

03

## Электродинамическая модель камеры сгорания, использующей инициированный подкритический стримерный разряд для поджигания топливной смеси

© П.В. Булат,<sup>1</sup> К.Н. Волков,<sup>2</sup> И.И. Есаков,<sup>3</sup> П.Б. Лавров,<sup>3</sup> А.А. Раваев<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Балтийский государственный технический университет „ВОЕНМЕХ“ им. Д.Ф. Устинова, 190005 Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Университет Кингстона, SW15 3DW Лондон, Великобритания

<sup>3</sup> Московский радиотехнический институт РАН, 117519 Москва, Россия  
e-mail: dsci@mail.ru

Поступило в Редакцию 3 января 2022 г.

В окончательной редакции 24 февраля 2022 г.

Принято к публикации 25 февраля 2022 г.

Рассмотрены различные электродинамические модели камеры сгорания, в которой для поджига горючей смеси применяется инициированный подкритический стримерный разряд. Для локализации разряда в рабочей камере применяются инициаторы разряда на основе полуволновых электромагнитных вибраторов, обладающие резонансными свойствами. На основе численных расчетов получены зависимости структуры электрических полей, формирующих разряд, от геометрических параметров инициатора разряда, а также рассмотрены вопросы согласования камеры с генератором излучения. Сравнены варианты расчетов при различном расположении инициатора разряда по отношению к оптической оси камеры. Обсуждены возможности по дальнейшему усилению поля в рабочей зоне на полюсах инициатора СВЧ разряда, что требуется для формирования разрядов с развитой стримерной структурой при повышенных давлениях газа в камере сгорания. Определены пути повышения результирующего электромагнитного поля в области вибраторов для формирования разрядов с объемной структурой.

**Ключевые слова:** СВЧ излучение, стримерный разряд, электродинамическая модель, плазменное горение, камера сгорания.

DOI: 10.21883/JTF.2022.05.52371.1-22

### Введение

Применение инициированных микроволновых разрядов для поджига горючих смесей в камере высокого давления позволяет не только создавать такие разряды при существенно меньшей мощности источника СВЧ энергии, но и локализовать их в рабочей камере в нужном месте [1]. Сравнительные исследования процесса зажигания горючей смеси искровым разрядом от свечей стандартной конфигурации и инициированных СВЧ разрядов проведены в работе [2]. Результаты исследований показали, что зажигание с применением СВЧ разряда энергетически значительно эффективнее искрового [3]. Кроме того, горючая смесь поджигается СВЧ разрядом тем лучше, чем более разветвленную систему плазменных каналов он имеет [4]. Полученные результаты представляют интерес для создания и применения неравновесных СВЧ разрядов для поджига и интенсификации горения топлив в высокоскоростных потоках [5,6].

Свойства свободно локализованных СВЧ разрядов в сфокусированном пучке квазиоптического излучения изучены достаточно хорошо [7,8]. Разработаны также различные подходы к моделированию распространения

СВЧ излучения в волноводах с различной формой поперечного сечения [9,10]. Широкий круг теоретических, экспериментальных и численных исследований микроволнового разряда в воздухе, включая энергоподвод в сверхзвуковой поток, приводится в работах [11–15].

Для локализации разряда в рабочей камере применяются инициаторы на основе полуволновых электромагнитных вибраторов. Наиболее хорошо изученным типом инициатора СВЧ разряда является линейный электромагнитный вибратор. К его достоинствам следует отнести простоту конструкции, известные зависимости поля вблизи концов от различных факторов, а также возможность обеспечения пробоя среды при высоких значениях показателя подкритичности исходного поля. Теория и методы расчета инициаторов различных конструкций даются в работе [16]. Влияние проводимости, геометрические размеры и формы инициатора и их группы на локальные свойства индуцируемых электромагнитных полей рассматриваются в работе [17].

Расположение инициатора разряда вблизи металлического экрана или на поверхности диэлектрического экрана предоставляет дополнительные возможности по усилению поля [18]. При этом инициатор разряда представляет собой кусок металлической проволоки с

закругленными концами. В целом чем меньше радиус законцовки и чем ближе резонатор к экрану, тем больше коэффициент усиления поля [19,20]. В случае диэлектрического экрана резонатор размещается непосредственно на его поверхности. Максимум интенсивности поля в этом случае наблюдается в пространстве, образованном поверхностью экрана и радиусной законцовкой резонатора [4]. В условиях резонанса в проводнике возникает большой индуцированный ток, а в окрестности инициатора происходит ионизация газа, образуются плазменные каналы, нагревающие окружающий газ [21,22].

Проведенные исследования показали, что установка электромагнитного вибратора на малом расстоянии от металлического экрана позволяет реализовать пробой воздуха при мощности излучения, существенно меньшей той, которая необходима для реализации пробоя в неограниченном пространстве [23] (глубоко подкритический стримерный разряд). В работе [18] предложен энергетически эффективный метод управления пограничным слоем путем создания на поверхности модели регулярной системы локализованных микроволновых разрядов, формируемых в поле квазиоптического электромагнитного пучка удаленного источника СВЧ энергии.

Структура СВЧ полей в разрядной камере, используемой для получения электродного разряда, исследована в работе [19]. Численное моделирование позволяет количественно определить детали конструкции разрядной камеры, оптимальные для генерации разряда. Получена зависимость структуры электрических полей, формирующих разряд, от геометрических параметров разрядной камеры, а также рассмотрены вопросы согласования разрядной системы с генератором.

В рамках выполнения прикладных научных исследований создана комплексная экспериментальная установка в составе мощного импульсного СВЧ генератора и трубы высокого давления, имитировавшей камеру сгорания [3]. Установка оснащена системой измерения давления в рабочей камере, позволяющей измерять как статическое давление, так и процесс изменения давления во времени с разрешением менее  $1 \mu\text{s}$ . Кроме того, имеется возможность регистрации оптического излучения из рабочей камеры через продольное окно.

В проведенных ранее экспериментах СВЧ излучение подводилось в камеру с помощью плоского прямоугольного рупора через одну из боковых щелей с радио-прозрачным диэлектрическим окном. Такая же щель с окном с противоположной стороны трубы служила для визуального наблюдения и фотосъемки формируемых разрядов. Импульсная мощность применяемого источника СВЧ излучения составляла  $P = 500 \text{ kW}$ , рабочая частота —  $f_0 = 2.795 \text{ GHz}$  (длина волны —  $\lambda = 10.7 \text{ cm}$ ), длительность импульсов —  $\tau = 2-6 \mu\text{s}$ .

Инициаторы представляли собой полуволновые линейные вибраторы в виде отрезков металлической проволоки с закругленными концами и располагались на оси камеры и одновременно параллельно вектору поляризации СВЧ излучения. Результаты исследований, вы-

полненных в работах [1–3], продемонстрировали принципиальную возможность реализации и перспективность применения СВЧ систем зажигания в камерах сгорания высокого давления. При этом инициированные СВЧ разряды имели вид единичных стримеров ограниченной протяженности, что объясняется короткой длительностью импульсов источника излучения. Одним из путей повышения эффективности изучаемых систем СВЧ зажигания при тех же энергетических параметрах источника СВЧ излучения является формирование разрядов с развитой объемной стримерной структурой [21,22].

Опыт работы с микроволновыми разрядами в газах при атмосферном и повышенном давлении в свободном пространстве показывает, что развитая структура разряда может быть реализована при дальнейшем увеличении возбуждающего разряд электрического поля на полюсах электромагнитного вибратора [1]. При этом большое значение имеют характер и степень изменения результирующего электромагнитного поля на полюсах вибратора в процессе развития разряда. Для формирования разрядов с развитой стримерной структурой при повышенных давлениях газа в камере сгорания необходимо дальнейшее усиление поля в рабочей зоне на полюсах инициатора СВЧ разряда.

С физической точки зрения возможны два разных подхода к созданию системы СВЧ зажигания в рабочей камере: расположение электромагнитного вибратора перпендикулярно оптической оси камеры и параллельно ей с соответствующим изменением поляризации поля и конструкции ввода электромагнитного излучения в камеру. В настоящей работе рассматривается построение трехмерной электродинамической модели СВЧ системы зажигания в цилиндрической камере сгорания, в которой вибратор располагается перпендикулярно оптической оси камеры. Находится пространственное распределение и амплитуда электромагнитного поля в системе как до, так и после генерации разряда. На основе проведенных расчетов обсуждаются пути повышения результирующего поля в области вибраторов для формирования разрядов с объемной структурой.

## 1. Ввод излучения в камеру

Вследствие поляризации излучения (вектор  $\mathbf{E}$  параллелен оси линейного вибратора) возможны лишь два варианта ввода излучения в камеру: ввод с помощью плоского рупора и плоского волновода через боковое продольное окно в камере.

Модель рабочей камеры с рупорным вводом СВЧ излучения показана на рис. 1. В модели применен обычный для подобных конструкций чисто электродинамический программный прием: стенки камеры, фланцы и другие металлические элементы отсутствуют за ненадобностью, так как под внешним пространством предполагается идеальный проводник. В модели присутствуют только внутренние части конструкции, которые видит

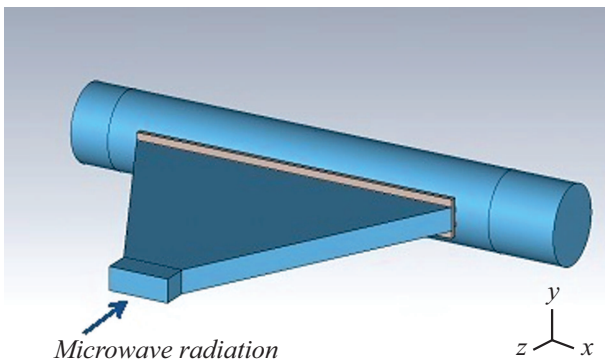


Рис. 1. Рупорный ввод СВЧ излучения.

электромагнитная волна. Электродинамическая модель включает области с диэлектрической проницаемостью, равной единице (вакуум), и боковые окна из оргстекла (полиметилметакрилата). Вибратор представляет собой кусок металлической проволоки с закругленными концами.

Один из способов увеличения поля в области вибратора заключается в замене рупора на регулярный волновод с концентрацией потока энергии СВЧ излучения вблизи выходной апертуры волновода. При этом волноводы с круглым поперечным сечением практически не применяются, так как в них трудно сохранить требуемую поляризацию электромагнитной волны. В волноводе с прямоугольным сечением эта проблема не возникает. Тип распространяющейся по нему электромагнитной волны зависит от способа его возбуждения и размеров поперечного сечения. На практике чаще всего используется простейший тип электромагнитной волны —  $H_{10}$ .

## 2. Математическая модель

Для нахождения распределения вектора напряженности электрического поля на рабочей частоте решаются уравнения Максвелла, записанные в частотно-зависимой форме, внутри разрядной камеры с проводящими стенками всех составляющих деталей конструкции. Используя определение напряженности электрического поля через скалярный и векторный потенциалы и лоренц-калибровку, связывающую оба потенциала, получим уравнение

$$\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{A}) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2},$$

где  $c$  — скорость света,  $\mathbf{E}$  — комплексная амплитуда электрического поля,  $\mathbf{A}$  — комплексная амплитуда вектор-потенциала, определяемого соотношением

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}) = -\frac{1}{c} \int_{V_1} \mathbf{j}(\mathbf{r}_1) \frac{\exp(iK|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}|)}{|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}|} dV_1,$$

где  $\mathbf{j}$  — плотность тока,  $\mathbf{r}_1$ ,  $\mathbf{r}$  — радиус-векторы элемента тока и точки, в которой определяется поле,  $V_1$  —

объем, в котором плотность тока отлична от нуля,  $k$  — волновое число.

В плоскости, через которую излучение поступает в систему, во всех расчетах возбуждается поперечная электромагнитная волна (ТЕМ) на рабочей частоте  $f_0$  при заданной мощности входного сигнала. В поле внешней электромагнитной волны вдоль оси  $x$  расположен тонкий проводник цилиндрической формы с длиной  $l$ , радиусом  $a \ll l$  и с конечной проводимостью  $s$ . Учитывая, что потери на границах области, потери малы по отношению к прочим потерям в системе, используется граничное условие идеального проводника (Perfect Electric Conductor, PEC).

Для реализации конкретного вида микроволнового разряда требуется электромагнитное поле с определенной амплитудой  $\mathbf{E}_0$ . Величина  $\mathbf{E}_0$  позволяет оценить плотность потока электромагнитной энергии в сечении пучка для линейно поляризованной ТЕМ-волны  $E_0^2/(2Z_0)$ , где  $Z_0 = 120\pi\Omega$ .

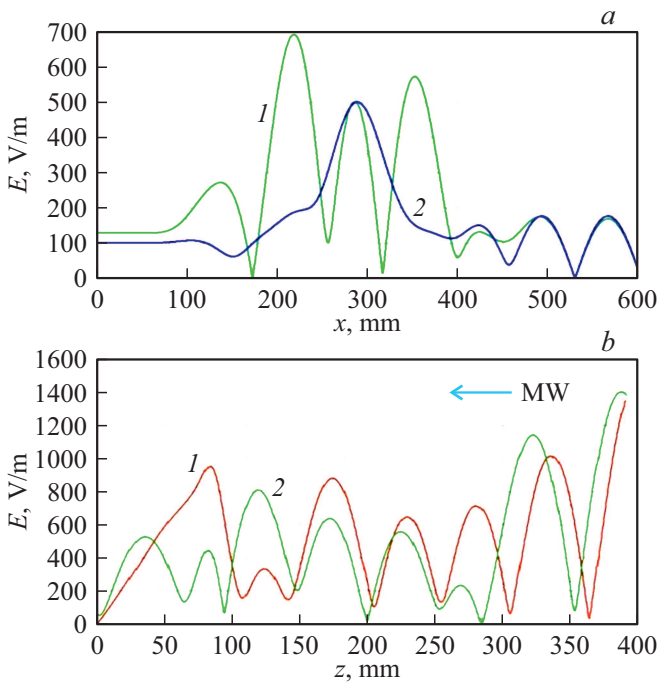
Тангенциальные составляющие векторов напряженности электрического и магнитного полей на границе раздела двух сред непрерывны. При изучении переменного электромагнитного поля вне металлических проводников на границе раздела с металлом проводники часто заменяются идеально проводящей средой. Эта замена основана на том обстоятельстве, что идеально проводящая среда достаточно правильно воспроизводит влияние реальных металлических проводников на электромагнитное поле вне их.

Для решения основных уравнений электродинамики применяется метод конечных элементов (Finite Element Method, FEM), включающий адаптивное генерирование и деление ячеек сетки. Решения для электромагнитного поля, найденные из уравнений Максвелла, позволяют точно определить все характеристики СВЧ устройства с учетом возникновения и преобразования одних типов волн в другие, потерь в материалах и на излучение и т. д.

## 3. Результаты и обсуждение

Рассмотрим вариант с расположением инициатора перпендикулярно оптической оси камеры и рупорным вводом СВЧ излучения. Перед моделированием системы зажигания в комплексе требуется определить наличие и степень влияния на начальную структуру электромагнитного поля в системе различного рода неоднородностей и элементов реальной конструкции камеры (ее окон с диэлектрическими вставками, „закоротки“ трубы камеры справа и смотрового диалектического окна слева, ступенек на концах трубы и др.).

Распределения напряженности электрического поля вдоль осей  $x$  и  $z$  показаны на рис. 2 для камеры с одним смотровым окном (линии  $l$ ). Присутствие в рабочей зоне любых неоднородностей приводит к существенному изменению распределения полей в камере. В качестве примера на рисунке показаны изменения амплитуды



**Рис. 2.** Распределения напряженности электрического поля вдоль осей  $x$  ( $a$ ) и  $z$  ( $b$ ). Линии 1 соответствуют камере с одним смотровым окном, а линии 2 — камере при наличии второго смотрового окна с противоположной рупору стороны.

электрического поля на оптической оси трубы камеры  $x$  и вдоль оси рупора  $z$  (отсчет координаты  $z$  ведется от противоположной рупору стенки трубы камеры) при введении второго смотрового окна с противоположной рупору стороны и одновременно установки в окна диэлектрических вставок из полиметилметакрилата (линии 2). Вставки из оргстекла служат для отделения рабочего объема камеры сжигания высокого давления от внешней среды и волноводного тракта. Имеют место не только резкие изменения в распределении полей, но и характерная для стоячей волны периодическая структура в правой части графиков у закоротки трубы справа (рис. 2,  $a$ ) и аналогичный вид графиков поля в рупоре и волноводе (рис. 2,  $b$ ). Распределения, приведенные на рис. 2,  $a$ , свидетельствуют о существенно неоднородном осевом распределении поля в рассматриваемой модели и его сильном отличии от классического косинусоидального распределения поля в плоском прямоугольном волноводе, возбуждаемом на низшем типе волны  $H_{10}$ .

Диаграмма электрической компоненты электромагнитного поля в реальной конструкции в сечении  $y = 0$  представлена на рис. 3. Указанные особенности распространения электромагнитного волны в системе, включая пятнистый характер поля, говорят о возбуждении высших типов волн в камере и сильном отражении СВЧ излучения в тракте. Сильное отражение излучения в исследуемой конструкции системы зажигания и рабочей камеры является характерной особенностью

рассматриваемых способов ввода СВЧ энергии сбоку и перпендикулярно оси камеры.

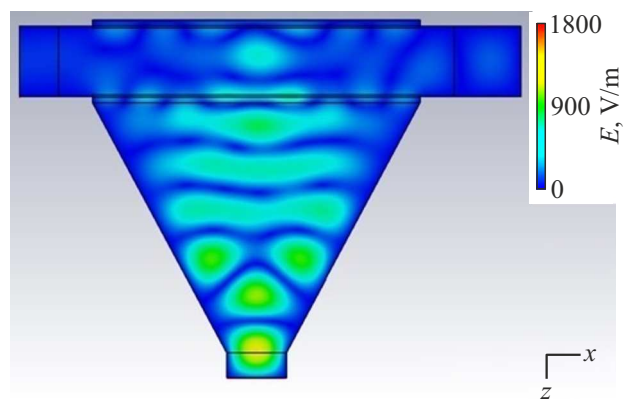
Установка в камере полуволнового электрического вибратора-инициатора СВЧ разряда приводит к перераспределению электромагнитных полей в системе.

Разработка и экспериментальные исследования СВЧ системы зажигания проводятся на фиксированной частоте излучения  $f_0 = 2.795$  GHz. Однако в ходе изучения электромагнитных полей в модельных электродинамических системах, подобных рассматриваемой, удобно представлять полученные результаты не только в пространстве, но и в определенном частотном диапазоне. Это позволяет наглядно описывать амплитудно-частотные характеристики системы и прогнозировать влияние тех или иных изменений в ней.

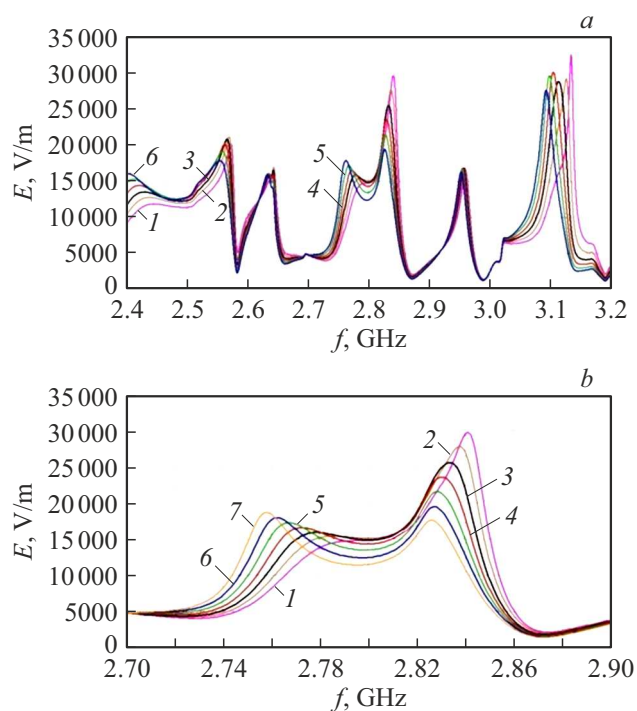
На рис. 4,  $a$  показано семейство частотных зависимостей амплитуды поля на полюсах электромагнитного вибратора при разных длинах вибратора  $L_v = 45-50$  mm в диапазоне частот 2.4–3.2 GHz. Для удобства полученные результаты приведены в более узком частотном диапазоне — вблизи рабочей частоты (рис. 4,  $b$ ). Во всех рассматриваемых случаях диаметр вибратора равняется 1 mm.

Указанные на графиках значения электромагнитного поля соответствуют нормированному значению мощности СВЧ излучения на входе в систему, равному 1 W. Для оценки истинной амплитуды электрического поля в нужной точке достаточно умножить приведенное на графике значение на корень квадратный из отношения реальной мощности излучения на входе системы к нормированной величине 1 W. Так, например, при мощности источника СВЧ излучения  $P = 500$  kW корень из указанного отношения равен приблизительно 707, и амплитуде поля на графике  $E_A = 10^4$  V/m соответствует реальное значение поля в привычных единицах  $E \approx 70$  kV/cm.

Амплитуда СВЧ электрического поля, при которой наблюдается электрический пробой воздуха и большинства реальных горючих смесей при атмосферном давлении приблизительно равна 30 kV/cm. Таким образом, во



**Рис. 3.** Начальное распределение напряженности электрического поля в сечении  $y = 0$  при отсутствии электромагнитного вибратора.



**Рис. 4.** Распределения амплитуды электрического поля на полюсах вибратора при разных длинах вибратора в широком (а) и узком (б) диапазоне частот при уменьшенной общей длине трубы на 120 мм при  $L_v = 45$  (1), 46 (2), 47 (3), 48 (4), 49 (5), 50 (6), 51 мм (7).

всем интервале представляющих практический интерес значений длины вибратора на рабочей частоте 2.8 GHz импульсная амплитуда электрического поля на полюсах вибратора более чем достаточна для пробоя газа не только при атмосферном, но и повышенном давлении в камере даже в исходных условиях (без какой-либо оптимизации геометрии и размеров системы).

Важная особенность, на которую необходимо обратить внимание при анализе графиков на рис. 4, состоит в многорезонансном характере электромагнитного поля в системе на частотной оси, принципиально отличающаяся от обычного вида резонансной кривой полуволнового вибратора в свободном пространстве. В отличие от электромагнитного вибратора в свободном пространстве его длина в интересующем интервале слабо влияет как на амплитуду поля на полюсах, так и на характеристики системы в целом.

С электротехнической точки зрения, рассматриваемая система с вибратором представляет собой уже не одиночный LC-контур, а систему связанных контуров со своими резонансами, определяемыми набором параметров системы — диаметром и протяженностью рабочей камеры, формой и размерами окон в камере, размерами и проницаемостью диэлектрических вставок в окнах и, естественно, размерами и расположением в камере электромагнитного вибратора. Указанная особенность изучаемой электродинамической системы практически

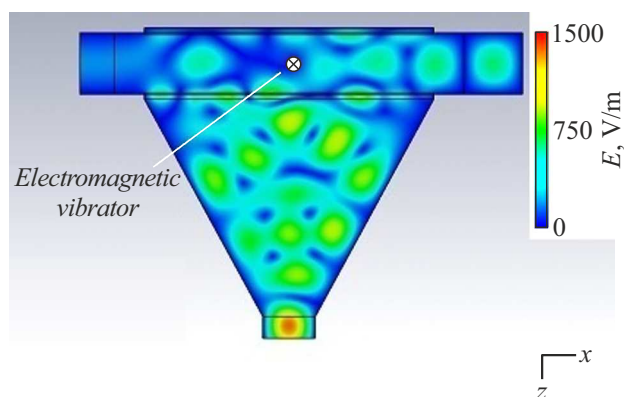
исключает возможность ее обычной настройки путем изменения геометрических размеров вибратора. Настраивать и оптимизировать необходимо всю конструкцию.

Диаграмма СВЧ поля в системе с вибратором в сечении  $y = 0$  представлена на рис. 5. В месте расположения вибратора (на рисунке указано крестиком) вблизи его центра амплитуда электрического поля при заданной поляризации равна нулю.

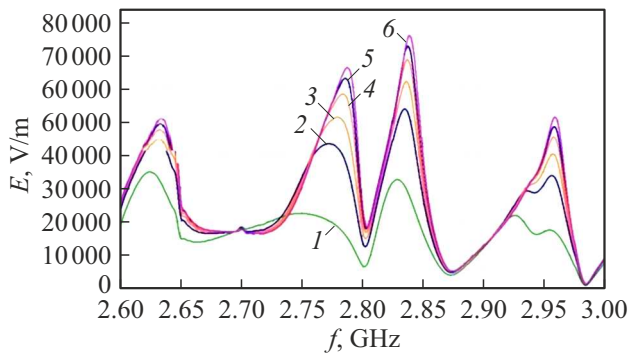
Другой важный вопрос состоит в определении возможных изменений амплитуды электромагнитного поля на полюсах вибратора после возникновения и развития стримерного СВЧ разряда. Построение точной физической модели вибратора с развитым объемным разрядом вряд ли возможно и оправдано с точки зрения временных затрат на моделирование из-за непрерывно меняющихся во времени структуры, размеров и других параметров разряда, а также отсутствия точных данных о проводимости отдельных структурных элементов разряда. Разумным выходом для качественного анализа и количественных оценок модели с разрядом является замена идеального проводника вибратора (Perfect Electric Conductor, PEC) на металл с конечной проводимостью.

Эквивалентная проводимость стримерного СВЧ разряда в процессе развития может меняться в широких пределах, вследствие чего меняется и эффективное сопротивление эквивалентного LCR-контра (под  $R$  понимается резисторный элемент). Необходимый диапазон изменения проводимости электромагнитного вибратора длиной  $L_v \sim 5$  см и диаметром 1 мм определяется исходя из представляющего реальный физический интерес диапазона изменения эквивалентного сопротивления такого контура.

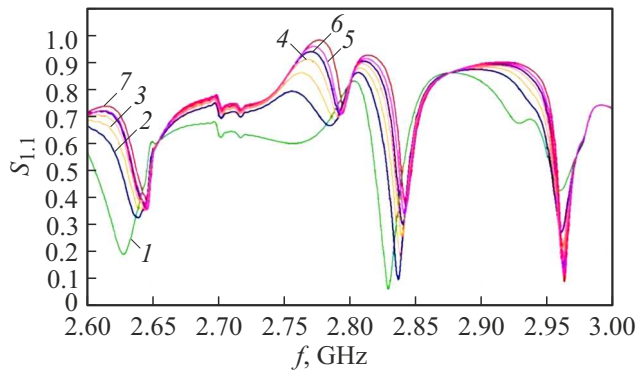
Соответствующие графики зависимости амплитуды поля на полюсах вибратора с выбранной на рис. 2 длиной  $L_v = 48$  мм представлены на рис. 6. В этой серии расчетов длина трубы вновь увеличена на 57 мм до реальных размеров, и на 70 мм увеличена длина ее правого участка с короткой в торце. Перепады кривых  $E(f)$  в центральной части стали более резкими, но провал и амплитуда вблизи рабочей частоты  $f_0 = 2.795$  GHz



**Рис. 5.** Распределение СВЧ электрического поля в сечении  $y = 0$  в камере с электромагнитным вибратором.



**Рис. 6.** Распределения амплитуды электрического поля на полюсах вибратора при длине  $L_v = 48$  mm и разных значениях проводимости вибратора  $\sigma = 10^2$  (1),  $10^3$  (2),  $3 \cdot 10^3$  (3),  $10^4$  (4),  $3 \cdot 10^4$  (5),  $10^5$  Cm/m (6).



**Рис. 7.** Распределения параметра  $S_{1,1}$  в волноводном тракте ввода СВЧ излучения в камеру при длине вибратора  $L_v = 48$  mm и разных значениях проводимости  $\sigma = 10^2$  (1),  $10^3$  (2),  $3 \cdot 10^3$  (3),  $10^4$  (4),  $3 \cdot 10^4$  (5),  $10^5$  Cm/m (6). Линия 7 соответствует PEC.

изменились незначительно. Влияние проводимости вибратора (эквивалентного сопротивления плазмы стримерного разряда), как и длины вибратора, на рис. 6 также несущественно.

Семейство графиков параметра  $S_{1,1}$  (коэффициент отражения) этой же модели показано на рис. 7. Параметр  $S_{1,1}$  представляет собой коэффициент отражения излучения по полю на входе в систему. В данном случае на рабочей частоте —  $S_{1,1} = 0.7-0.8$ . Энергетический коэффициент отражения по мощности, по-прежнему, является характеристикой всей системы, а не отдельного вибратора перед апертурой рупора, и на частоте  $f_0$  этот коэффициент превышает величину  $(S_{1,1})^2 \geq 0.5$ .

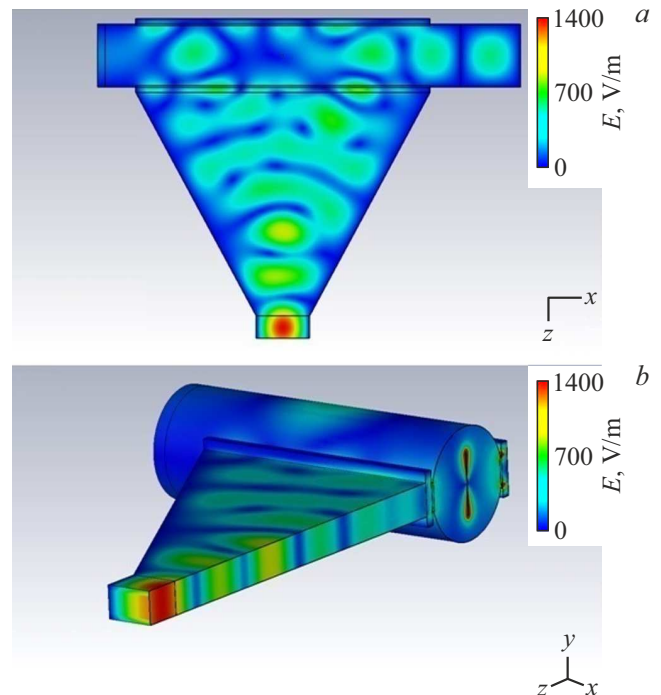
Диаграммы распределения электрического поля в двух сечениях модели при  $y = 0$  и  $x = 0$  при проводимости вибратора  $\sigma = 10^3$  Cm/m (эквивалентное сопротивление составляет  $100 \Omega$ ) представлены на рис. 8. В сравнении с диаграммой, приведенной на рис. 5, изменения распределения поля на рис. 8 крайне незначительны. Нижняя диаграмма иллюстрирует также резкое уси-

ление результирующего поля в области расположения вибратора вблизи его полюсов.

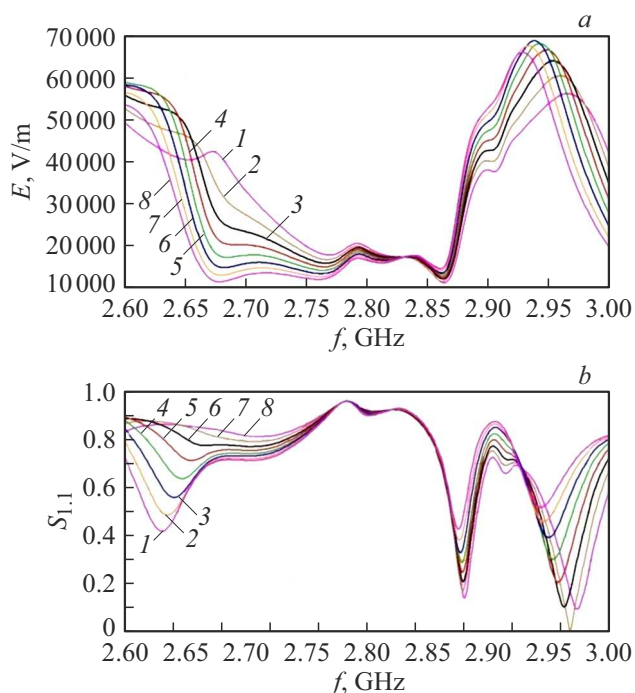
Как и в предыдущем случае, в системе образуется стоячая волна, и добиться чистого режима бегущей волны не удастся. Однако после возникновения и развития стримерного разряда амплитуда поля на полюсах вибратора и, очевидно, на концах стримеров падает не так быстро, как в случае электромагнитного вибратора в свободном пространстве. Другими словами, формирование и развитие стримерной объемной структуры разряда в течение СВЧ импульса должно проходить в практически неизменном темпе. Для формирования объемного стримерного СВЧ разряда остается лишь найти способ увеличения электрического поля на полюсах электромагнитного вибратора.

Рассмотрим вариант с расположением инициатора перпендикулярно оптической оси камеры и волноводным вводом СВЧ излучения.

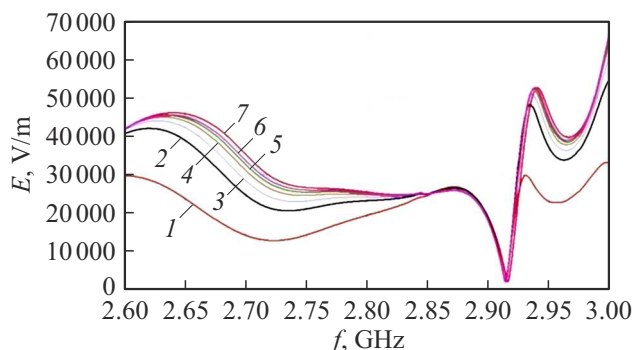
Семейства кривых амплитуды электрического поля на полюсах электромагнитного вибратора и параметра  $S_{1,1}$  при разных длинах вибратора приведены на рис. 9, а аналогичные зависимости при оптимальной длине вибратора  $L_v = 45$  mm и разных значениях его проводимости — на рис. 10. Полученные частотные зависимости сохраняют хоть и менее выраженный, но все тот же многорезонансный характер, формируемый эквивалентной системой связанных контуров с распределенными параметрами  $L$  и  $C$ .



**Рис. 8.** Распределения напряженности электрического поля в сечениях модели  $y = 0$  (a) и  $x = 0$  (b) с электромагнитным вибратором длиной  $L_v = 48$  mm и проводимостью  $\sigma = 1000$  Cm/m.

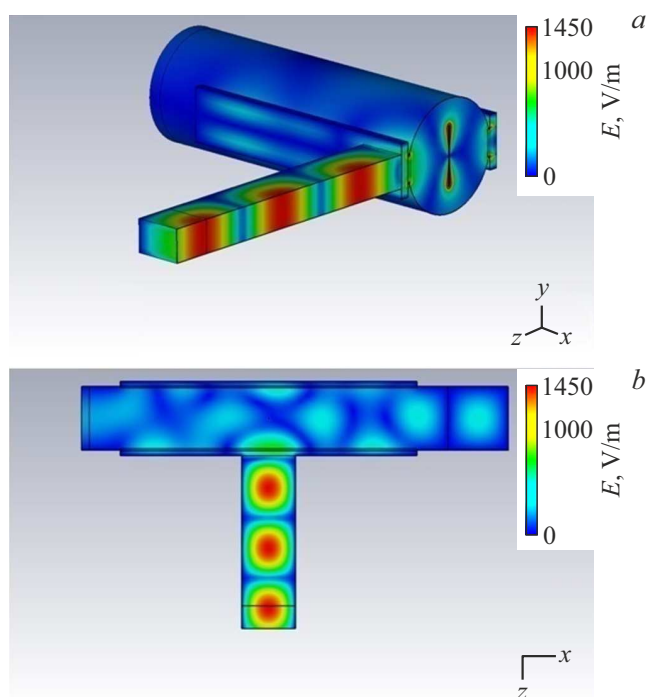


**Рис. 9.** Распределения амплитуды электрического поля на полюсах вибратора (а) и параметра  $S_{1,1}$  (b) для волноводного ввода СВЧ излучения при  $L_v = 45$  (1), 46 (2), 47 (3), 48 (4), 49 (5), 50 (6), 51 (7), 52 mm (8).

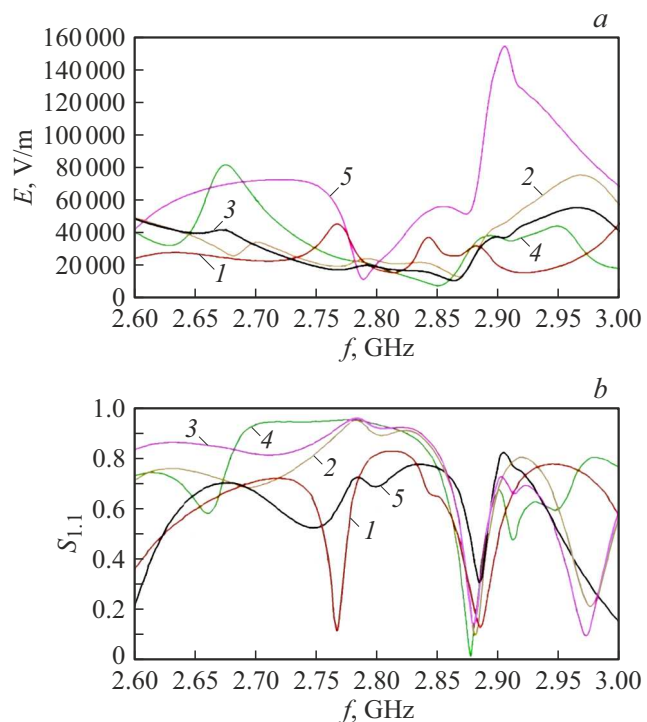


**Рис. 10.** Распределения амплитуды электрического поля на полюсах вибратора при длине вибратора  $L_v = 45$  mm и разных значениях проводимости  $\sigma = 10^2$  (1),  $10^3$  (2),  $3 \cdot 10^3$  (3),  $10^4$  (4),  $3 \cdot 10^4$  (5),  $10^5$  Cm/m (6). Линия 7 соответствует PEC.

Коэффициент отражения СВЧ излучения во входном волноводном тракте по мощности больше и превышает 80%. Влияние на характеристики системы параметров собственно вибратора, по-прежнему, невелико. В варианте системы с волноводным подводом СВЧ энергии амплитуда поля на рабочей частоте в условных единицах составляет около  $2 \cdot 10^4$  V/m, а при мощности во входном тракте 500 kW она достигает 140 kV/cm. При такой напряженности электрического поля и заданных параметрах вибратора возможна генерация СВЧ разряда при давлении газа в камере  $p = 4$  atm и более.



**Рис. 11.** Распределения напряженности электрического поля в сечениях модели  $y = 0$  (а) и  $x = 0$  (b) с электромагнитным вибратором длиной  $L_v = 48$  mm и проводимостью  $\sigma = 1000$  Cm/m.



**Рис. 12.** Распределения амплитуды электрического поля на полюсах вибратора (а) и параметра  $S_{1,1}$  (b) при длине вибратора  $L_v = 45$  mm и разной величине его смещения  $s = -30$  (1),  $-10$  (2), 0 (3),  $+15$  (4),  $+30$  mm (5).

В то же время из-за сильно неоднородного распределения поля на оси камеры вблизи апертуры рупора (в сравнении с равномерным косинусоидальным распределением) и усиления амплитуды в его центральной части выигрыш от применения волноводного ввода СВЧ излучения не так велик, как можно было ожидать.

Наличие явно выраженного режима стоячей волны в тракте и формирование на оси камеры неоднородного поля подтверждают приведенные на рис. 11 диаграммы электромагнитного поля в двух сечениях модели —  $x = 0$  и  $y = 0$  (используется нелинейная шкала).

Попытки дополнительной настройки и улучшения характеристик системы смещением вибратора по оси  $z$  на величину  $s$  в интервале от  $-30$  до  $+30$  mm не увенчались успехом (рис. 12). Полученные семейства кривых (параметры  $E_A$  и  $S_{1,1}$ ) носят еще более изрезанный характер, и выигрыша в амплитуде поля на полюсах вибратора не получено.

## Заключение

Выполнены моделирование и сравнение ряда представляющих практический интерес способов формирования инициированных СВЧ разрядов с развитой объемной структурой при ограниченной длительности импульсов электромагнитного излучения. Полученные результаты подтверждают возможность и перспективы применения в камерах сгорания высокого давления новых эффективных систем зажигания на основе инициированных СВЧ разрядов с развитой объемной структурой. Наибольший интерес представляет вариант размещения электромагнитных вибраторов в рабочей камере параллельно ее оси с соответствующим изменением ввода СВЧ излучения и конструкции камеры.

Полученные результаты имеют значение для исследования воздействия СВЧ разрядов различных типов на характеристики горения пропано-воздушной газовой смеси при повышенном давлении.

Перед принятием окончательно решения в вопросе модификации или радикальной модернизации рабочей камеры с системой зажигания представляется необходимым изучить и определить возможность применения других конструкций инициаторов разряда, в частности, четвертьволновых вибраторов с основанием на стенке рабочей камеры и полюсом в ее центральной части; кольцевых вибраторов с разрезом, возбуждаемых магнитной компонентой электромагнитного поля; криволинейных инициаторов в форме отрезка дуги, располагаемых вблизи стенок цилиндрической камеры с вводом СВЧ излучения с торца камеры.

## Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской

Федерации в ходе реализации проекта „Создание опережающего научно-технического задела в области разработки передовых технологий малых газотурбинных, ракетных и комбинированных двигателей сверхлегких ракет-носителей, малых космических аппаратов и беспилотных воздушных судов, обеспечивающих приоритетные позиции российских компаний на формируемых глобальных рынках будущего“, № FZWF-2020-0015.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] P.V. Bulat, I.I. Esakov, L.P. Grachev, K.N. Volkov, I.A. Volobuev. IEEE Tr. Plasma Sc., **49** (3), 1041 (2021). DOI: 10.1109/TPS.2021.3064286
- [2] П.В. Булат, К.Н. Волков, Л.П. Грачев, И.И. Есаков, П.В. Лавров, Н.В. Продан, П.С. Чернышов. Письма в ЖТФ, **47** (15), 51 (2021). DOI: 10.21883/PJTF.2021.15.51236.18804 [P.V. Bulat, K.N. Volkov, L.P. Grachev, I.I. Esakov, P.V. Lavrov, N.V. Prodan, P.S. Chernyshov. Tech. Phys. Lett., **47** (15), 51 (2021). DOI: 10.1134/S1063785021080058]
- [3] П.В. Булат, К.Н. Волков, Л.П. Грачев, И.И. Есаков, П.В. Лавров. ЖТФ, **91** (9), 1339 (2021). DOI: 10.21883/JTF.2021.09.51212.92-21 [P.V. Bulat, K.N. Volkov, L.P. Grachev, I.I. Esakov, P.V. Lavrov. Tech. Phys., **66** (9), 1308 (2021). DOI: 10.1134/S1063784221090036]
- [4] П.В. Булат, Л.П. Грачев, И.И. Есаков, А.А. Раваев, Л.Г. Северинов. ЖТФ, **89** (7), 1016 (2019). DOI: 10.21883/JTF.2019.07.47790.409-18 [P.V. Bulat, L.P. Grachev, I.I. Esakov, A.A. Ravaev, L.G. Severinov. Tech. Phys., **64** (7), 957 (2019). DOI: 10.1134/S1063784219070090]
- [5] V.M. Shibkov, A.A. Aleksandrov, V.A. Chernikov, A.P. Ershov, L.V. Shibkova. J. Propul. Power, **25** (1), 123 (2009). DOI: 10.2514/1.24803
- [6] V.A. Vinogradov, D.V. Komratov, A.Yu. Chirkov. J. Phys. Conf. Ser., **1370**, 012022 (2019). DOI:10.1088/1742-6596/1370/1/012022]
- [7] А.Ф. Александров, А.А. Кузовников, В.М. Шибов. ИФЖ, **62** (5), 726 (1992). [A.F. Aleksandrov, A.A. Kuzovnikov, V.M. Shibkov, J. Engineer. Phys. Thermophys., **78**, 187 (2005). DOI: 10.1007/BF00862338]
- [8] В.Б. Авраменко. ИФЖ, **78** (1), 178 (2005). [V.B. Avramenko, J. Engineer. Phys. Thermophys., **78**, 187 (2005). DOI: 10.1007/s10891-005-0047-0]
- [9] S. Finnveden. J. Sound Vib., **312**, 644 (2008). DOI: 10.1016/j.jsv.2007.11.020
- [10] И.В. Кудрявцев, О.Б. Гоцелюк, Е.С. Новиков, В.Г. Демин. ЖТФ, **87** (1), 91 (2017). DOI: 10.21883/JTF.2017.01.44024.1724 [I.V. Kudryavtsev, O.B. Gotselyuk, E.S. Novikov, V.G. Demin. Tech. Phys., **62** (1), 101 (2017). DOI: 10.1134/S1063784217010133]
- [11] V. Lashkov, I. Mashek, V. Ivanov, Y. Kolesnichenko, M. Rivkin. AIAA Paper, 2008-1410 (2008). DOI: 10.2514/6.2008-1410



- [12] V.A. Lashkov, A.G. Karpenko, R.S. Khoronzhuk, I.Ch. Mashek. *Phys. Plasmas*, **23**, 052305 (2016). DOI: 10.1063/1.4949524
- [13] A.I. Saifutdinov, E.V. Kustova, A.G. Karpenko, V.A. Lashkov. *Plasma Phys. Rep.*, **45** (6), 602 (2019). DOI: 10.1134/S1063780X19050106
- [14] V.G. Brovkin, P.V. Vedenin. *J. Appl. Phys.*, **128**, 113301 (2020). DOI: 10.1063/5.0016249
- [15] A.I. Saifutdinov, E.V. Kustova. *J. Appl. Phys.*, **129**, 023301 (2021). DOI: doi.org/10.1063/5.0031020
- [16] K.V. Khodataev. *AIAA Paper*, 2007-0431 (2007). DOI: 10.2514/6.2007-431
- [17] Л.П. Грачев, И.И. Есаков, П.Б. Лавров, А.А. Раваев. *ЖТФ*, **82** (2), 73 (2012). [L.P. Grachev, I.I. Esakov, P.B. Lavrov, A.A. Ravaev. *Tech. Phys.*, **57** (2), 230 (2012). DOI: 10.1134/S1063784212020077]
- [18] I. Esakov, L. Grachev, K. Khodataev, A. Ravaev, N. Yurchenko, P. Vinogradsky, A. Zhdanov. *AIAA Paper*, 2009-0889 (2009). DOI: 10.2514/6.2009-889
- [19] Ю.А. Лебедев, А.В. Татаринов, И.Л. Эпштейн. *ТВТ*, **49** (6), 803 (2011). [Y.A. Lebedev, A.V. Tatarinov, I.L. Epshtein. *High Temperature*, **49** (6), 775 (2011). DOI: 10.1134/S0018151X11060174]
- [20] Yu.A. Lebedev. *Plasma Sourc. Sci. T.*, **24** (5), 053001 (2015). DOI: 10.1088/0963-0252/24/5/053001
- [21] A. Starikovskiy, N. Aleksandrov. *Prog. Energ. Combust. Sci.*, **39**, 331 (2013). DOI: 10.1016/j.pecs.2012.05.003
- [22] Y. Ju, W. Sun. *Prog. Energ. Combust.*, **48**, 21 (2015). DOI: 10.1016/j.pecs.2014.12.002
- [23] И.И. Есаков, А.А. Раваев, Л.П. Грачев, И.А. Волобуев. *Проблемы региональной энергетики*, **3** (44), 65 (2019). DOI: 10.5281/zenodo.3562187 [I.I. Esakov, L.P. Grachev, A.A. Ravaev, I.A. Volobuev. *Problems Regional Energetics*, **3** (44), 65 (2019). DOI: 10.5281/zenodo.3562187]