

03;04;09;12

## Области реализации различных типов СВЧ-разряда в квазиоптических электромагнитных пучках

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

Московский радиотехнический институт РАН,  
117519 Москва, Россия  
e-mail: esakov@dataforce.net

(Поступило в Редакцию 23 января 2006 г.)

На основе экспериментальных наблюдений вводится классификация электрических разрядов в воздухе среднего и высокого давления в квазиоптических пучках электромагнитного излучения СВЧ-диапазона длин волн. Определяются диффузный и стримерный, надкритический, подкритический и глубоко подкритический типы. Для каждого типа разряда для двух длин волн электромагнитного поля выясняются области их реализации в зависимости от давления воздуха и уровня поля.

PACS: 52.80.Pi

### Введение

Рассматривается импульсный электрический разряд в воздухе в линейно поляризованных квазиоптических пучках электромагнитного (ЭМ) излучения СВЧ-диапазона длин волн  $\lambda$  [1–7]. При этом подразумевается разряд, который зажигается в следующих условиях:

- длина волны ЭМ-излучения  $\lambda$  от 1 до 10 см;
- давление  $p$  исходного воздуха атмосферного состава — от единиц до 760 Торг;
- в исходном воздухе концентрация свободных электронов определяется только естественными факторами;
- длительность ЭМ-импульсов с прямоугольной огибающей  $\tau_{\text{pul}}$  — несколько десятков микросекунд;
- ЭМ-импульсы — одиночные или с паузами между ними, обеспечивающими отсутствие взаимного влияния последовательных разрядов;
- разрядная область удалена от устройств, формирующих ЭМ-пучок, и близлежащих элементов конструкции на расстояния, не меньшие нескольких длин волн ЭМ-излучения  $\lambda$ ;
- уровень электрической составляющей исходного ЭМ-поля в разрядной области  $E_0$  незначительно превышает минимальный, критический пробойный уровень поля  $E_{\text{cr}}$ , обеспечивающий самостоятельный пробой воздуха при данном давлении  $p$ , или меньше его.

Такие разряды отличаются как по способу их реализации, так и по основным физическим факторам, ответственным за формирование их пространственной структуры и свойств. Так, если при  $E_0 > E_{\text{cr}}$  возможен самостоятельный электрический пробой воздуха, то при  $E_0 < E_{\text{cr}}$  пробой воздуха должен быть инициирован [3,6]. При низких давлениях воздуха структура разряда и его свойства определяются в основном ионизационно-полевыми процессами [5]. При сравнительно высоком давлении на формирование структуры разряда и его свойства существенно влияют уже и тепловые процессы в газе [5].

При указанной длительности ЭМ-излучения  $\tau_{\text{pul}}$  такие разряды являются сугубо динамическими объектами. В процессе развития они, как правило, „распространяются“ в пространстве преимущественно навстречу возбуждающему их ЭМ-излучению. Свойства внутренних областей этих разрядов существенно нестационарны.

Эксперименты показывают, что такие разряды, зажженные в некотором диапазоне давлений воздуха  $p$  и соответствующем уровне исходного поля  $E_0$ , способны энергетически эффективно взаимодействовать с возбуждающим их ЭМ-полем. Это дает основание рассматривать различные варианты их практического применения [8].

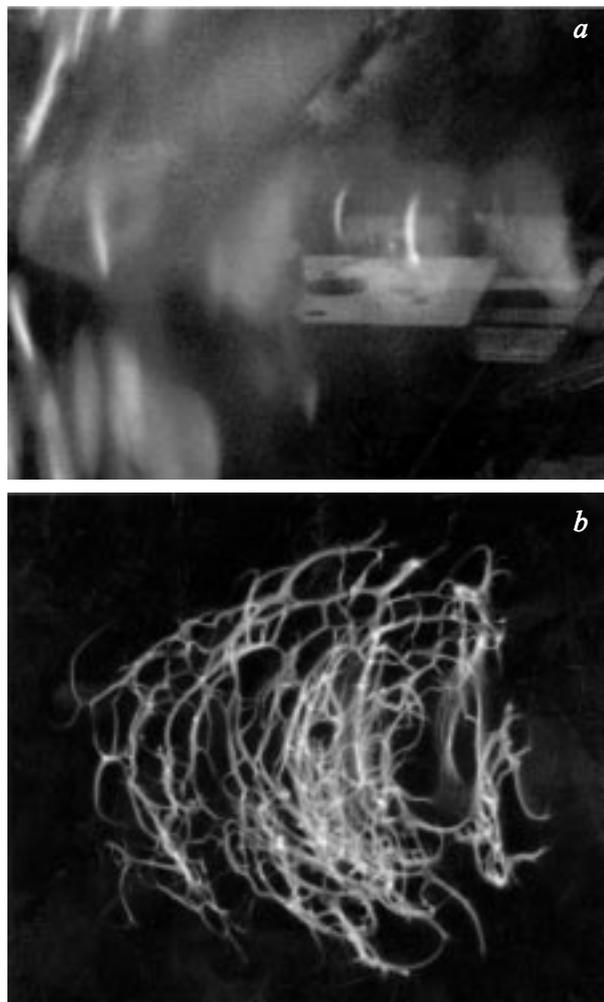
В некоторых работах производится частичная классификация таких разрядов [1–3]. В настоящей работе эта классификация производится более целенаправленно, и для каждого из определенных типов разряда экспериментально выясняется  $E_0$ – $p$  области их реализации. Эксперименты выполнялись в ЭМ-пучках с  $\lambda = 8.9$  и 2.5 см.

### СВЧ-разряд в пучке ЭМ-волны с $\lambda = 8.9$ см

Эксперименты в квазиоптическом пучке ЭМ-волны с  $\lambda = 8.9$  см выполнялись на установке, подробно описанной в работе [9].

В установке линейно поляризованное ЭМ-излучение длительностью  $\tau_{\text{pul}} = 40 \mu\text{s}$  фокусируется в центральной области „безэховой“ герметичной камеры с размерами, примерно равными  $10\lambda$ . При этом фокусное пятно имеет характерный поперечный размер  $\Delta$  в несколько сантиметров, а продольный —  $\Lambda \approx 10$  см. Максимальная амплитуда поля  $E_0$  в фокусной области ЭМ-пучка в различных импульсах может варьироваться от 6.5 кВ/см до 100 В/см. Давление воздуха  $p$  в рабочей камере устанавливается в диапазоне 3–760 Торг.

В экспериментальных условиях самостоятельный пробой воздуха осуществим только до  $p \approx 100$  Торг. При



**Рис. 1.** Надкритический, с  $E_0 > E_{cr}$ , СВЧ-разряд в квазиоптическом волновом пучке с  $\lambda = 8.9$  см при  $\tau_{pul} = 40$   $\mu$ s: *a* — диффузный ( $p = 15$  Torr,  $E_0 = 6.5$  kV/cm); *b* — стримерный ( $p = 130$  Torr,  $E_0 = 6.5$  kV/cm).

этом в опытах при давлении воздуха до нескольких десятков Torr горел диффузный тип разряда. С превышением же давления некоторого граничного, порогового значения  $p_{thres}$  диффузный тип разряда трансформируется в стримерный тип. Характерные снимки этих разрядов приведены на рис. 1. Это „интегральные“ фотографии, т.е. полученные с временем экспозиции  $\tau_{exp} \gg \tau_{pul}$ . На них, как и на всех последующих аналогичных иллюстрациях, СВЧ-излучение поступает слева, в вектор  $E_0$  вертикален.

Рис. 1, *a* соответствует одной из возможных реализаций надкритического, с  $E_0 > E_{cr}$  диффузного типа разряда, горящего при давлении воздуха  $p < p_{thres}$ . Пространственная структура и свойства такого разряда определяются в основном ионизационно-полевыми процессами, т.е. ход ионизации в разрядной области обусловлен взаимным динамическим влиянием исходного поля и поля нарабатываемой плазмы [5]. Простран-

ственная структура такого разряда зависит от давления воздуха. С ростом давления сравнительно однородное разрядное плазменное образование, заполняющее область ЭМ-пучка с  $E_0 \geq E_{cr}$  и в опытных условиях характерное для  $p < 10$  Torr, разбивается на отдельные диффузные плазмоиды. Они могут быть вытянуты как вдоль вектора  $E_0$  [1,4,5], так и поперек его [4,5]. Надкритический СВЧ-разряд диффузного типа практически не поглощает энергию возбуждающего его ЭМ-поля. Нагрев воздуха в области разряда не превышает нескольких десятков градусов [10].

На рис. 1, *b* представлено характерное изображение надкритического с  $E_0 > E_{cr}$  стримерного типа разряда, горящего при давлении воздуха  $p > p_{thres}$ . Такой разряд представляет собой сложную пространственно-развитую систему тонких плазменных каналов. Разряд зарождается на фоновом свободном электроны и формируется прорастающими и ветвящимися стримерными каналами. На ход ионизации воздуха в каналах существенно влияет ионизационно-перегревный процесс [5], а их удлинение и ветвление определяется величиной и распределением поля на их концах, головках. Отдельные участки плазменных каналов длиной, близкой к  $\lambda/2$ , электродинамически резонансно взаимодействуют с возбуждающим разряд ЭМ-полем. В результате СВЧ-разряд стримерного надкритического типа с пространственно-развитой структурой практически полностью поглощает ЭМ-энергию этого поля, что приводит к росту газовой температуры  $T$  в его резонансных плазменных каналах до тысячи градусов и выше. Именно это свойство такого типа разряда позволяет рассматривать различные способы его практического применения.

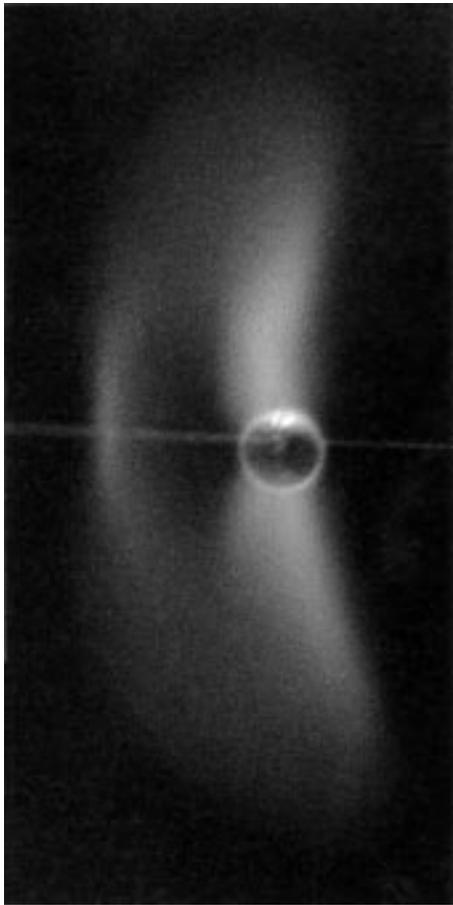
В то же время осуществить самостоятельную пробой воздуха в ЭМ-поле сантиметрового диапазона длин волн  $\lambda$  при сравнительно высоких давлениях  $p$  воздуха сложно. Так, даже предельно сфокусированный ЭМ-пучок имеет характерный поперечный размер фокального пятна  $\Delta \approx \lambda$ . В результате из-за ограниченности импульсной мощности традиционных импульсных СВЧ-генераторов  $P_{gen}$  величиной в  $10^5 - 10^6$  W, поле в фокусе такого пучка  $E_0$ , как правило, не превышает нескольких kV/cm. Для самостоятельного же электрического пробоя воздуха при  $p > 200$  Torr нужны десятки kV/cm [11]. Однако опыты показывают, что СВЧ-разряд в квазиоптическом волновом пучке может быть зажжен и в подкритическом поле при  $E_0 < E_{cr}$ . Для пробоя газа в этом случае должны быть приняты специальные меры, т.е. пробой должен быть инициирован.

Один из методически разработанных способов инициации СВЧ-пробоя заключается в помещении в ЭМ-пучок металлического шарика [12] или параллельного вектору  $E_0$  ЭМ-вибратора [13]; при диаметре шарика  $2a \ll \lambda/2$  поле на его полюсах, где вектор  $E_0$  перпендикулярен поверхности шарика, утраивается. При длине ЭМ-вибратора  $2L \approx \lambda/2$  и его диаметре  $2a \ll \lambda/2$  поле на полюсах вибратора возрастает многократно.

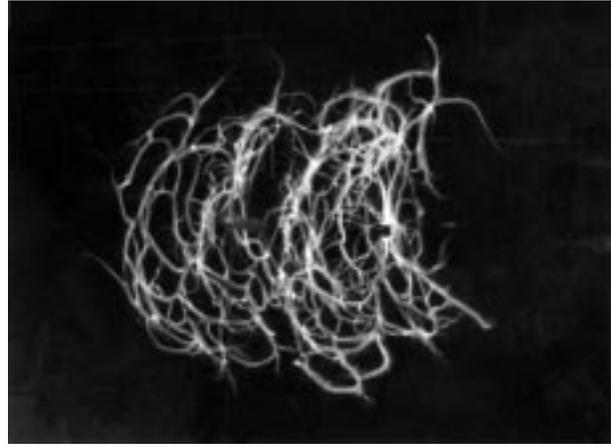
Опыты показали, что в зависимости от давления воздуха подкритические инициированные СВЧ-разряда в волновом ЭМ-пучке, как и разряды в надкритическом поле, бывают диффузного и стримерного типа. При этом трансформация типа разряда от диффузного к стримерному также происходит при превышении давлением воздуха  $p$  величины граничного давления  $p_{\text{thres}}$ .

Характерное изображение диффузного инициированного шариком подкритического разряда при величине поля  $E_0 < E_{\text{cr}}$  и давлении воздуха  $p < p_{\text{thres}}$  приведено на рис. 2. Плазменные области разрядов такого типа локализованы только около инициатора. При этом в зависимости от уровня поля или разрядная область плазменной дугой соединяет полюса инициатора (рис. 2), или диффузные плазменные „шапки“ локализируются только у его полюсов. Воздух в плазме таких разрядов в течение времени их горения, как и у надкритических диффузных разрядов, нагревается лишь на десятки градусов.

Как указывалось, в опытах в подкритическом поле с  $E_0 < E_{\text{cr}}$  при давлении воздуха  $p > p_{\text{thres}}$  инициированный разряд реализуется в стримерной форме. Однако в отличие от подкритических диффузных разрядов стримерный подкритический разряд бывает двух типов [14].



**Рис. 2.** Подкритический, с  $E_0 < E_{\text{cr}}$ , диффузный СВЧ-разряд в волновом пучке ( $\lambda = 8.9$  см,  $\tau_{\text{pul}} = 20 \mu\text{s}$ ,  $p = 20$  Торр,  $E_0 = 7 \cdot 10^2$  В/см, разряд инициирован шариком с  $2a = 2.5$  мм).

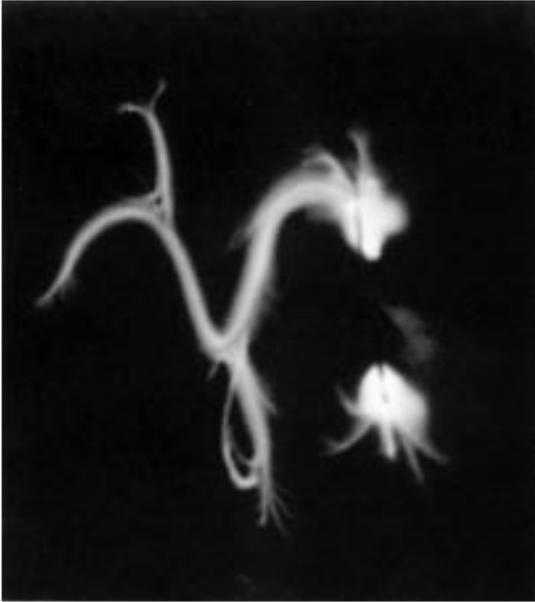


**Рис. 3.** Подкритический, с  $E_0 < E_{\text{cr}}$ , стримерный СВЧ-разряд в волновом пучке ( $\lambda = 8.9$  см,  $\tau_{\text{pul}} = 40 \mu\text{s}$ ,  $p = 360$  Торр,  $E_0 = 6.5$  кВ/см, разряд инициирован шариком с  $2a = 5$  мм).

В определенном диапазоне подкритичности поля при  $E_{\text{cr}} > E_0 > E_{\text{thres}}$ , где  $E_{\text{thres}}$  — некий граничный уровень поля, стримерный разряд, зародившись на полюсах инициатора, способен „отрываться“ от него. В этом случае, так же как и в надкритическом поле, удлиняющиеся и ветвящиеся стримерные плазменные каналы формируют его пространственно-развитую структуру. Характерная фотография этого типа разряда приведена на рис. 3.

Изображение типичного элемента, набор которых, в основном, и формирует пространственную структуру подкритического, с  $E_0 < E_{\text{cr}}$ , стримерного разряда, представлено на рис. 4. Отдельные участки этой „синусоиды“ с отрезками на ее вершинах, параллельными вектору  $E_0$  исходного поля, являются электродинамически резонансными участками. Их наличие обеспечивает высокую эффективность энергетического взаимодействия подкритического разряда с пространственно-развитой стримерной структурой с возбуждающим его ЭМ-полем. Температура  $T$  воздуха в резонансных плазменных участках такого разряда возрастает до тысяч градусов. В результате в опытах в месте касания плазменных каналов поверхности инициатора, выполненного, например, из меди или алюминия, фиксируется ее испарение.

С уменьшением уровня исходного поля  $E_0$  ниже граничного уровня  $E_{\text{thres}}$  глубоко подкритический, с  $E_0 \ll E_{\text{cr}}$ , стримерный разряд теряет способность отрываться от инициатора. При экспериментах в полях такого низкого уровня пробой воздуха, как правило, инициировался ЭМ-вибратором. Стримерные плазменные каналы зажигающегося при этом глубоко подкритического разряда дугой соединяют концы вибратора или соединяют концы вибратора с его боковой поверхностью, или локализируются только у концов вибратора. Такая электродинамическая система, состоящая из ЭМ-вибратора и плазменных каналов, также характеризуется резонансными свойствами. В результате газовая температура  $T$  в плазменных каналах и в этом случае



**Рис. 4.** Характерный структурообразующий элемент подкритического, с  $E_0 < E_{cr}$ , стримерного СВЧ-разряда в волновом пучке ( $\lambda = 8.9$  см,  $\tau_{pul} = 40$  мкс,  $p = 150$  Торг,  $E_0 = 1.2$  В/см, разряд инициирован ЭМ-вибратором с  $2L = 20$  и  $2a = 0.8$  мм).

достигает тысяч градусов, что приводит к испарению поверхности вибратора в местах ее касания разрядными каналами.

Таким образом, из опытов следует, что в квазиоптическом ЭМ-пучке с  $\lambda = 8.9$  см наблюдаются следующие типы СВЧ-разряда: диффузный надкритический, стримерный надкритический, диффузный подкритический, стримерный подкритический и стримерный глубоко подкритический. На рис. 5 показаны  $E_0$ – $p$  области реализации этих типов разряда [15], которые соответственно обозначены цифрами I–V. Эти области определены в результате анализа набора интегральных фотографий разрядов, горящих при установленном в каждом конкретном опыте уровне исходного поля  $E_0$  и давлении воздуха  $p$ .

На рис. 5 I — линия  $E_0 = E_{cr}(p)$ . Выше ее возможен самостоятельный пробой воздуха, ниже — пробой воздуха должен быть инициирован. В экспериментальных условиях можно пользоваться понятием эффективного критического пробойного поля, его амплитуда  $E_{cr} = 42p\sqrt{1 + (\omega/v_c)^2}$ ; В/см [11], где  $\omega$ ;  $1/s$  — круговая частота поля,  $v_c = 4 \cdot 10^9 p$ ;  $1/s$  — частота столкновений плазменных электронов с молекулами воздуха, а давление воздуха  $p$  в обоих выражениях имеет размерность Торг. Экспериментально определенная линия 2 соответствует граничному давлению  $p_{thres}$ . Она отделяет области диффузного и стримерного типов разряда. Левее ее реализуются разряды диффузного типа, правее — стримерного. И наконец, определенная в опытах [14] линия 3 соответствует полю  $E_{thres}(p)$ . В области давлений  $p > p_{thres}$  она отделяет подкритические, с  $E_0 < E_{cr}$ ,

способные отрываться от инициатора стримерные разряды с пространственно-развитой структурой и глубоко подкритические, с  $E_0 \ll E_{cr}$ , стримерные разряды с привязанными к инициатору плазменными каналами.

Линия 2 для  $p_{thres}$  в определенном смысле условна. В опытах есть некоторая область давлений воздуха, в которой идентифицировать диффузный или стримерный типа разряда затруднительно. На рис. 5 эта область заштрихована.

Во всем диапазоне давлений воздуха ниже линии 1 есть некоторая узкая переходная область с  $E_0 < E_{cr}$ . В этой области малое отражение ЭМ-волны от инициированного подкритического разряда может приводить к самостоятельному пробую воздуха в ЭМ-пучке перед этим разрядом [3].

### СВЧ-разряд в пучке ЭМ-волны с $\lambda = 2.5$ см

Эксперименты в квазиоптическом пучке ЭМ-волны с  $\lambda = 2.5$  см выполнялись на установке, подробно описанной в работе [16].

В этих экспериментах линейно поляризованное ЭМ-излучение длительностью  $\tau_{pul} = 35$  мкс фокусируется в центральной области „безэховой“ герметичной камеры с размерами  $\approx 16\lambda$ , фокусное пятно имеет характерный поперечный размер  $\Delta \approx \lambda$ . В продольном направлении амплитуда поля в ЭМ-пучке существенно модулирована. В околофокусной области характерный период модуляции поля  $\Lambda \approx 1.5$  см. В опытах отсутствует возможность изменять мощность СВЧ-генератора  $P_{gen} \approx 100$  кВт. В последовательных импульсах она остается неизменной. При этом максимальная амплитуда поля в фокусной области ЭМ-пучка  $E_0 = 3.7$  кВ/см, а например, в ближайшем к нему минимуме  $E_0 = 1.8$  кВ/см. При удалении от фокуса вдоль оси ЭМ-пучка уровень поля  $E_0$  в среднем значительно уменьшается. Давление воздуха  $p$  в камере устанавливается в диапазоне 3–760 Торг.

На данной установке самостоятельный пробой воздуха в поле с  $E_0 > E_{cr}$  осуществим только до  $p \approx 80$  Торг. В опытах в надкритическом поле, как и в ЭМ-пучке с  $\lambda = 8.9$  см, при низких давлениях воздуха фиксируется диффузный тип разряда. Но с ростом  $p$  до максимально возможного значения в данных экспериментальных условиях неинициированный надкритический разряд продолжает оставаться диффузным.

В опытах при исследовании подкритических типов разряда для инициации пробоя воздуха использовался ЭМ-вибратор. При этом чтобы исследовать разряд в широком диапазоне уровня исходного поля  $E_0$ , вибратор помещался в различные точки ЭМ-пучка по его оси. Эксперименты показали, что, как и в поле с  $\lambda = 8.9$  см, в подкритическом инициированный разряд на длине волны  $\lambda = 2.5$  см бывает диффузным, стримерным с пространственно-развитой структурой и стримерным с привязанными к инициатору плазменными каналами.

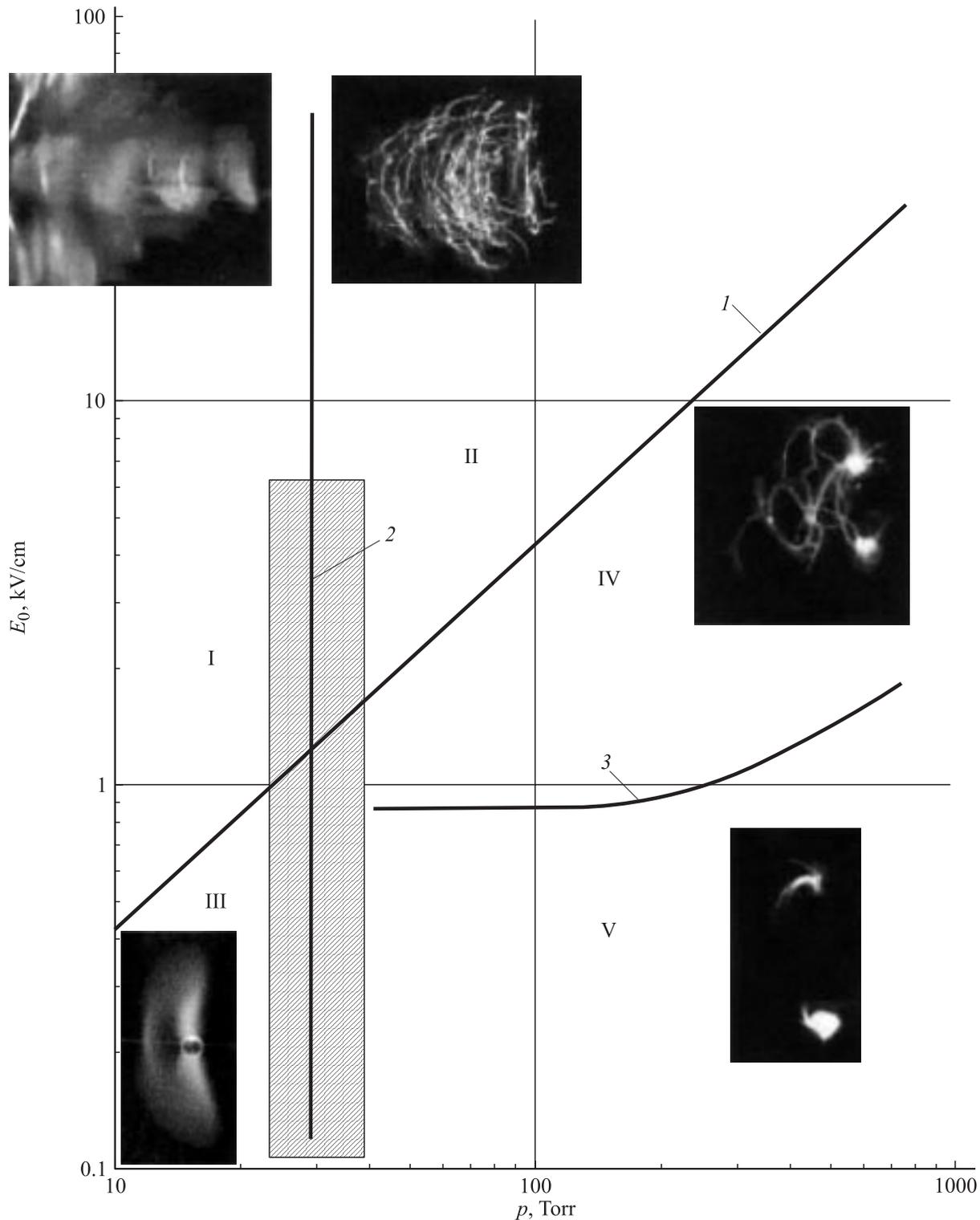


Рис. 5. Области реализации различных типов СВЧ-разряда в воздухе в квазиоптическом волновом пучке с  $\lambda = 8.9$  см.

В экспериментах при фиксированных значениях параметров  $E_0$  и  $p$  производилась фоторегистрация разряда, это позволило определить  $E_0$ – $p$  области реализации различных типов СВЧ-разряда на этой длине волны [16]. Эти области показаны на рис. 6, в соответствии с

типом разряда они обозначены цифрами I–V. На этом рисунке физический смысл линий 1–3 идентичен рис. 5. Рис. 6 иллюстрирует характерную пространственную структуру различных типов СВЧ-разряда в воздухе в ЭМ-пучке с  $\lambda = 2.5$  см.

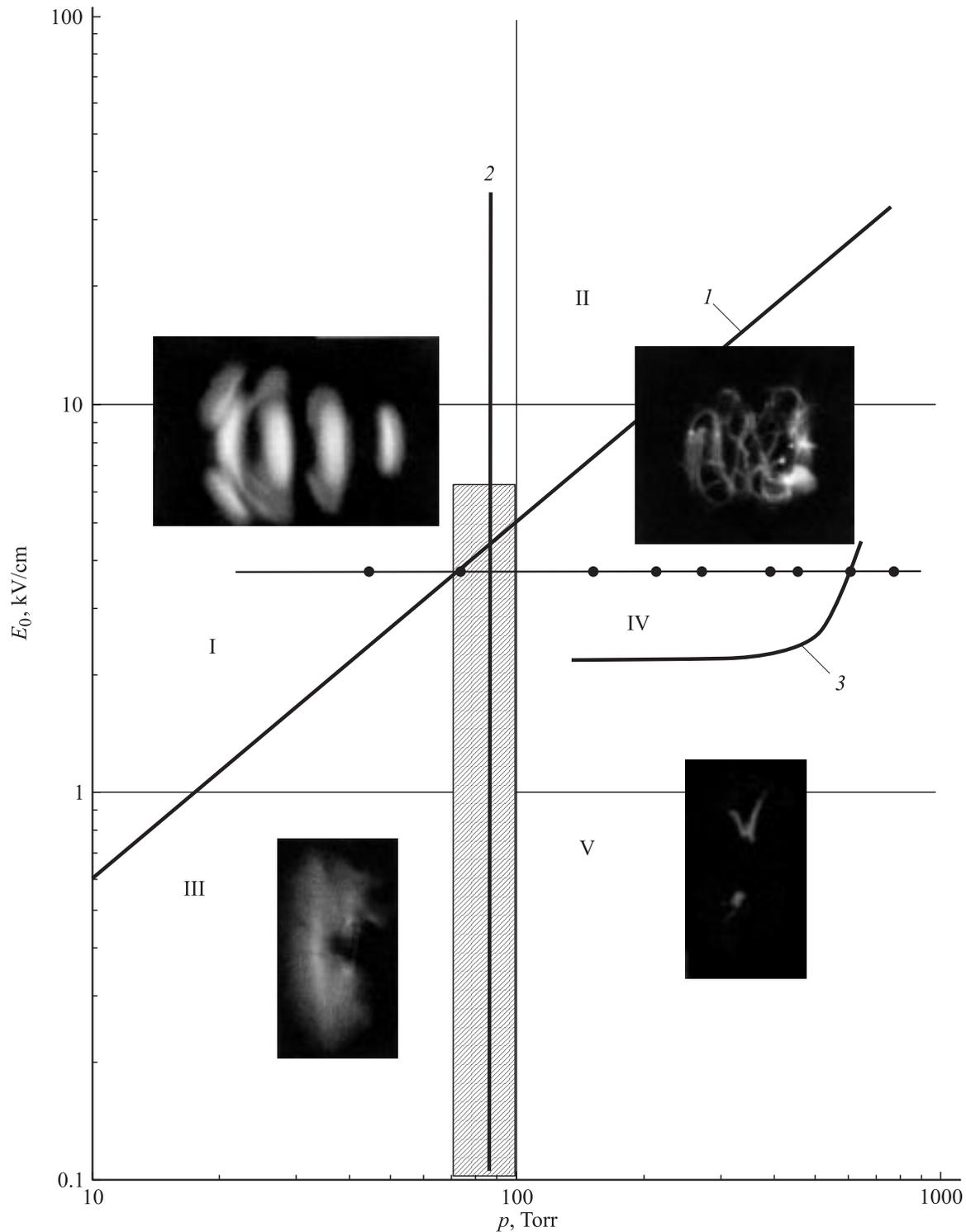
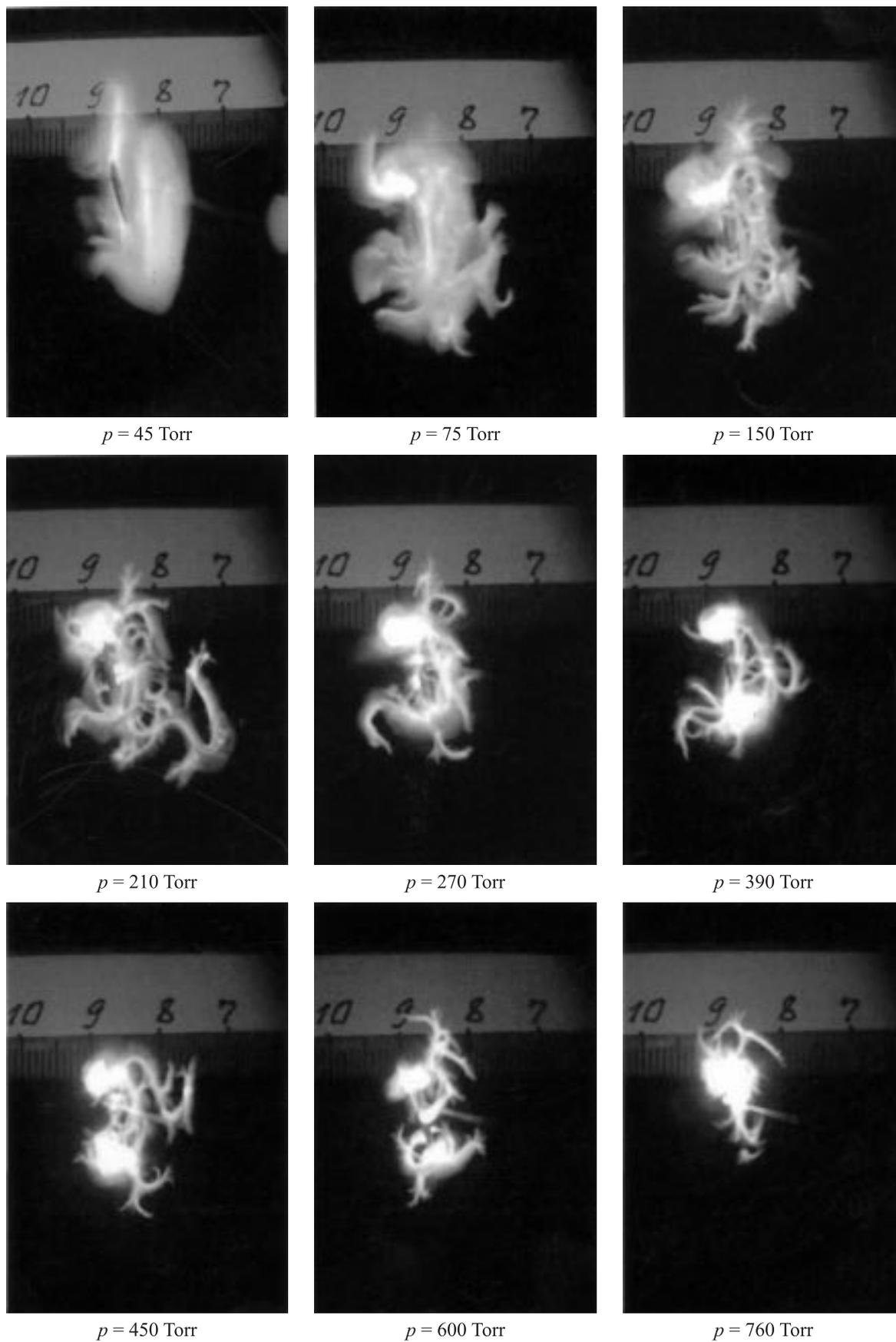


Рис. 6. Области реализации различных типов СВЧ-разряда в квазиоптическом волновом пучке с  $\lambda = 2.5$  см.

Сравнение рис. 6 и 5 показывает, что границы областей реализации различных типов СВЧ-разряда для использованных длин волн ЭМ-поля не совпадают. С уменьшением длины волны  $\lambda$  граничное давление  $p_{\text{thres}}$  смещается в сторону больших давлений воздуха  $p$ , а граничное поле  $E_{\text{thres}}$  — в сторону больших полей  $E_0$ .

В качестве примера на рис. 7 дополнительно помещены изображения различных типов разряда в поле с  $\lambda = 2.5$  см (ЭМ излучение поступает справа). Они получены при помещении инициирующей пробой воздуха ЭМ-вибратора с  $2L = 12$  мм и  $2a = 1.2$  мм в фокус ЭМ-пучка, т. е. в область с максимальным исходным по-



**Рис. 7.** СВЧ-разряды различных типов в квазиоптическом волновом пучке с  $\lambda = 2.5 \text{ cm}$  при  $E_0 = 3.7 \text{ kV/cm}$ .

лем  $E_0 = 3.7 \text{ kV/cm}$ . Фотографии соответствуют различным давлениям воздуха  $p$  в рабочей камере установки. На них ЭМ-вибратор задает масштаб изображений.

Прокомментируем помещенные на рис. 7 иллюстрации. Для наглядности на рис. 6 проведена горизонтальная линия, соответствующая полю  $E_0 = 3.7 \text{ kV/cm}$ , на ней отмечены точки, соответствующие давлениям воздуха  $p$ , указанным на рис. 7.

Изображение, полученное при  $p = 45 \text{ Torr}$ , дает характерный вид разряда, реализующегося в области I на рис. 6; видно, что этот разряд является диффузным и надкритическим. Его сравнительно однородные плазменные образования локализованы в фокальной пучности ЭМ-поля, где расположен ЭМ-вибратор, и в ближайшей области максимума поля.

Разряд при  $p = 75 \text{ Torr}$  уже видоизменился. По рис. 6 он соответствует разряду, находящемуся в переходной области между диффузным и стримерным его типами. На снимке зафиксирована существенная диффузия составляющая разряда, однако видно, что поверхность верхнего конца инициатора испаряется. Это характерно уже для стримерных типов разряда.

Фотографии, полученные при давлениях  $p$  от 150 до 450 Torr, соответствуют подкритическому, с  $E_0 < E_{\text{cr}}$ , стримерному типу разряда с пространственно-развитой структурой, т.е. области IV (рис. 6). На снимках, соответствующих  $p = 210$  и 450 Torr, четко видны характерные плазменные синусоиды с отростками, формирующие объемную структуру разрядов данного типа. Для всех разрядов этой серии характерно испарение поверхности иницирующего их ЭМ-вибратора, что свидетельствует об энергетической эффективности взаимодействия разряда с ЭМ-полем.

Разряд при  $p = 60 \text{ Torr}$ , как следует из рис. 6, лежит на границе между подкритическим, при  $E_0 < E_{\text{thres}}$ , и глубоко подкритическим, при  $E_0 \ll E_{\text{cr}}$ , стримерными разрядами. Разряд же при  $p = 760 \text{ Torr}$  находится уже в области глубоко подкритических стримерных разрядов. По рис. 6 этому экспериментальному значению поля  $E_0$  и давлению воздуха  $p$  соответствует точка, находящаяся правее линии 3, т.е. области V.

## Заключение

Таким образом, в исследованном диапазоне длин волн ЭМ-поля  $\lambda$  введенная классификация типов электрического СВЧ-разряда в воздухе в квазиоптическом ЭМ-пучке является универсальной. Остается неясным, сохранится ли она при существенно больших или меньших длинах волн  $\lambda$ . Так, на формирование пространственно-развитой структуры стримерного подкритического разряда, способного отрываться от инициатора, существенно влияет электродинамическое резонансное свойство отдельных участков его плазменных каналов, длиной, соизмеримой с  $\lambda/2$ . При значительном выходе за исследованный диапазон длин волн ЭМ-поля

это их свойство может не сохраниться. С уменьшением длины волны поля область реализации подкритических стримерных разрядов с пространственно-развитой структурой смещается в сторону высоких давлений воздуха  $p$  и уровней исходного поля  $E_0$ . Может оказаться, что при существенном уменьшении длины волны поля эта область  $E_0-p$  будет выходить за пределы, например, атмосферного давления воздуха. При выходе за исследованный диапазон длин волн ЭМ-поля могут выявиться и другие, ограничивающие данную классификацию разрядов, физические факторы.

В работе [3] приведены результаты экспериментов по исследованию СВЧ-разряда в квазиоптическом ЭМ-пучке с  $\lambda = 4.3 \text{ cm}$  в воздухе при  $p \leq 250 \text{ Torr}$ . Исследования показали, что в этих условиях граничное поле, отделяющее подкритический и глубоко подкритический типы стримерного разряда,  $E_{\text{thres}} = 1.8 \text{ kV/cm}$ . Измерения дали граничное давление воздуха, выше которого реализуется стримерный тип разряда  $p_{\text{thres}} = 70 \text{ Torr}$ . Эти, указанные в работе [3], значения  $E_{\text{thres}}$  и  $p_{\text{thres}}$  при  $\lambda = 4.3 \text{ cm}$ , как и следовало ожидать, лежат между аналогичными величинами, показанными на рис. 5 и 6 настоящей работы при  $\lambda = 8.9$  и 2.5 cm.

Описанные в работах [3,17] экспериментальные исследования анализируемого электрического разряда в различных газах дают основание предположить, что введенная в настоящей работе классификация типов СВЧ-разряда в квазиоптических ЭМ-пучках справедлива не только при его горении в воздухе.

Проведенные исследования позволяют при разработке практических устройств, использующих выбранный тип СВЧ-разряда в воздухе, задавать необходимые для его реализации параметры. Они формулируют вопрос об определении областей реализации введенных типов такого разряда и в других газах. Приведенные в настоящей работе результаты могут быть использованы при построении адекватных физических моделей введенных типов СВЧ-разряда.

## Список литературы

- [1] Грачев Л.П., Есаков И.И., Мишин Г.И., Никитин М.Ю. и др. // ЖТФ. 1985. Т. 55. Вып. 2. С. 389–391.
- [2] Грачев Л.П., Есаков И.И., Мишин Г.И. и др. // ЖТФ. 1994. Т. 64. Вып. 1. С. 74–88.
- [3] Бровки В.Г., Колесниченко Ю.Ф. // Радиофизика. М., 1991. С. 71–79.
- [4] Вихарев А.Л., Голубев С.В., Еремин Б.Г. и др. // Радиофизика. М., 1991. С. 93–108.
- [5] Вихарев А.Л., Гильденберг В.Б., Ким А.В. и др. // Высокочастотный разряд в волновых полях. Горький, 1988. С. 41–134.
- [6] Голубев С.В., Грицинин С.И., Зорин В.Г. и др. // Высокочастотный разряд в волновых полях. Горький, 1988. С. 136–195.
- [7] Зарин А.С., Кузовников А.А., Шибков В.М. Свободно локализованный СВЧ разряд в воздухе. М.: Нефть и газ, 1996. 204 с.

- [8] *Esakov I.I., Grachev L.P., Khodataev K.V. et al. // 43<sup>rd</sup> AIAA Aerospace Sci. Meet. and Exhibit. 10–13 January 2005. Reno, Nevada. Paper AIAA-2005-989.*
- [9] *Грачев Л.П., Есаков И.И., Ходатаев К.В., Цыленков В.В. Установка для исследования импульсного безэлектродного СВЧ разряда в газах высокого и среднего давления. М., 1990. 14 с.*
- [10] *Есаков И.И. // Изв. СО АН СССР. Сер. Технич. наук. 1990. Вып. 1. С. 98–102.*
- [11] *Мак-Доналд А. Сверхвысокочастотный пробой в газах. М.: Мир, 1969. 212 с.*
- [12] *Грачев Л.П., Есаков И.И., Ходатаев К.В. и др. // Физика плазмы. 1992. Т. 18. Вып. 3. С. 411–415.*
- [13] *Грачев Л.П., Есаков И.И., Мишин Г.И. и др. // ЖТФ. 1995. Т. 65. Вып. 7. С. 60–67.*
- [14] *Грачев Л.П., Есаков И.И., Ходатаев К.В. // ЖТФ. 1999. Т. 69. Вып. 11. С. 19–24.*
- [15] *Esakov I.I., Grachev L.P., Khodataev K.V. et al. // 32<sup>nd</sup> AIAA Plasmadynamics and Lasers Conf. and 4<sup>th</sup> Weakly Ionized Gases Workshop. 11–14 June 2001. Anaheim, CA. Paper AIAA-2001-2939.*
- [16] *Esakov I.I., Grachev L.P., Burchkov V.L. // 43<sup>rd</sup> AIAA Aerospace Sci. Meet. and Exhibit. 10–13 January 2005. Reno, Nevada. Paper AIAA-2005-597.*
- [17] *Грачев Л.П., Есаков И.И., Ходатаев К.В. // ЖТФ. 1998. Т. 68. Вып. 4. С. 33–36.*