

УДК 621.37

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ КАМЕРЕ С КООКСИАЛЬНЫМ ВВОДОМ ЭНЕРГИИ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2023 г. А. А. Довгань<sup>1</sup>, И. Ш. Бахтеев<sup>2</sup>, С. Ю. Молчанов<sup>2</sup> \*, В. В. Мартынов<sup>1</sup>,  
Б. М. Бржозовский<sup>1</sup>, Е. П. Зинина<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
“Институт машиноведения имени А.А. Благонравова Российской академии наук”, Москва, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук, Черноголовка, Россия

\*E-mail: canishe@yandex.ru

Поступила в редакцию 17.09.2022 г.

После доработки 05.10.2022 г.

Принята к публикации 26.10.2022 г.

Рассмотрены основные конструктивные варианты подачи энергии сверхвысокочастотного (СВЧ) излучения в торцевую стенку цилиндрического резонатора. Выбраны и оптимизированы конструкции двух типов коаксиального ввода энергии, отличающиеся расположением коаксиальной линии относительно требуемого направления распространения волны. В результате расчетов найдены электрические поля внутри цилиндрической камеры и в рупорных коаксиальных антеннах, определены коэффициенты стоячей волны систем. Проведено сравнение распределения электрического поля при помещении в камеру металлических объектов. Показаны области возникновения плазменного СВЧ разряда на поверхности цилиндрического объекта.

DOI: 10.31857/S0367676522700405, EDN: AEUGKB

### ВВЕДЕНИЕ

Энергия сверхвысоких частот (СВЧ) уже десятки лет используется в самых различных областях, например, в быту – это всем известные микроволновые печи, в промышленности – это сушилка древесины под воздействием СВЧ излучения, в разработках будущего – двигатели космических аппаратов на основе СВЧ плазмы и т.д.

Одним из перспективных применений энергии СВЧ, имеющих большую практическую направленность, является формирование разрядов при СВЧ излучении. По сравнению с другими типами, СВЧ-разряды обладают рядом существенных преимуществ, такими как: возможность изготовления электродов из непроводящих материалов, возможность создания плазмы в электродных и безэлектродных системах, простота получения плазмы с высоким и, наоборот, с малым удельным энерговыделением, широкая область рабочих давлений, возможность создания плазмы в малых и больших объемах. Перечисленные преимущества позволяют успешно применять СВЧ-разряды для обработки материалов.

Но плазму возможно получить не только в промышленных условиях. Так, например, ученые описали, как обычную микроволновую печь превра-

тить в устройство, которое генерирует плазму [1]. По идее авторов это можно использовать для того, чтобы изменять поверхностные свойства предметов, а также проводить опыты с “четвертым состоянием вещества” дома, а не на лабораторном оборудовании. Микроволновая печь работает благодаря встроенному генератору СВЧ энергии, которое создает электромагнитное поле, действующее на молекулы объекта, помещенного в камеру. Если частицы поляричны, то есть обладают избытком плотности разноименных зарядов в разных частях, то в микроволновке они начнут вращаться. В обычной ситуации плотность молекул очень велика; это приводит к тому, что вся среда нагревается, не позволяя отдельным частицам набрать большую энергию. Если концентрацию сильно уменьшить, например, создав разреженный газ, то столкновения между молекулами будут происходить реже. Это позволит им вращаться быстрее, что может привести к образованию ионов и электронов. Подобрал оптимальное давление воздуха в герметичном сосуде, расположенном в микроволновой печи, создается плазма (газ в сосуде начинает светиться при подаче СВЧ-энергии).

Но для управления горением плазмы, зажигаемым в строго установленных местах с требуемой интенсивностью такая установка не пригодна. На ней нельзя реализовать нанесение покрытий и

тонких пленок, выполнить травление поверхности и синтезировать всевозможные наноструктуры. Для решения сложных промышленных задач необходимо разработать простую и в то же время универсальную камеру.

Кроме того, для практических применений важное значение приобретают исследования оптимальных размеров и положений в камере металлических объектов. В настоящее время результаты подобных исследований, проведение которых невозможно без высокопроизводительных программных средств, в литературе отсутствуют.

## МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ПЛАЗМЕННОГО СВЧ-РАЗРЯДА

Большое количество работ посвящено моделированию источников и систем низкотемпературной плазмы. Инженеры и ученые используют такой подход для получения более ясного представления о физике разрядов и оценки рабочих характеристик существующих или возможных систем.

Для моделирования плазмы необходим специализированный инструмент, который поддерживает моделирование следующих явлений: разряд постоянного тока, индуктивно-связанная плазма и плазма СВЧ-разряда. Такой набор может предложить программный комплекс COMSOL с модулем Plasma, который применялся в работах [2, 3].

Плазма СВЧ разряда возникает при “подогреваемых” волной разрядах, которые поддерживаются, если электроны получают достаточно энергии от электромагнитной волны, проникающей в плазму. Физика плазмы СВЧ-разряда сильно различается в зависимости от того, распространяется ли волна в моде ТЕ (электрическое поле лежит вне плоскости) или в моде ТМ (электрическое поле лежит в плоскости). Диапазон давлений для образования плазмы СВЧ-разряда очень широк. Для плазмы электрон-циклотронного резонанса (ЕСР) давление может быть порядка 1 Па или меньше. Для прочих видов плазмы давление обычно находится в диапазоне от 100 Па до атмосферного. Мощность может составлять от нескольких Вт до нескольких кВт.

Плазма СВЧ-разряда широко используется благодаря дешевизне микроволновой энергии. Важным методом получения информации о местах возникновения СВЧ-разрядов является исследование напряженности электрического поля. С помощью такого исследования с высокой точностью определяют вероятные места возникновения плазменного разряда в исследуемой камере [4]. Для моделирования распределения напряженности электрического поля в заданной области не обязательно использовать пакет Comsol. Достаточно, чтобы пакетный продукт обладал возможностью 3D моделирования сложных радиофизических объектов методом конечных элементов (МКЭ) или конечных разностей. Для та-

ких целей, например, могут подойти пакеты программ CST, HFSS и другие.

Для многих применений необходим источник, который генерирует плазму вокруг заготовки или материала. Существует большое количество различных концепций источника микроволновой плазмы. Наибольшую популярность получили камеры со щелевым вводом энергии (slot antenna сокращенно SLAN) [4–8]. Данный тип ввода СВЧ энергии для цилиндрической камеры обеспечивает однородную и эффективную передачу энергии в плазменную камеру.

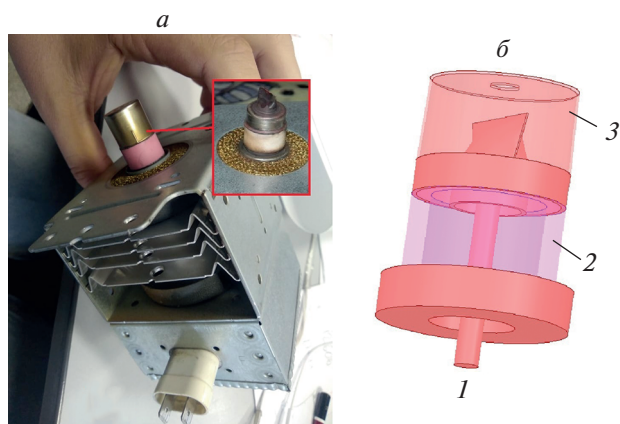
Перспективными также являются камеры с коаксиальным вводом энергии [9, 10]. Подобное техническое решение может быть направлено как для формирования низкотемпературной плазмы вокруг металлического проводника коаксиального выхода, так и для распространения СВЧ мощности вдоль плазменной камеры цилиндрической формы.

Расчет распределения электромагнитного поля в камере с любым типом ввода сложная инженерная задача, при которой нужно учитывать не только геометрические особенности и материалы источника излучения и камеры, но и 3D модели помещенных в камеру объектов.

Численное моделирование напряженности электрического поля имеет первостепенное значение в понимании оптимальных размеров камеры и обрабатываемого объекта. Численное моделирование подразумевает создание математической модели распространения электрического поля в заданном объеме и дальнейшее ее исследование с использованием численных методов, которые реализуются на компьютере с помощью программного комплекса.

## ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕДАЧИ СВЧ МОЩНОСТИ КООКСИАЛЬНЫМ ИЗЛУЧАТЕЛЕМ

Основная цель работы состоит в получении оптимальных параметров передачи энергии на частоте 2.45 ГГц в цилиндрическую камеру с помощью коаксиального разъема. Размеры камеры аналогичны [4]: длина 300 мм, диаметр 150 мм. В установках, способных генерировать плазменный СВЧ разряд, коаксиальный ввод энергии используется редко [9] и является слабоизученным по сравнению с камерами, где мощность подается через отверстия (щели). Но для обработки плазмой СВЧ-разряда длинных объектов цилиндрической формы щелевые камеры не годятся. А существующие камеры с коаксиальным вводом, как правило, формируют плазму в окрестности металлического проводника коаксиального выхода. Исследования в таких работах не направлены для структурных изменений поверхности каких-либо объектов, помещенных в камеру, потому что СВЧ излучение, формирующееся за счет представлен-



**Рис. 1.** Магнетрон LG 2M213 общий вид и увеличенная часть антенного элемента, находящаяся под колпачком (а). 3D модель излучателя (б): 1 – СВЧ-вход, 2 – изолятор, 3 – колпачок антенны.

ного коаксиального излучателя, слабо распространяется в замкнутую камеру.

В работах [11, 12] применяют несколько коаксиальных источников для поджига плазмы. Разработка камеры с несколькими источниками намного сложнее и затратнее. При проектировании необходимо учитывать коэффициенты стоячей волны (КСВ) каждого источника и его излучение СВЧ энергии в камеру (резонатор). При неверном подсчете мощности, направления излучения и других характеристик хотя бы одного источника можно вывести из строя остальные генераторы, работающие удовлетворительно. Такой массив  $3 \times 4$  коаксиальных источников на расстоянии 15 мм формирует “лист” однородной плазмы. Описанная топология хорошо подходит для обработки больших плоских объектов низкотемпературной плазмой. Но, в свою очередь, актуальным является синтез коаксиального подвода энергии в камеру, при котором волна будет распространяться по всей длине объекта цилиндрической формы, образуя СВЧ разряды в местах повышенной концентрации напряженности электрического поля.

В работе [13] представлен вариант широкополосной передачи энергии. Предложенный излучатель может использоваться в качестве согласующего антенного перехода между коаксиальной линией и камерой с основной модой  $TE_{01}$ . Но такая конструкция сложна в изготовлении и более востребована в задачах, связанных с обеспечением излучения СВЧ мощности в широкой полосе [14, 15].

В цилиндрической камере может использоваться подвижный короткозамыкатель. Такая конструкция позволяет добиться наилучшего согласования между излучающей антенной и местом с максимальной напряженностью электрического поля. Но обеспечить подвижность элементов в камере с пониженным давлением непростая задача. Поэто-

му такие решения применяются в камерах, где не происходит откачки воздуха [16].

### МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ПРИ КООКСИАЛЬНОМ ВВОДЕ СВЧ ЭНЕРГИИ

Для создания электромагнитных колебаний в полом металлическом цилиндре необходимо подвести в него СВЧ энергию требуемой мощности. Для этого нужно использовать генератор СВЧ колебаний и волноводный или коаксиальный тракт.

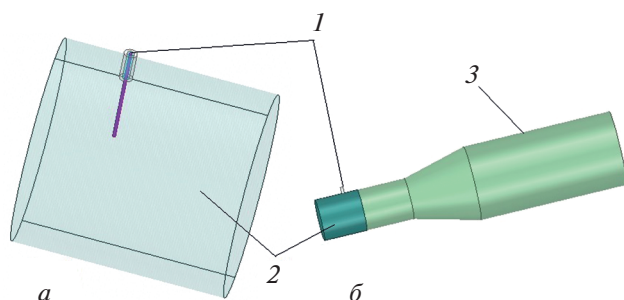
В настоящее время дешевыми источниками СВЧ энергии, работающими в частотном диапазоне 2.45–2.50 ГГц, являются магнетроны [17, 18]. Обладая максимальной мощностью 800–1000 Вт, такие генераторы применяются, в том числе, и в бытовых СВЧ печах.

При проектировании резонаторной цилиндрической камеры с коаксиальным вводом энергии от магнетрона необходимо провести электродинамический анализ электрического поля, формируемого стоячими СВЧ-волнами, которые при определенных условиях (пониженном давлении) могут образовать плазму в областях сильного поля.

У большинства современных магнетронов выход энергии происходит через коаксиальную антенну. Излучение из него имеет не выраженное направление. Электромагнитное поле, формируемое магнетронным генератором, может отличаться в зависимости от производителя и модели магнетрона. Так, например, встречаются разные типы излучателей (антенн). Центральный проводник тоже может отличаться в зависимости от модели. Поэтому для численного анализа направления и интенсивности возбуждения электромагнитных волн необходимо учитывать особенности коаксиального излучателя, который планируется использовать на практике. Или использовать переход к стандартному сечению коаксиальной линии [19].

Магнетроны марки LG, произведенные в Коре, широко представлены на российском рынке. Для численного моделирования прямого излучения магнетрона возьмем геометрию антенного выхода магнетрона LG 2M213, представленного на рис. 1а. На рисунке также представлен элемент, расположенный под колпачком антенны. Для построения геометрической модели, представленной на рис. 1б, данный элемент был обмерен с высокой точностью.

Поиск оптимального варианта согласования коаксиального излучателя и цилиндрической камеры для передачи СВЧ энергии и дальнейшего поджига плазмы, представляющей большой интерес для низкотемпературного плазменного формирования композитных структур на поверхностях металлических изделий, в литературе отсутствует.

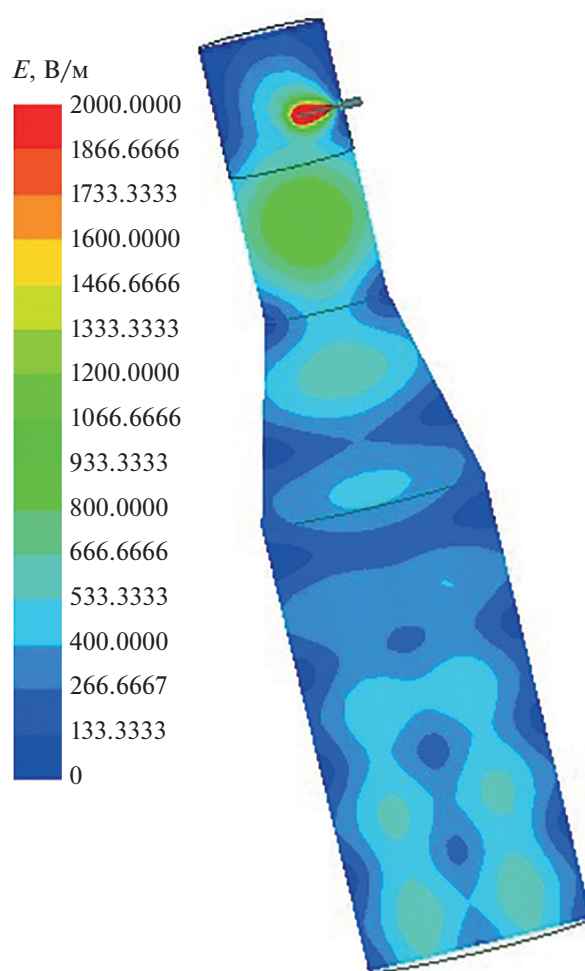


**Рис. 2.** Система передачи СВЧ-энергии от коаксиальной линии к резонаторной камере цилиндрического вида: переход с коаксиального входа на круглый волновод (*а*) и общий вид (*б*), где *1* – коаксиальный вход, *2* – волноводный тракт, *3* – цилиндрическая камера.

Первым вариантом является переход от коаксиальной линии к волноводной. Причем волноводная линия должна быть цилиндрической формы для возбуждения в ней волны  $TE_{11}$ . Размер сечения волноводной линии определяется исходя из частотного диапазона. Оптимальным будет являться диаметр 80 мм. Представленный вариант коаксиально-волноводного перехода (КВП) изображен на рис. 2*а*. КСВ системы, представленной на рис. 2*б*, (при помещении идеальной нагрузки со свободного торца цилиндра) для частоты 2.45 ГГц равен 3.3, что является не удовлетворительным результатом для распространения радиоволны. Распределение электрического поля в такой системе представлено на рис. 3.

Длина волновода и переход между волноводом и камерой согласованы не идеально. Для обеспечения наименьшего КСВ (режим наилучшей передачи энергии от коаксиального ввода в резонатор) проведем оптимизацию конструкции исследуемого объекта. Так как данная конструкция не имеет настроечного поршня, необходимо рассчитать оптимальную длину между коаксиальным штырем и закороченной стенкой, а также длину перехода до цилиндрической камеры. Полученная геометрия передающего тракта и резонаторной камеры с распределением электрической энергии представлена на рис. 4*а*. Рассчитанный КСВ для частотного диапазона 2.4–2.5 ГГц представлен на рис. 4*б*. Значение КСВ на частоте 2.45 ГГц ниже 1.2 является образцовым для такой системы. Распределение напряженности электрического поля относительно оси цилиндра не симметрично. Этот параметр является важным, для равномерной обработки плазменным СВЧ разрядом цилиндрических объектов. Стоит отметить, что рассмотренная система имеет коаксиальный ввод стандартного сечения 7/3.04. При использовании магнетрона с коаксиальным излучателем другого вида необходимо использовать адаптер, представленный в [19] или его аналоги.

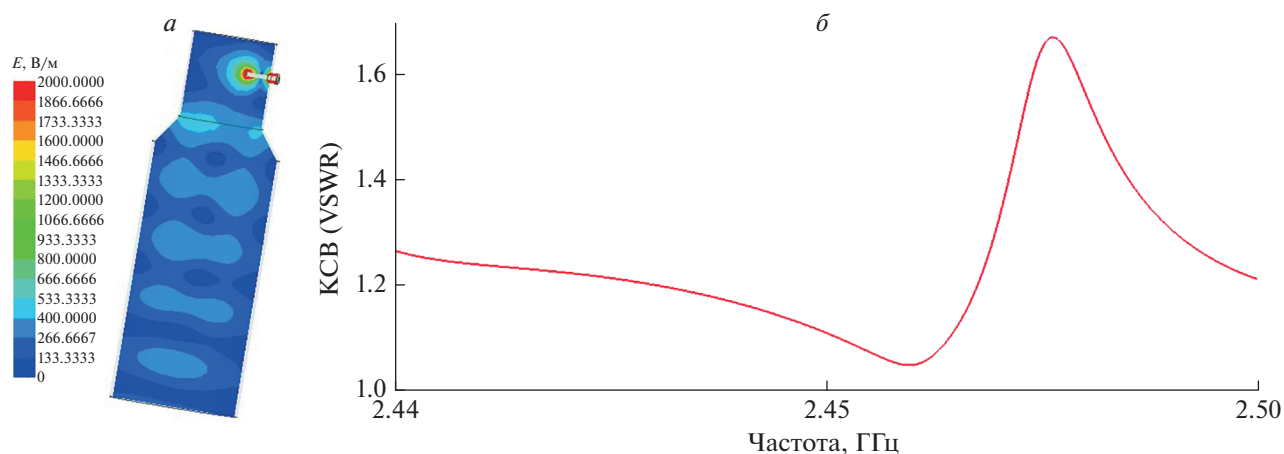
Внутри резонаторной камеры должно быть пониженное давление. Средства откачки воздуха



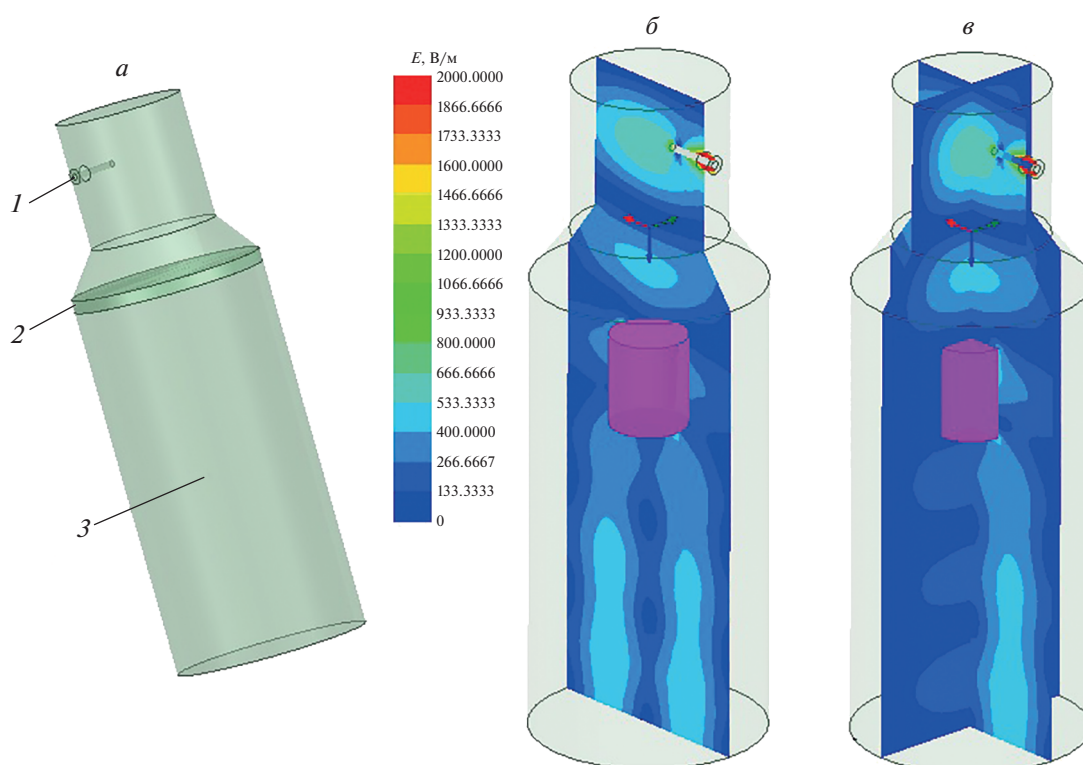
**Рис. 3.** Распределение электрического поля от коаксиального штыря до цилиндрической камеры.

могут быть выполнены в торцевой стенке резонатора. Их наличие не будет оказывать влияние на распространение СВЧ энергии, если в данной системе перед ними установить металлическую сетку, которая полностью отразит радиоволны. Для защиты СВЧ-генератора от избытка отраженной мощности возможно предусмотреть в торцевой стенке резонатора конус из радиопоглощающего материала, работающий как согласованная нагрузка. Данное техническое решение необходимо для случая, когда система находится без обрабатываемого материала, либо генератор работает на предельной мощности. Вакуумную герметичность камеры со стороны ввода энергии обеспечит кварцевое стекло. Полученная 3D структура системы с кварцевым стеклом толщиной 10 мм изображена на рис. 5*а*. КСВ системы при этом возрастает до 1.5 на частоте 2.45 ГГц.

В качестве объекта, помещенного в камеру для обработки плазменным СВЧ разрядом, рассмотрим цилиндр с радиусом 30 мм и длиной 100 мм. Полученное распределение электрического поля представлено на рис. 5*б* и 5*в*. В местах повышенной концентрации заряда возможно возникнове-



**Рис. 4.** Оптимизированная геометрия системы передачи и распределение электрического поля в ней (а); КСВ оптимизированной системы (б).

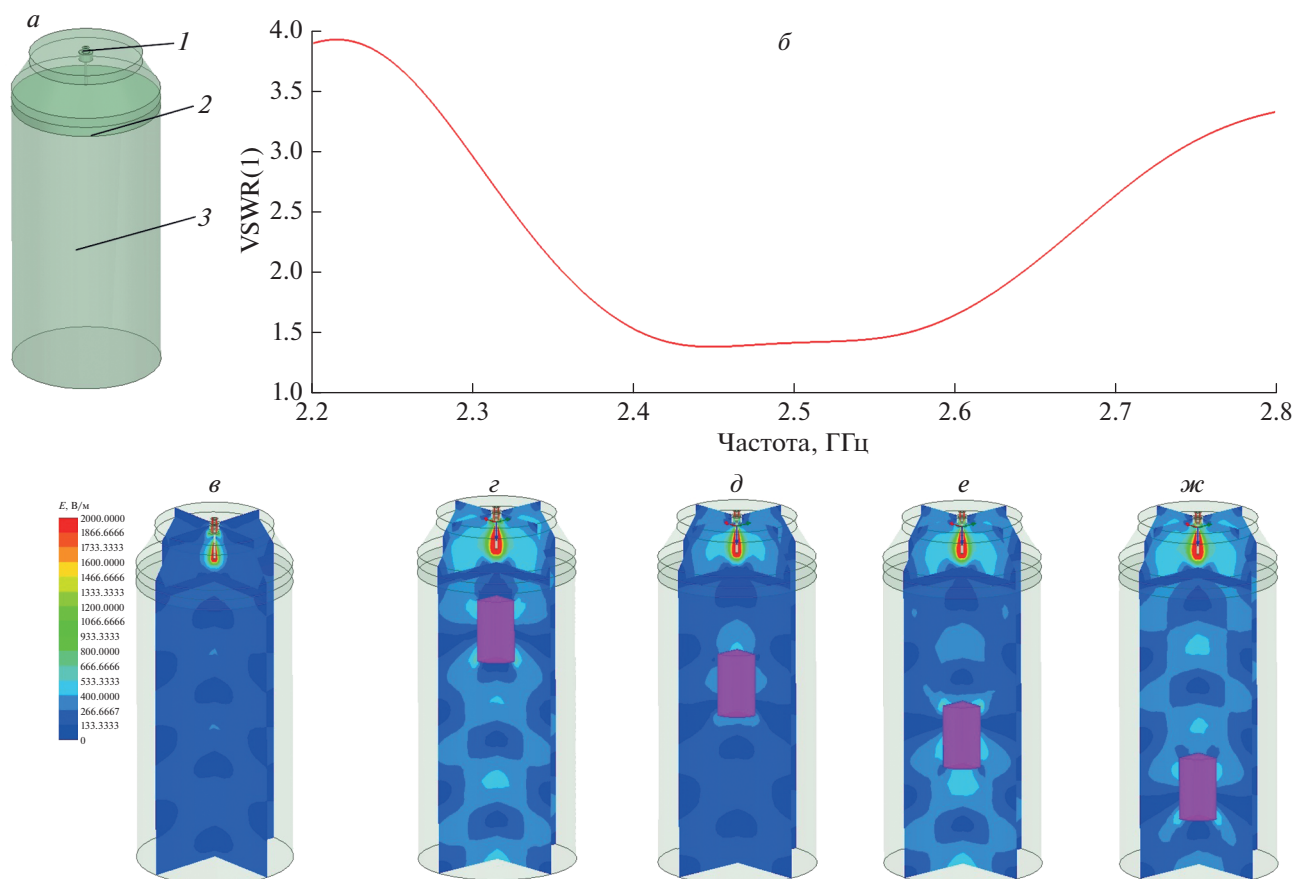


**Рис. 5.** Передающий тракт и цилиндрическая камера с кварцевым стеклом: 3D модель (а), где 1 – коаксиальный вход, 2 – кварцевое стекло, обеспечивающее герметизацию, 3 – цилиндрическая камера; распределение напряженности электрического поля в камере при образце с разрезом по оси  $OX$  (б); распределение напряженности электрического поля в камере при образце с разрезом по осям  $OX$  и  $OY$  (в).

ние плазменного СВЧ разряда при достаточном уровне мощности и пониженном давлении. Их расположение не оптимально с точки зрения обработки цилиндрических объектов, помещенных в камеру. Также результаты моделирования показали, что и при помещении образца распределение напряженности электрического поля будет не симметрично относительно оси цилиндра.

Для возбуждения поперечных электромагнитных волн (тип волны ТЕМ) необходимо исполь-

зовать коаксиальный ввод, установленный по направлению движения волны. Оптимизированная структура показана на рис. 6а. Система построена на стандартном коаксиальном вводе сечения 7/3.04 и имеет кварцевое стекло толщиной 10 мм, отдаленное от рупорного перехода на 10 мм. Рассмотренный коаксиальный ввод не является широкополосным, но оптимизированная геометрия рупора и увеличенная длина центрального проводника привела к согласованию коаксиального



**Рис. 6.** Система с прямым коаксиальным вводом энергии в цилиндрическую камеру: 3D модель (а), где 1 – коаксиальный вход, 2 – кварцевое стекло, обеспечивающее герметизацию, 3 – цилиндрическая камера; КСВ системы (б); распределение напряженности электрического поля (в); распределение напряженности электрического поля с металлическим объектом в камере (г)–(ж).

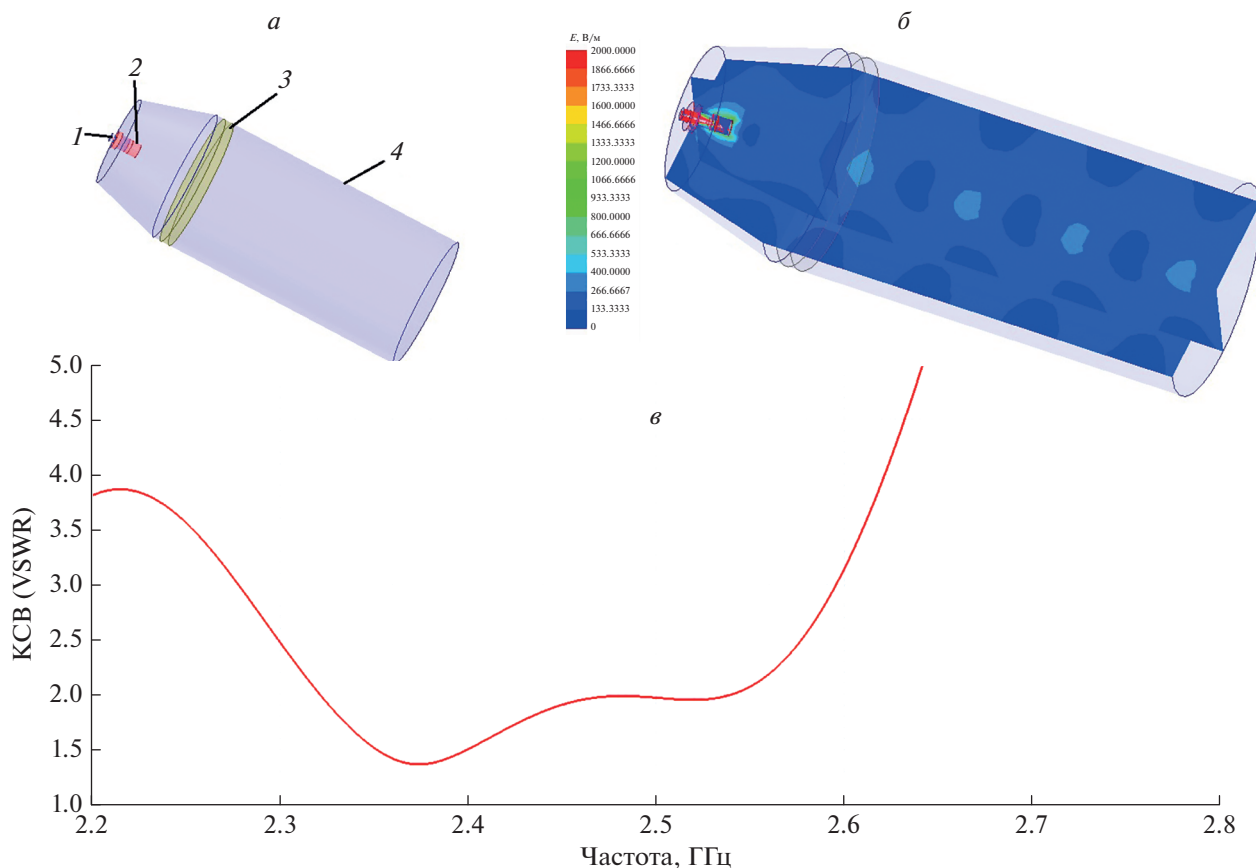
ввода с КСВ не хуже 1.5 в частотном диапазоне 2.40–2.55 ГГц (рис. 6б). Распространение электрического поля на частоте 2.45 ГГц представлено на рис. 6в. Ввиду того, что ввод осуществляется в центре цилиндрической камеры, распространение электрической энергии происходит симметрично относительно центральной линии цилиндра.

Поместим цилиндрический объект с радиусом 30 мм и длиной 100 мм в резонаторную камеру на расстоянии 30 мм от кварцевого стекла. Распространение электрического поля представлено на рис. 6г. Рассчитанные распределения электрического поля при смещении образца вглубь по цилиндрической камере представлены на рис. 6д, 6е и 6ж. Даже при значительном удалении образца от СВЧ входа наблюдаются высокие значения напряженности на поверхности образца. Данная конструкция коаксиального ввода позволяет обрабатывать металлические объекты низкотемпературной СВЧ-плазмой на значительном удалении от места ввода энергии. Равномерность распределения электрического поля вдоль металлического объекта (на практике это распределение соответствует вероятным местам зажигания плазменного разряда) за-

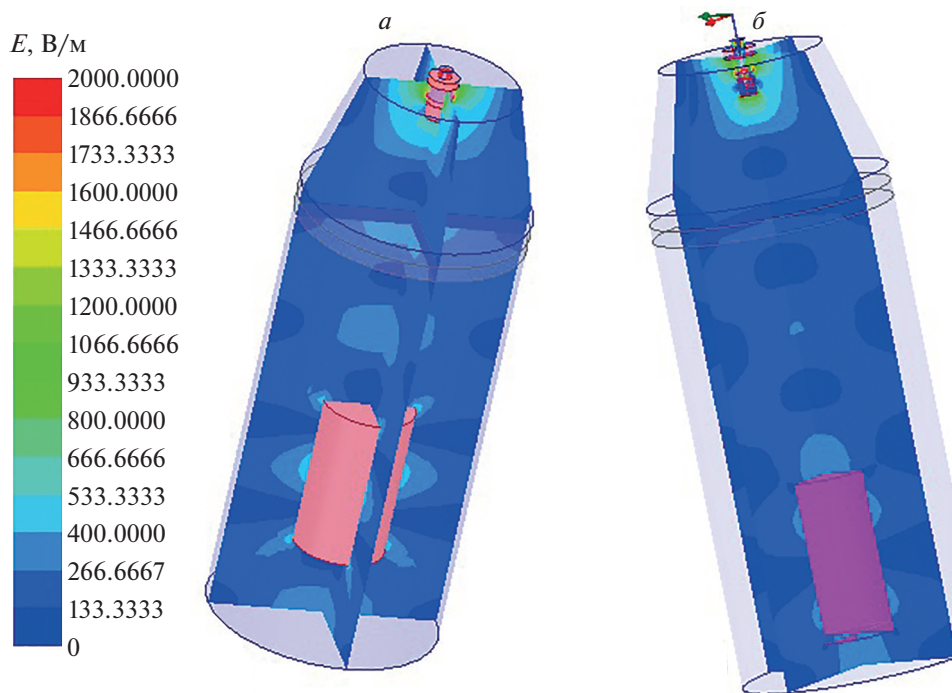
висит от размеров обрабатываемого объекта и его положения в камере.

Последним этапом рассмотрения ввода энергии в камеру является передача энергии напрямую с магнетрона, точнее с его коаксиального излучателя. Анализ излучения и оптимизация передачи СВЧ энергии в камеру рассмотрена для магнетрона LG, представленного на рис. 1а. Форма излучателя у других моделей магнетрона может отличаться от выбранного типа, что приведет к искажению формируемого излучения. Поэтому использование магнетрона с коаксиальным излучателем, отличным от рассматриваемого, рекомендуется использовать в системе, представленной выше.

Полученная модель системы с прямым вводом энергии от магнетрона представлена на рис. 7а. Результат численного анализа в виде рассчитанной напряженности электрического поля в оптимизированном рупорном переходе от магнетрона LG до цилиндрической камеры диаметром 150 мм представлен на рис. 7б, а КСВ системы – на рис. 7в. Возросшее отражение связано с рассеивающей геометрией коаксиального излучателя магнетрона и, как следствие, не оптимальной пере-



**Рис. 7.** Система с вводом энергии от магнетрона: 3D модель (а), где 1 – СВЧ вход, 2 – коаксиальный излучатель, 3 – кварцевое стекло, обеспечивающее герметизацию, 4 – цилиндрическая камера; передача СВЧ энергии через антенну коаксиального магнетрона, распределение напряженности электрического поля (б); KCB системы (в).



**Рис. 8.** Система с прямой подачей энергии от магнетрона. Напряженность электрического поля в камере при двух вариантах расположения образца, отличным друг от друга на  $\lambda/4$ .

дачей СВЧ энергии в рупорный переход. Но плюсом данной системы является передача мощности от магнетрона напрямую в камеру, не используя дополнительно адаптер [19], в котором также будет присутствовать некоторое отражение. Вместе с тем отсутствие адаптера уменьшает затраты и габаритные размеры итоговой установки.

Поместим в камеру металлический объект в виде цилиндра с длиной 100 мм и радиусом 30 мм. Рассчитанная напряженность электрического поля с помещенным в камеру металлическим цилиндром длиной 100 мм и диаметром 30 мм приведена на рис. 8. Распространение энергии симметрично относительно оси цилиндра, места повышенной напряженности электрического поля аналогичны рассматриваемой системе с коаксиальным выходом 7/3.04. Разница между размещением объекта на рис. 8а и 8б равна  $\lambda/4$ . В сумме эти два положения должны полностью обеспечить обработку всей поверхности цилиндрического объекта плазменным СВЧ разрядом. Выбор амплитуды электромагнитных колебаний и пониженного давления в камере необходимо произвести из условия достаточности возникновения СВЧ плазменного разряда в местах повышенной напряженности электрического поля.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены результаты исследования напряженности электрического поля в цилиндрической камере при подаче энергии через коаксиальный разъем. Для возбуждения плазмы в ограниченном пространстве требуется сконцентрировать СВЧ энергию до уровня напряженности электрической составляющей электромагнитного поля близкого к пробойному.

Рассмотрены 2 типа коаксиального ввода. Оба ввода образуют рупорные коаксиальные антенны и оптимизированы на излучение в цилиндрический резонатор через торцевую стенку с КСВ не хуже 1.5 на частоте 2.45 ГГц. Минимальное значение отраженных волн позволит использовать

магнетрон не на полную мощность, обеспечивая стабильную его работу без перегрева.

Работа была выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 19-19-00101).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Barnes B.K., Ouro-Koura H., Derickson J. et al. // Amer. J. Phys. 2021. V. 89. No. 4. P. 372.
2. Brcka J. // Proc. COMSOL Users Conf. (Boston, 2006) P. 431.
3. Turkoz E., Celik M. // J. Comput. Phys. 2015. V. 286. P. 87.
4. Бржозовский Б.М., Мартынов В.В., Молчанов С.Ю. и др. // Усп. прикл. физ. 2020. Т. 8. № 3. С. 189.
5. Werner F., Korzec D., Engemann J. // Plasma Sources Sci. Technol. 1994. V. 3. No. 4. P. 473.
6. Jiang Y., Hsu H.Y., Aranganadin K. et al. // Proc. IVEC-2019 (Busan, 2019). P. 1.
7. Liu F., Wang J., Dai S. // Int. J. Numer. Model. 2011. V. 24. No. 6. P. 526.
8. Hasegawa Y., Nakamura K., Lubomirsky D. et al. // Japan J. Appl. Phys. 2017. V. 56. No. 4. Art. No. 046203.
9. Deng X., Takaoka Y., Kousaka H., Umehara N. // Surf. Coat. Technol. 2014. V. 238. P. 80.
10. Kar S., Alberts L., Kousaka H. // AIP Advances. 2015. V. 5. No. 1. Art. No. 017104.
11. Latrasse L., Lacoste A., Sirou J., Pelletier J. // Plasma Sources Sci. Technol. 2006. V. 16. No. 1. P. 7.
12. Latrasse L., Radoiu M., Nelis T., Antonin O. // J. Microw. Power Electromagn. Energy. 2017. V. 51. No. 4. P. 237.
13. Калиничев В.И., Калошин В.А. // Журн. радиоэлектроники. 2007. № 10. С. 23.
14. Dehdasht-Heydari R., Hassani H.R., Mallahzadeh A.R. // Progr. Electromagn. Res. 2008. V. 79. P. 23.
15. Mallahzadeh A.R., Imani A. // Progr. Electromagn. Res. 2009. V. 91. P. 273.
16. Rackow K., Ehlbeck J., Krohmann U., Baeva M. // Plasma Sources Sci. Technol. 2011. V. 20. No. 3. Art. No. 035019.
17. Хлопов Ю.Н. Радиоэлектроника и связь. М.: Знание, 1967. 50 с.
18. Соколова Ж.М. Приборы и устройства СВЧ, КВЧ и ГВЧ диапазонов. Учебное пособие. Томск: ТУСУР, 2012. 283 с.
19. <http://npp-elmika.ru/info/index.php?id=219>.

## Study of the electric field density distribution in cylindrical chamber with coaxial feed of super high frequency radiation energy

A. A. Dovgan<sup>a</sup>, I. Sh. Bahteev<sup>b</sup>, S. Yu. Molchanov<sup>b, \*</sup>, V. V. Martynov<sup>a</sup>,  
B. M. Brzhozovskii<sup>a</sup>, E. P. Zinina<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 101990 Russia

<sup>b</sup> Institute of Solid State Physics of the Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, 142432 Russia

\*e-mail: canishe@yandex.ru

The main design options for supplying SHF energy to the end wall of a cylindrical resonator were considered. 2 types of designs for coaxial feed of energy were selected and optimized, differing in the location of the coaxial line relative to the required direction of wave propagation. As a result of the calculations, the electric fields inside the cylindrical chamber and in the horn coaxial antennas were found, and the SWR of the systems was determined. A comparison in distribution of the electric field when metal objects were placed in the chamber was carried out. The areas of occurrence of a plasma SHF discharge on the surface of a cylindrical object were shown.