

03.1

Снижение порога пробоя воздуха подкритическим стримерным разрядом при размещении инициатора разряда вблизи металлического экрана

© П.В. Булат¹, К.Н. Волков², Л.П. Грачев³, И.И. Есаков³, П.Б. Лавров³¹ Балтийский государственный технический университет „ВОЕНМЕХ“ им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург, Россия² Университет Кингстона, Лондон, Великобритания³ Московский радиотехнический институт РАН, Москва, Россия

E-mail: dsci@mail.ru

Поступило в Редакцию 28 декабря 2021 г.

В окончательной редакции 11 января 2022 г.

Принято к публикации 11 января 2022 г.

Обсуждается влияние размеров экрана на пробой воздуха иницированным подкритическим стримерным разрядом. Для инициации стримерного разряда используется цилиндрический металлический вибратор, установленный на малом расстоянии от экрана. Длина инициатора сопоставима с половиной длины волны электромагнитного поля. Приводятся данные по влиянию расстояния от излучающей апертуры до экрана и его ширины на пробойное давление. Получена зависимость коэффициента усиления поля на полюсах линейного вибратора от размера экрана-отражателя.

Ключевые слова: пробой, стримерный разряд, СВЧ-разряд, плазменное горение.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.06.52211.19119

Одно из достоинств инициаторов подкритических СВЧ-разрядов, расположенных параллельно потоку вблизи металлического экрана-отражателя, состоит в том, что они позволяют генерировать разряды в очень слабых СВЧ-полях с напряженностью поля, меньшей 100 В/см. Наиболее хорошо изученным типом инициатора СВЧ-разряда является линейный электромагнитный инициатор. 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.

Присоединенный глубоко подкритический стримерный разряд эффективно нагревается СВЧ-излучением [1]. В условиях резонанса в проводнике возникает большой индуцированный ток, а в окрестности инициатора происходит ионизация газа, образуются плазменные каналы, нагревающие окружающий газ [2]. В целом, чем меньше радиус законцовки и чем ближе резонатор к экрану, тем больше коэффициент усиления поля [3]. 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 [3].

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 [4] (глубоко подкритический стримерный разряд).

При длине инициатора, сопоставимой с половиной длины волны электромагнитного поля, инициатор приобретает резонансные свойства. Инициатор, помещенный в поле излучения с линейной поляризацией параллельно электрическому полю, имеет максимумы индуцированного поля на обоих концах. В частности, пробой воздуха происходит при атмосферном давлении, если инициатор разряда находится на расстоянии $h = \lambda/4$ (где λ — длина волны микроволнового излучения) над металлическим экраном. Коэффициент усиления поля возрастает по сравнению с таковым в случае инициатора, размещенного в свободном пространстве, если инициатор приближается к экрану на расстояние $h \ll \lambda/4$. Резонансная длина инициатора при этом увеличивается.

Для возможности использования иницированного подкритического разряда на практике (например, для поджигания горючей смеси в перспективных двигательных установках) необходимо установить минимальную площадь экрана, при которой происходит пробой среды. Теория и методы расчета инициаторов различных конструкций даются в работе [5]. Влияние проводимости, геометрических размеров и формы инициатора и их группы на локальные свойства индуцируемых электромагнитных полей рассматривается в [6]. В [7] 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.

Цель настоящей работы состоит в экспериментальном подтверждении эффекта снижения порога пробоя возду-

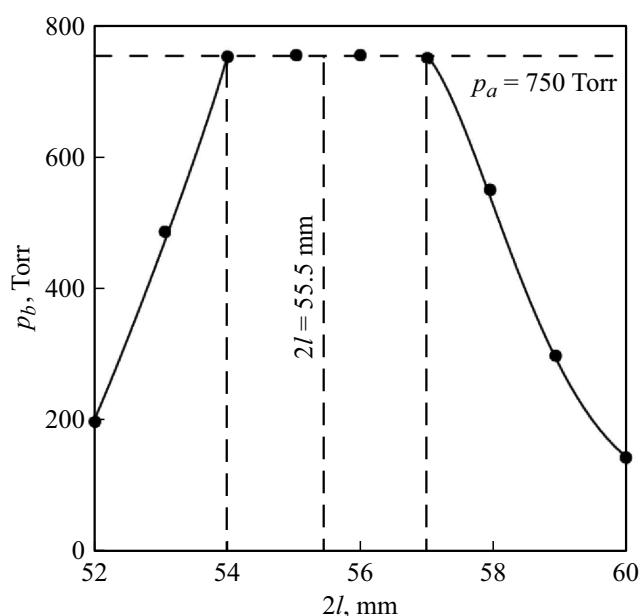


Рис. 1. Определение резонансной длины инициатора.

Таблица 1. Влияние расстояния от излучающей апертуры до экрана на пробойное давление

H , mm	p_b , Torr
70	750
90	750
125	600
130	540

ха при использовании подкритического стримерного разряда, когда инициатор разряда располагается на малом удалении от металлического экрана.

Для проведения экспериментальных исследований использовался стенд, спроектированный и разработанный в МРТИ РАН. Измерения проводились на установке с длиной волны микроволнового излучения $\lambda = 12.3$ см. Для иницирования глубоко подкритического разряда в квазиоптическом СВЧ-пучке применялся электромагнитный вибратор, расположенный близко к экрану (на расстоянии $h \ll \lambda/4$). Детали экспериментальной установки, а также опыт создания СВЧ-разрядов в неподвижном воздухе и высокоскоростном потоке воздуха обсуждаются в работах [8,9].

Резонансная длина вибратора определялась экспериментальным образом. Атмосферное давление полагалось равным $p_a = 750$ Торр. Вибратор выполнялся из дюралевого прутка диаметром $d = 2.25$ мм и имел закругленные концы. Его длина $2l$ ступенчато уменьшалась. Вибратор располагался на пенопластовой подставке, и расстояние от него до поверхности листа экрана размером 110×110 мм выдерживалось равным $h = 5$ мм. Результаты экспериментов приведены на рис. 1. В соот-

ветствии с полученными данными дальнейшие теоретические и экспериментальные исследования выполнялись при длине вибратора $2l = 56$ мм.

В следующих экспериментах было определено расстояние от излучающей апертуры до экрана H , при котором пробойное давление воздуха p_b , инициированное вибратором резонансной длины, меньше атмосферного давления, равного 750 Торр. Опыты выполнялись с коническим СВЧ-излучающим рупором длиной 140 мм с входным сечением 90×45 мм и выходным сечением 90×90 мм. В этих опытах вибратор располагался на пенопластовой подставке, обеспечивающей расстояние до экрана $h = 5$ мм, при размерах листового дюралевого экрана 100×100 мм. Полученные результаты показывают, что опыты необходимо проводить при $H > 125$ мм (табл. 1).

Основным параметром инициатора разряда является коэффициент усиления электрического поля $K = E/E_0$, где E — максимальная амплитуда поля на конце инициатора, E_0 — амплитуда исходного СВЧ-поля в месте расположения инициатора. Коэффициент усиления поля зависит не только от длины инициатора, но и от размеров экрана, вблизи которого он установлен.

Максимальный коэффициент усиления поля наблюдается вблизи концов инициатора. При достаточно большом удалении инициатора от экрана распределение напряженности электрического поля оказывается практически симметричным относительно оси инициатора. По мере приближения инициатора к экрану имеет место концентрация поля между полюсными поверхностями инициатора, обращенными к экрану, и экраном. Расположенные на поверхности инициатора точки максимума напряженности поля смещаются от его оси по направлению к экрану и линиям сопряжения основной цилиндрической поверхности вибратора и его концевых полусфер [6].

Коэффициент усиления поля на полюсах вибратора резонансной длины при $h = 5$ мм в линейно поляризованном исходном поле бегущей ТЕМ-волны при различной длине b и ширине c экрана рассчитывается теоретически (рис. 2). При уменьшении b или c другой размер оставался неизменным и равным 100 мм. Для полноты картины в ряде опытов размер экрана b делался меньше резонансной длины вибратора ($2l = 56$ мм).

Опыты показали, что при неизменном $c = 100$ мм давление p_b начинает уменьшаться только при $b < 62$ мм, поэтому в опытах размер c меняется при $b = 62$ мм = const (такой же вариант был рассчитан теоретически). Результаты расчетов и экспериментов приводятся на рис. 2.

Результаты опытов приведены в табл. 2. Они получены при $H = 110$ мм и длине экрана $b = 62$ мм. Экран располагался на угольно-керамическом СВЧ-поглотителе с поперечными размерами 140×140 мм и толщиной 80 мм.

Полученные результаты представляют интерес для создания и применения неравновесного СВЧ-разряда

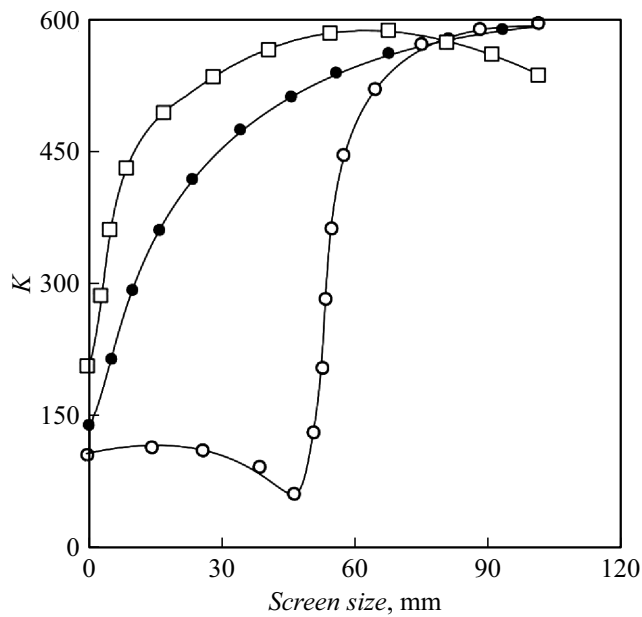


Рис. 2. Зависимость коэффициента усиления поля на полюсах линейного вибратора от размера экрана-отражателя. Светлые кружки соответствуют зависимости $K(b)$ при $c = 100$ mm, темные кружки — зависимости $K(c)$ при $b = 100$ mm, светлые квадраты — зависимости $K(c)$ при $b = 62$ mm.

Таблица 2. Влияние ширины экрана на пробойное давление

c , mm	p_b , Torr
100	615
40	600
20	600
10	480

для поджига и интенсификации горения топлив в высокоскоростных потоках [10,11]. Глубоко подкритический разряд, присоединенный к инициатору, расположенному вблизи металлического экрана, не сдувается скоростным потоком и позволяет осуществить поджиг смеси. Применение иницированных 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.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ 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 россий-

ских компаний на формируемых глобальных рынках будущего“ (№ FZWF-2020-0015).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] К.В. Ходатаев, Б.Р. Горелик, Физика плазмы, **23** (3), 236 (1997).
- [2] Yu.A. Lebedev, Plasma Sources Sci. Technol., **24**, 053001 (2015). DOI: 10.1088/0963-0252/24/5/053001
- [3] И.И. Есаков, А.А. Раваев, Л.П. Грачев, И.А. Волобуев, Проблемы региональной энергетики, № 3, 65 (2019). DOI: 10.5281/zenodo.3562187
- [4] P.V. Bulat, I.I. Esakov, L.P. Grachev, K.N. Volkov, I.A. Volobuev, IEEE Trans. Plasma Sci., **49**, 1041 (2021). DOI: 10.1109/TPS.2021.3064286
- [5] K.V. Khodataev, AIAA Paper, 2007-0431 (2007).
- [6] 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].
- [7] I. Esakov, L. Grachev, K. Khodataev, A. Ravaev, N. Yurchenko, P. Vinogradsky, A. Zhdanov, AIAA Paper, 2009-0889 (2009).
- [8] 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].
- [9] P.V. Denissenko, M.P. Bulat, I.I. Esakov, L.P. Grachev, K.N. Volkov, I.A. Volobuev, V.V. Upyrev, P.V. Bulat, Combust. Flame, **202**, 417 (2019). DOI: 10.1016/j.combustflame.2019.01.029
- [10] V.M. Shibkov, A.A. Aleksandrov, V.A. Chernikov, A.P. Ershov, L.V. Shibkova, J. Propul. Power, **25**, 123 (2009). DOI: 10.2514/1.24803
- [11] V.A. Vinogradov, D.V. Komratov, A.Yu. Chirkov, J. Phys.: Conf. Ser., **1094**, 012027 (2018). DOI: 10.1088/1742-6596/1370/1/012022