импульсно-периодических разрядов постоянного тока, авторами было предложено подводить энергию с помощью удаленного источника СВЧ-энергии. Разряд малого размера генерируется с помощью инициатора, который при размещении в существенно подкритическом (во много раз меньшем пробойного) СВЧ-поле создает область с надкритическим полем (превышающем пробойное значение) и поддерживает в этой зоне разряд.

Одной из первоочередных задач был выбор типа, исследование характеристик, оптимизация конструкции

и геометрических размеров инициатора СВЧ-разряда применительно к условиям аэродинамического эксперимента. Были исследованы различные типы инициаторов: линейный электромагнитный (ЭМ) вибратор, линейный ЭМ-вибратор с центральным зазором и вибратор с зазором в форме незамкнутой петли (кольцевой инициатор). Теория и методы расчета таких инициаторов изложены в работе [5].

### 1. Простейший инициатор — электромагнитный прямой вибратор

Простейшим инициатором является металлический цилиндр с закругленными концами. Линейный ЭМ-вибратор является наиболее хорошо изученным в экспериментальных и теоретических исследованиях типом инициатора. Его свойства, с этой точки зрения, достаточно хорошо известны. Его преимущества: простая конструкция, хорошо изученные зависимости поля вблизи концов от различных факторов, возможность обеспечения пробоя при очень высоких уровнях подкритичности исходного поля. Если длина цилиндра сопоставима с половиной длины волны СВЧ-поля, то он приобретает резонансные свойства.

Вибратор, помещаемый в поле излучения с линейной поляризацией параллельно электрическому полю, имеет максимумы индуцированного поля на обоих концах (рис. 1).

Главным параметром инициатора является коэффициент увеличения электрического поля

$$\eta \equiv \frac{E}{E_0}, \quad (1)$$

где  $E$  — максимальная амплитуда поля на вершине вибратора,  $E_0$  — амплитуда исходного СВЧ-поля в месте расположения вибратора. Коэффициент  $\eta$  зависит от полной длины вибратора  $2L$ .

Результаты теоретического и экспериментального исследований коэффициента увеличения поля  $\eta$  дают оценку для вибратора с резонансной длиной, где  $a$  — радиус

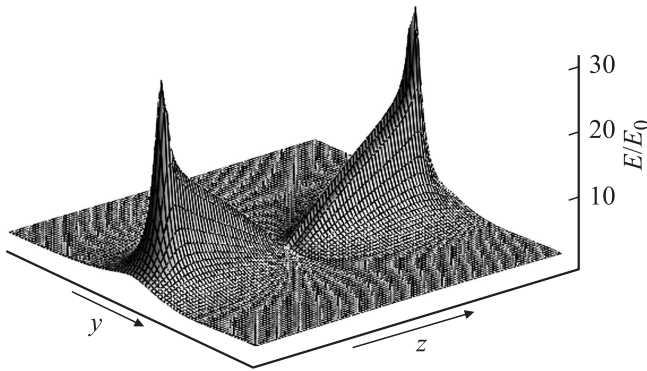


Рис. 1. Распределение амплитуды электрического поля вблизи вибратора с резонансной длиной.

кривизны конца вибратора,

$$\eta \equiv \frac{E}{E_0} \approx \frac{\lambda}{4a}, \quad (a \ll \lambda). \quad (2)$$

Естественно, что и в натуральных экспериментах разряд при атмосферном давлении без труда зажегся подобным способом.

Очевидны недостатки линейного ЭМ-вибратора в качестве инициатора СВЧ-разряда для решения поставленной задачи. Это, в первую очередь, значительная его длина, которая в резонансе, например при  $\lambda = 12.5$  см, близка к 6 см.

## 2. Тандем двух прямых вибраторов

Следующий тип инициатора, который был исследован, это линейный ЭМ-вибратор с центральным зазором. Он представляет собой комбинацию двух резонансных вибраторов, расположенных на прямой линии, параллельной электрическому полю, с небольшим зазором между ними.

Распределение поля в этом случае показано на рис. 2. Максимальная амплитуда поля наблюдается в зазоре

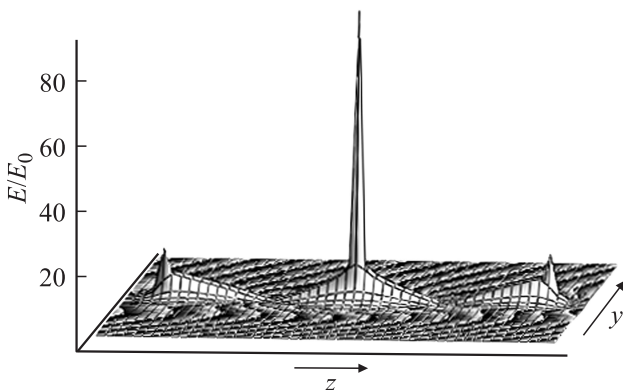


Рис. 2. Распределение амплитуды электрического поля вокруг двух резонансных вибраторов, помещенных в СВЧ-излучение.

между ближайшими концами вибраторов. Расчеты показали, что коэффициент увеличения принимает максимальное значение, если зазор равен диаметру цилиндра.

Вместе с тем эксперименты выявили, что преимущество данного типа инициатора перед обычным линейным ЭМ-вибратором по величине поля в зазоре начинает проявляться только при больших линейных размерах, близких к резонансным. А это значит, что суммарная длина вибраторов порядка  $\lambda$ .

## 3. Кольцевой инициатор

Идея относительно поля, удваивающегося в зазоре между концами вибраторов, может быть реализована не только с помощью комбинации двух прямых вибраторов, но и посредством одного резонансного вибратора, свернутого в кольцо, с зазором между его концами [6,7].

Вычисления показывают, что коэффициент увеличения возрастает более чем в 2 раза. Дополнительный рост объясняется уменьшением сопротивления излучения свернутого вибратора. Сопротивление излучения определяет мощность переизлучения пассивного вибратора, помещенного во внешнее СВЧ-поле. Оно определяется выражением

$$R_w = \frac{\int \operatorname{Re}[\mathbf{J}(l)(\mathbf{E}(l) - \mathbf{E}_0(l))] dl}{|J|_{\max}^2}, \quad (3)$$

где  $|J|_{\max}$  — максимальная амплитуда тока в распределении вдоль вибратора. Распределение амплитуды тока близко к косинусоидальному с нулем на его концах. Мощность излучения является числителем в выражении (3). При величине зазора  $\Delta$ , равном длине инициатора  $2L$ , вибратор является обычным прямым полуволновым вибратором с хорошо известной величиной сопротивления излучения  $R_w = 73 \Omega$ , а при уменьшении отношения  $\Delta/2L$  прямолинейный вибратор сворачивается в незамкнутое кольцо и его сопротивление излучения уменьшается. Величина  $R_w$  может быть аппроксимирована следующей формулой:

$$R_w \approx \sqrt{10^2 + \left(72 \frac{\Delta}{2L}\right)^2}. \quad (4)$$

Потери на переизлучение ограничивают индуцированный ток в резонансе, и добротность резонансного вибратора, которая может быть оценена формулой (5), возрастает при уменьшении сопротивления излучения

$$Q \approx \frac{2\pi \ln(1/ka)}{cR_w}, \quad k = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad (5)$$

где  $a$  — малый радиус инициатора.

Максимальная амплитуда поля создается в зазоре между концами вибратора, имеющего форму петли, где  $a < \Delta \ll 2L$ . Это можно увидеть на рис. 3, который

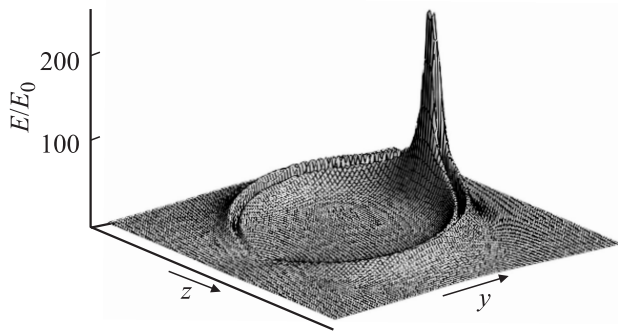


Рис. 3. Распределение амплитуды электрического поля вокруг кольцевого вибратора резонансной длины.

демонстрирует пространственное распределение амплитуды электрического поля вокруг изогнутого вибратора. Величина коэффициента увеличения  $\eta$  превышает 200. Нужно отметить, что распределение поля, коэффициент увеличения поля, добротность и т.д. зависят только от отношения размеров вибратора к длине волны. Увеличение поля изогнутым вибратором очень чувствительно к значениям его главного радиуса.

Если мы хотим работать в резонансном режиме, относительная погрешность для величины радиуса петли должна быть меньше, чем величина, обратная добротности  $Q$ . Точная настройка таких вибраторов — серьезная и сложная работа.

Далее были проведены исследования резонансных свойств кольцевого вибратора. Они проводились с использованием вакуумной рабочей камеры. Методика эксперимента была следующая. Из нержавеющей проволоки диаметром  $d = 1$  mm были изготовлены несколько кольцевых вибраторов разного диаметра  $D$  с соответствующим периметром  $Pe \equiv \pi D - \Delta$ . Они представляют собой разрезанное кольцо с зазором  $\Delta = 1$  mm. Опыты проводились при мощности излучения  $0.7$  kW и длительности облучения  $\tau_{\text{pul}} = 0.5$  s. Напряженность поля в области инициатора  $E_0 = 130$  kV/cm. Давление в камере постепенно снижалось до тех пор, пока при подаче импульса СВЧ-излучения не фиксировался разряд в зазоре кольца. Это давление фиксировалось. На рабочий столик устанавливалась петля с другим значением  $Pe$ . Опыт повторялся.

Был получен ряд точек пробойного давления  $p_{\text{br}}$  в зависимости от значения  $Pe$ . Зависимость представлена на рис. 4. Поскольку критическое поле пробоя пропорционально давлению газа при фиксированной (комнатной) температуре для столкновительного режима ( $(\omega\tau_{\text{tr}})^2 \ll 1$ ), то полученная кривая интерпретируется как резонансная кривая вибратора. Как видно, резонансное значение периметра заметно меньше полудлины волны. Сказывается возрастание эквивалентной емкости при сближении концов вибратора, что вызывает соответствующее уменьшение эквивалентной индуктивности, определяемой длиной периметра.

Эксперименты показали, что принципиально все типы исследованных инициаторов могут быть использованы для решения поставленной задачи в конкретных условиях. Но в ходе опытов было установлено, что наиболее удобным для выполнения поставленной цели в аэродинамическом эксперименте [7] применение кольцевого ЭМ-вибратора наиболее целесообразно. Это связано с двумя обстоятельствами. Во-первых, коэффициент увеличения поля в зазоре достаточно велик, чтобы при небольших полях излучения зажечь разряд. Во-вторых, он является относительно компактным и позволяет легко локализовать СВЧ-разряд в необходимой области. Это является по существу одним из критических факторов отбора, т.к. модель, используемая в аэродинамическом эксперименте, невелика. Ее размеры  $200 \times 200$  mm при максимальной толщине, не превышающей 20 mm.

По условиям эксперимента электроды инициаторов должны быть смонтированы заподлицо с диэлектрической поверхностью обтекаемой модели, поэтому было необходимо определить влияние на характеристики вибраторов диэлектрической поверхности, т.е. влияние изменения межэлектродной емкости в зазоре.

ЭМ-инициатор кольцевого типа представляет собой резонансную систему. Поэтому амплитуда ЭМ-поля в зазоре инициатора и соответственно его способность инициировать разряд определяются величиной его добротности  $Q = \rho/R$ , где  $R$  — омическое сопротивление,  $\rho = \sqrt{L/C}$  — импеданс резонаторной системы. При

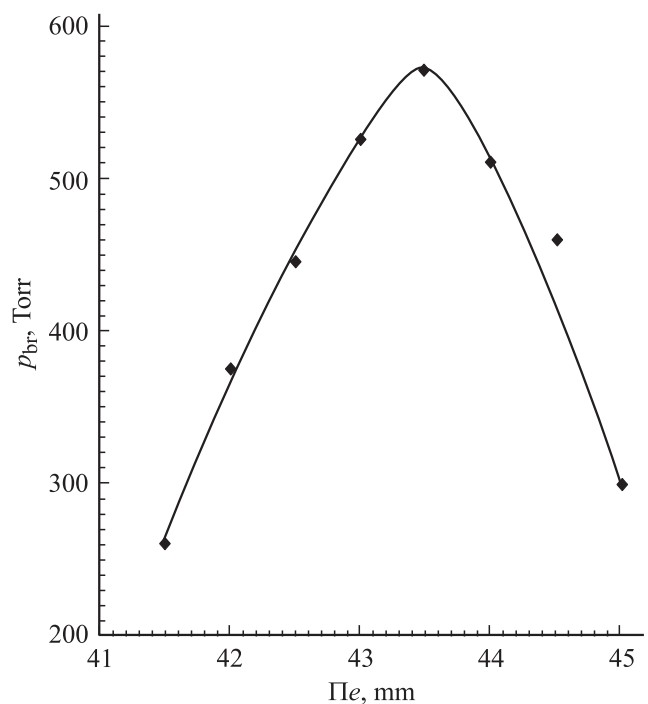
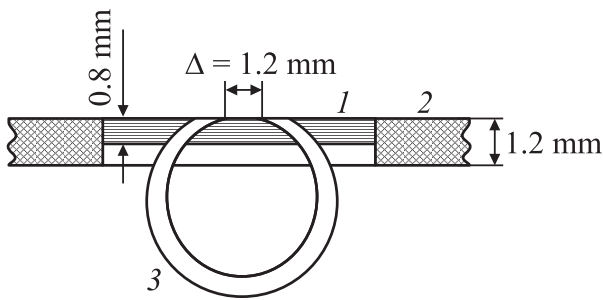


Рис. 4. Резонансная характеристика кольцевого ЭМ-вибратора в виде разрезанного кольца с зазором 1 mm.



**Рис. 5.** Инициатор с низкой межэлектродной емкостью: 1 — керамика, 2 — текстолит, 3 — кольцевой инициатор.

установке инициатора на диэлектрической поверхности увеличивается емкость зазора  $C$ , индуктивность  $L$  не изменяется. Следовательно, уменьшается добротность вибратора  $Q$  и в конечном счете его способность инициировать разряд. Рассчитать достаточно точно резонансные параметры кольцевого вибратора с концами, погруженными в слой диэлектрика, сложно, в частности, из-за того, что не известны точно характеристики материала, на котором установлены инициаторы. Подбор оптимального межэлектродного расстояния определялся опытным путем и варьировался в пределах от 1 мм до 1.5 мм.

В результате расчетов и экспериментальной оптимизации была разработана конструкция инициатора с низкой межэлектродной емкостью (рис. 5), которая и была использована в дальнейшей работе.

Во время исследования резонансных характеристик инициаторов с диэлектриком было обнаружено негативное воздействие плазмы СВЧ-разряда на поверхность модели. По этой причине был выполнен цикл исследований по изучению этого явления и выбору материала, стойкого к эрозионному воздействию плазмы и пригодного для применения в реальной конструкции модели. В результате многочисленных испытаний остановились на применении облицовочной керамики.

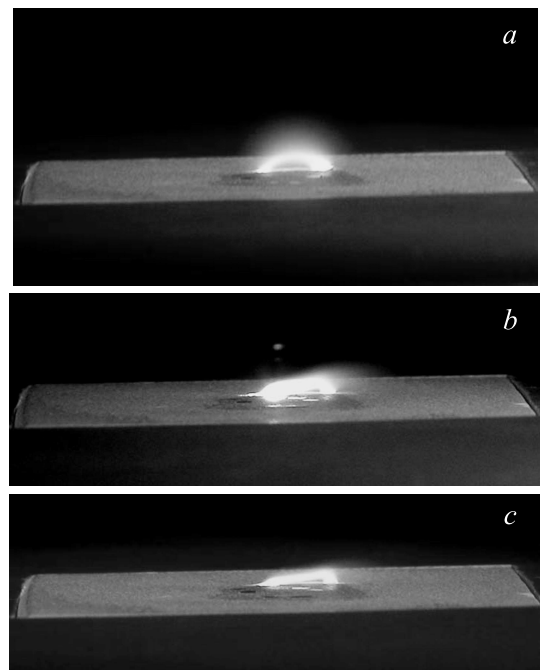
#### 4. Пространственно-временные характеристики поверхностного СВЧ-разряда в кольцевом инициаторе

Диапазон скорости воздушного потока, в котором необходимо создавать СВЧ-разряды в аэродинамическом эксперименте, составлял не более 35 м/с. То есть пролетные времена в междуэлектродном пространстве кольцевого инициатора даже при  $\Delta = 1.2$  мм составляют более 50 нс. Физические процессы, которые отвечают за формирование структуры и основные характеристики стримерного глубоко подкритического СВЧ-разряда, имеют характерные времена на порядки меньше. Поэтому характеристики разряда в потоке со столь малой

скоростью, конечно же, изменятся мало. Но геометрическая структура разряда, его локализация в пространстве могут несколько измениться. Чтобы оценить характер и масштаб этих изменений были проведены экспериментальные исследования структуры разряда при разных скоростях потока и уровнях СВЧ-мощности.

Рабочая экспериментальная модель кольцевого вибратора, настроенного в резонанс, устанавливалась на рабочий стол. Производилось фотографирование поверхностного СВЧ-разряда. На рис. 6 приведены интегральные по времени фотографии разряда при скорости потока  $v = 0$  м/с (а),  $v = 15$  м/с (б) и  $v = 30$  м/с (в), направление потока — слева направо. СВЧ-мощность — 1.2 кВт, длительность импульса излучения —  $\tau = 1$  с. Время экспозиции — 1 с.

На фотографиях видно, что в неподвижном воздухе светящаяся область разряда между электродами имеет форму дуги. Причиной появления такой формы разряда является конвекция. При увеличении скорости потока разрядный канал прижимается к поверхности, особенно у верхнего по потоку электрода. Наблюдается также светящийся шлейф вниз по потоку за разрядом. Уменьшение подводимой мощности не вызывает заметного изменения светящейся зоны разряда. Изменились только яркость свечения каналов и их толщина. Также было доказано, что в каждый момент времени СВЧ-разряд представляет собой очень тонкий высокотемпературный плазменный канал. Эти особенности инициированного глубоко подкритического СВЧ-разряда имеют большое значение, поскольку позволяют судить о динамике нагрева воздуха и образования вихревой структуры в пограничном слое потока на модели.



**Рис. 6.** Внешний вид области СВЧ-разряда.



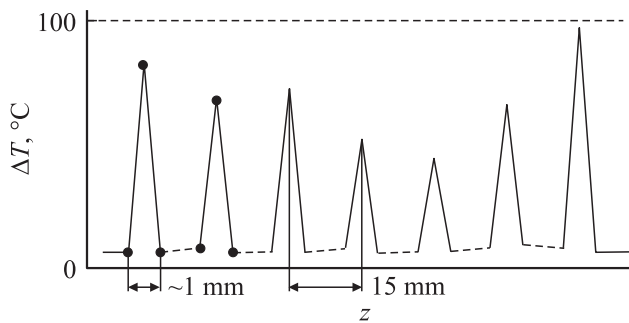


Рис. 7. Распределение температурного поля в следе системы разрядов.

## 5. Распределение температурного поля в следе системы СВЧ-разрядов

Следующим шагом было изучение распределения температурного поля в следе СВЧ-разрядов. Для этого кольцевые инициаторы СВЧ-разрядов были установлены на плоской диэлектрической пластине толщиной 2 мм с расстоянием между ними 15 мм. Скорость потока воздуха 20 м/с. Термопара была установлена на расстоянии 20 мм от линии расположения инициаторов.

Качественное распределение температурного поля в следе системы разрядов на такой модели показано на рис. 7. Полученные результаты в очередной раз подтвердили правомерность положенной в основу эксперимента концепции.

## 6. Полная аэродинамическая модель

Полученный в ходе экспериментальных и теоретических исследований опыт позволил разработать и успешно испытать в аэродинамической трубе полноразмерную модель с 19 инициаторами разряда с шагом 10 мм. Внешний вид модели показан на рис. 8. Данная конструкция тестируемой модели обеспечила стабильную генерацию всех разрядов.



Рис. 8. Внешний вид модели, установленной в рабочей камере.

## 7. Результаты энергетических оценок системы СВЧ-разрядов

Одним из центральных вопросов при определении эффективности разрабатываемого метода управления потоком является оценка выделяемой в одиночном СВЧ-разряде и в системе разрядов на поверхности модели в целом величины мощности СВЧ-излучения. Такая постановка вопроса совершенно необходима, так как условия аэродинамического эксперимента (необходимость дистанционного возбуждения системы инициаторов в реальной, далеко не оптимальной электродинамической системе рабочей камеры при заданной длине волны ЭМ-излучения) накладывают жесткие ограничения на „экспериментальную“ эффективность метода. Только оценки уровня поглощаемой в СВЧ-разрядах мощности дают истинное представление об эффективности и перспективах разрабатываемого метода.

Эксперименты показали, что разряды поглощают практически всю энергию, проходящую через него. Поэтому при оптимальном сопротивлении инициатора (при оптимальном размере) общее значение СВЧ-мощности  $P_{\text{dis}}$ , выделенное в разрядах, составляет

$$P_{\text{dis}} = P_{\text{gen}} \frac{S_0}{D^2} = P_{\text{gen}} \frac{(L + \frac{\lambda}{2})(\frac{\lambda}{2})}{4D^2}, \quad (6)$$

где  $D \approx 30$  см было получено из геометрических размеров рабочей камеры,  $S_0$  — эффективная поглощающая площадь равномерно распределенного поля по всей системе,  $L$  — длина системы инициаторов, в нашем случае 20 см, длина волны  $\lambda = 12.5$  см.

В экспериментах максимальная выходная мощность СВЧ-генератора в импульсном режиме достигала  $P_{\text{gen}} = 8$  кВт. Длительность импульса была 100 мс, частота импульсов 500 Гц. Подставляя значения в формулу, находим значение СВЧ-мощности, поглощенное разрядами:  $P_{\text{dis}} \approx 360$  Вт. Так как наша система состоит из  $N = 19$  инициаторов, то мощность, приходящаяся на один разряд, составляет 18 Вт.

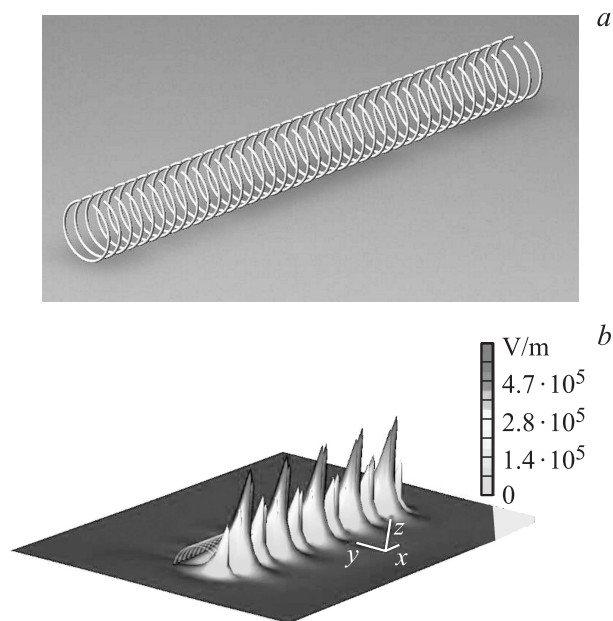
Это значение делится на коэффициент заполнения периода импульса  $q = 20$ , следовательно, средняя мощность, выделявшаяся в одном разряде, составляет 1 Вт

$$P_{\text{dis1}} = \frac{P_{\text{dis}}}{q} \sim 1 \text{ W.}$$

Полученные оценочные значения поглощаемой в разрядах мощности как нельзя лучше характеризуют эффективность метода, если учесть, что и при этих значениях в аэродинамическом эксперименте видны положительные результаты [8].

## 8. Новые методы создания регулярной структуры СВЧ-разрядов

Во время аэродинамического эксперимента выяснилось, что для большего аэродинамического эффекта



**Рис. 9.** Система 40 инициаторов резонансной длины с периодом 5 мм (а) и распределение ЭМ-поля системы (b).

необходимо создать систему инициаторов с меньшим шагом около 5 мм. Но это оказалось совсем непростой задачей. Система, состоящая из 40 кольцевых инициаторов с шагом 5 мм, показана на рис. 9, а. Геометрические параметры каждого инициатора такие же, какие были использованы в натурных экспериментах (см. раздел 4). Компьютерное моделирование показало: если расстоя-

ние между инициаторами меньше, чем их диаметр, т.е. когда электродинамическое сопротивление становится больше, чем некое критическое значение, возбуждается многомодовая структура, инициаторы начинают взаимно влиять друг на друга. Пространственное распределение ЭМ-поля вдоль такой системы инициаторов показано на рис. 9, b. Получение равномерного распространения ЭМ-поля в резонансном режиме очень сложная задача. Достаточно устойчиво зажечь разряды с заданным малым периодом такой системой в эксперименте не удалось. Можно попробовать использовать нерезонансный режим, например, сделать кольцевые инициаторы с большим диаметром. Но тогда потребуются сильное увеличение мощности СВЧ-излучения в несколько сот раз.

Одной из конструкций инициаторов с однородным распределением поля по зазорам и выделяемой в разрядах мощности может стать структура трубчатого типа [9], внешний вид которой показан рис. 10, а. Ее геометрические размеры: длина 20 см, радиус 0,9 см, расстояние между инициаторами 5 мм. Соответствующая пространственная структура ЭМ-поля вдоль оси этой системы инициаторов показана на рис. 10, b. Видно, что распределение ЭМ-поля вдоль оси рассмотренной системы вибраторов практически однородное в сравнении с предыдущей системой.

Создание модели на базе этой трубчатой системы является следующим шагом по изучению влияния мультисистемы СВЧ-разрядов на свойства аэродинамической модели в потоке воздуха.

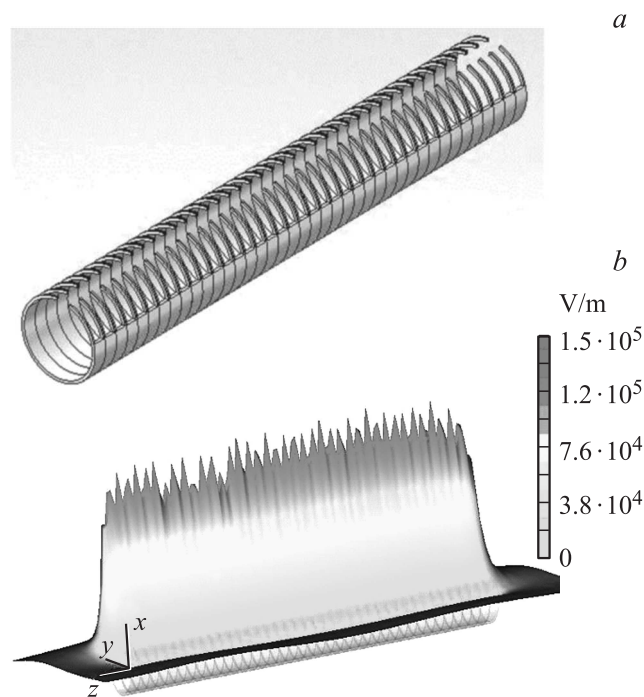
## Заключение

В результате исследований выбран тип инициатора для создания глубоко подкритического СВЧ-разряда. Показано, что кольцевой ЭМ-вибратор обладает набором свойств, который делает его наиболее удобным для решения задачи создания поперечного регулярного температурного распределения на поверхности аэродинамической модели.

Исследования электродинамических свойств резонансных вибраторов, их систем и свойств иницируемых разрядов в потоке показали, что разработанная модель единичного инициатора на основе кольцевого вибратора может являться основой для создания системы, пригодной для использования в определенном классе аэродинамических экспериментов.

При проведении совместных исследований в Национальном авиационном университете (Киев) показана эффективность разрабатываемого метода управления потоком. Положительная реакция пограничного слоя потока на контролирующий фактор наблюдается уже при крайне малых уровнях поглощаемой в разрядах энергии СВЧ-излучения.

Выявленные в процессе исследований недостатки описанных систем инициаторов (трудности в настройке,



**Рис. 10.** Система СВЧ-инициаторов трубчатого типа (а) и распределение ЭМ-поля данной системы (b).

ограничения по малости периода, особенности СВЧ-питания) требуют дальнейшего поиска более универсальных устройств, пригодных не только для лабораторных исследований, но и для практических применений.

За помощь в работе и полезные дискуссии авторы благодарят Л.П. Грачева и Н.Ф. Юрченко.

Работа выполнена при финансовой поддержке European Office of Aerospace Research and Development в рамках гранта CRDF GAP #UKE2-1508-KV-07.

## Список литературы

- [1] *Yurchenko N., Delfs J.* Fluid Mechanics and Its Applications / Ed. by G.E.A. Meier, P.R. Viswanath. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1999. Vol. 53. P. 217–222.
- [2] *Balcer B.E., Franke M.E., Rivir R.B.* // Proc. of the 44<sup>th</sup> AIAA ASME. Reno. Nevada. USA. 2006. AIAA. 2006. P. 875.
- [3] *Font G.I.* // Proc of the 42<sup>nd</sup> AIAA ASME. Reno. Nevada. USA. 2004. AIAA 2004. P. 3574.
- [4] *Zhukov V.P., Rakitin A.E., Starikovskii A.Yu.* // J. Propul. Rower. 2008. Vol. 24. N 1. P. 88–93.
- [5] *Khodataev K.V.* // Proc. of the 45<sup>th</sup> AIAA ASME. Reno. NV. USA. 2007. AIAA 2007. P. 0431.
- [6] *Бычков В.Л., Есаков И.И., Грачев Л.П., Раваев А.А., Ходатаев К.В., Юрченко Н.Ф.* // Тр. VI Междунар. симпозиума „Термохимические процессы в плазменной аэродинамике“, СПб., 2008. С. 27–29.
- [7] *Esakov I.I., Grachev L.P., Khodataev K.V., Ravaev A.A., Yurchenko N.F., Vinogradsky P.M., Zhdanov A.A.* // Proc. of the 47<sup>th</sup> AIAA ASME. Orlando. Florida. USA. 2009. AIAA. 0889.
- [8] *Yurchenko N.F., Paramonov Yu.A., Vinogradsky P.M., Zhdanov A.I., Esakov I.I., Ravaev A.A.* // Proc. of the 47<sup>th</sup> AIAA ASME. Orlando. Florida. USA. 2009. AIAA. P. 1227.
- [9] *Khodataev K.V.* // Proc. of the 47<sup>th</sup> AIAA ASME. Orlando. Florida. 2009. USA. AIAA. P. 1228.