

ПРОСТРАНСТВЕННО ЛОКАЛИЗОВАННЫЙ МИКРОВОЛНОВЫЙ РАЗРЯД В АТМОСФЕРЕ

В. А. Жильцов, Э. А. Манькин, Е. А. Петренко, А. А. Сковорода

ГНЦ "И. В. Курчатовский институт", Институт ядерного синтеза, Москва, Россия

Дано описание методики гарантированного получения пространственно локализованного микроволнового разряда сфероидной формы в спокойной атмосфере и измерены его основные характеристики в стационарной стадии и в режиме свободного движения в воздухе. Стационарный режим горения описывается в общих чертах теорией равновесных СВЧ-разрядов с учетом измеренного характера движения газа из-за свободной конвекции. Режим свободной конвекции движения объясняется по аналогии с движением термиком в Земной атмосфере.

Стационарные безэлектродные разряды при атмосферном давлении с образованием локализованных в пространстве низкотемпературных ($T < 1$ эВ) плазменных объектов известны давно, например в [1—3]. Однако происходящие в них сложные электродинамические, аэродинамические и плазмохимические процессы плохо исследованы как теоретически, так и экспериментально. Существующая литература [4—6] не содержит, на наш взгляд, достаточной информации по данным вопросам.

В настоящей работе экспериментально исследуется пространственно локализованный (размер существенно меньше размеров разрядной камеры) СВЧ-разряд сфероидной формы в спокойной атмосфере. Ставится задача надежного получения локализованного плазменного образования (ЛПО) и изучения его физических свойств и параметров.

Экспериментальная установка

На рис. 1 показана схема установки, в основном повторяющая условия проведения экспериментов в работе [3]: частота стационарного магнетрона 2,45 ГГц; максимальная мощность 5 кВт; размеры цилиндрической медной камеры $\varnothing 160 \times 380$ мм; волновод соединялся с камерой в центре прямоугольным отверстием 40×80 мм с ориентацией меньшего размера вдоль оси цилиндра камеры; торцы цилиндра закрыты латунной плетеной сеткой с ячейкой размерами 2×2 мм. В некоторых опытах одна из сеток заменялась на подвижный поршень. В среднем сечении камеры, помимо ввода волновода, располагались несколько диагностических отверстий.

Диагностика включала в себя системы калориметрических измерений СВЧ-мощности и мощности ЛПО; системы оптических и пирометрических измерений температуры ЛПО; цветной видеосъемки с записью на видеоманитовфон с последующей цифровой обработкой изображений ЛПО в видимом диапазоне спектра; тепловизора для получения инфракрасных изображений ЛПО и измерений распределения СВЧ-полей в разрядной камере; электрических и магнитных зондов.

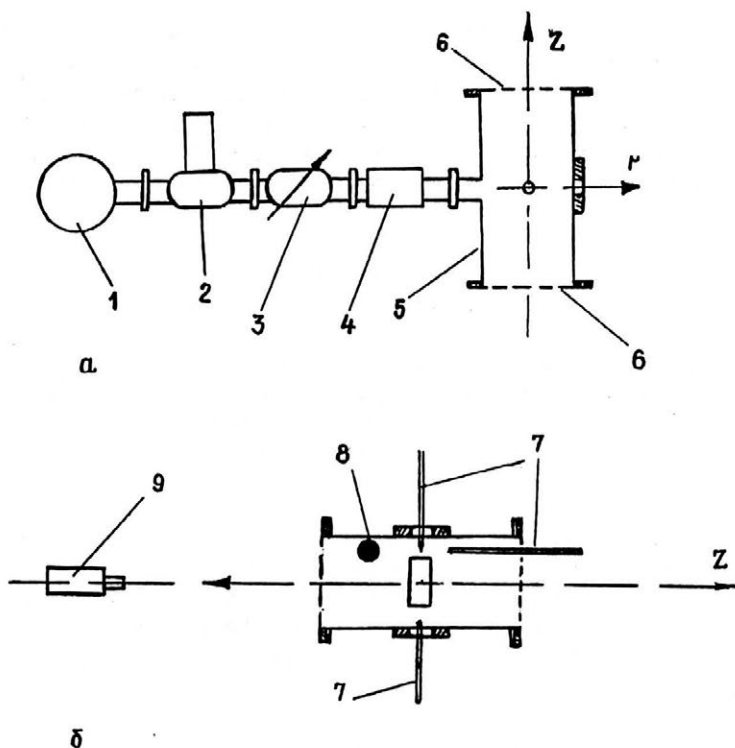


Рис. 1. Общая схема установки (а):
 1 — магнетрон; 2 — ферритовый циркулятор; 3 — плавный ослабитель; 4 — защитная секция; 5 — резонатор; 6 — торцевые сетки;
 б — схема расположения резонатора и диагностики:
 7 — зондовые вводы; 8 — ЛПО; 9 — видеокамера (тепловизор, пирометр, монохроматор)

Инициирование разряда

Поскольку напряженность электрических полей в эксперименте, определяемая мощностью магнетрона, меньше пробивного значения даже несмотря на то, что разрядная камера играет роль сверхразмерного (размеры больше размеров длины СВЧ-волны) резонатора, то необходима инициация разряда. Наиболее легко зажигается разряд, когда до инициации в разрядной камере путем изменения длины камеры устанавливается один тип колебаний. В описываемых нами экспериментах это был тип TE_{214} .

Было использовано несколько способов инициации разряда, основанных на создании локальных условий для возможности пробоя:

внесение пламени (горящей спички, свечи и др.) в камеру. При этом локальный нагрев воздуха приводит к существенному уменьшению плотности газа в центре пламени, т. е. к понижению уровня пробоя;

внесение металлической заземленной иглы в камеру. При этом локально у иглы растет напряженность СВЧ-поля, а ее разогрев СВЧ-токами понижает плотность газа, что в итоге приводит к эффективному, простому и наиболее часто используемому инициированию разряда;

внесение металлической изолированной трубки диаметром 3 мм с подачей в нее небольшого потока аргона. При этом при осуществлении искрового пробоя между трубкой и заземленной разрядной камерой на трубке зажигается плазмотронный разряд в виде струи, которой используется затем для инициирования ЛПО.

При условии наличия одного типа СВЧ-колебаний в разрядной камере и внесении инициатора в пучность поля вероятность возникновения разряда равна практически единице.

Свойства разряда

Форма и динамика разряда

Визуальное наблюдение и анализ видеозаписей свидетельствуют о большом многообразии разрядных явлений, наблюдаемых в использованной нами "геометрии" опытов. Многие из них описаны в работе [3]. В данной работе исследуются ЛПО сферической формы в спокойной (без вынужденной конвекции) атмосфере.

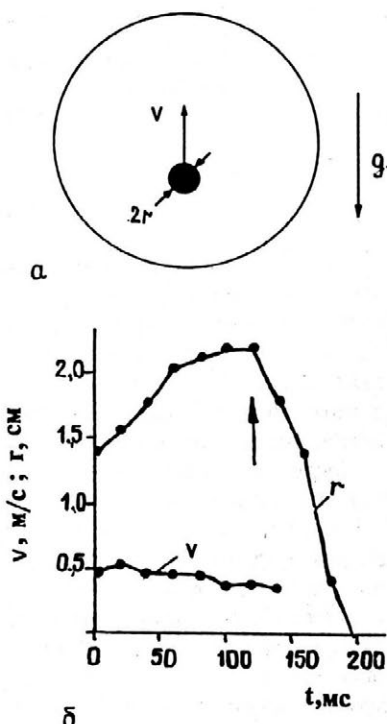
При инициации разряда в нижней части камеры ЛПО отрывались от инициатора и свободно поднимались вверх в течение 0,15 с, пока не достигали верхней стенки камеры. Подъемная сила Архимеда, появляющаяся из-за уменьшения плотности воздуха внутри ЛПО в результате нагрева, вызывает подъем вверх, а размеры камеры определяют время свободного полета.

На рис. 2 приведены схема образования и подъема ЛПО в камере и измеренные зависимости скорости движения центра ЛПО и характерного диаметра в процессе движения. Видно, что движение ЛПО происходит практически равномерно со скоростью $v \approx 0,5$ м/с. Размер ЛПО при этом увеличивается до 4 см со скоростью $v_r \approx 0,1$ м/с.

При достижении стенки возможны два варианта: ЛПО медленно исчезает (этот случай отражен на рис. 2) или, приняв форму полусфероида, существует стационарно в течение многих часов.

На рис. 3 показана схема структуры свечения стационарного ЛПО, полученной по результатам видеосъемки. Наблюдается существование сложной структуры свечения, и на стадии подъема на фотографиях с короткими выдержками не наблюдается наличия каких-либо структур, отличных от сферических. Структура свечения оказывается связанной с пятном на металлической стенке в центре ЛПО. Это пятно появляется при приближении ЛПО к металлической поверхности ближе чем 5 мм и исчезает при использовании дополнительной кварцевой верхней стенки в разрядной камере. Мы связываем это пятно с появлением дуги в результате проявления детектирующих свойств СВЧ-разряда у металлической стенки [7].

Рис. 2. Схема подъема ЛПО в камере под действием силы Архимеда (а) и измеренная зависимость радиуса r и скорости подъема v ЛПО при свободном полете (б). Стрелкой на рис 2, б показан момент касания ЛПО стенки резонатора



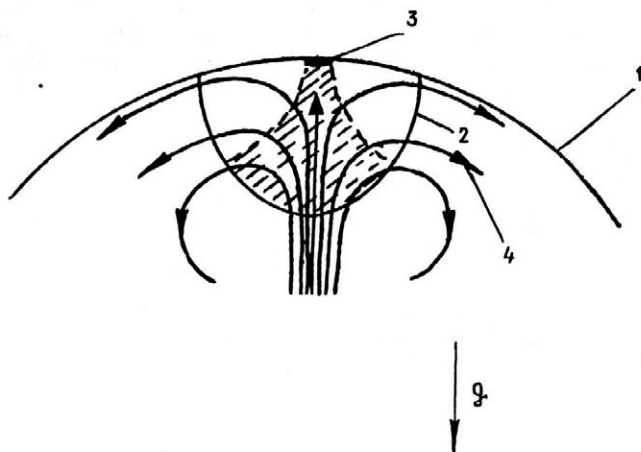


Рис. 3. Схема структуры свечения и циркуляции газа вблизи ЛПО:
 1 — стенка резонатора; 2 — видимая граница плазмы; 3 — яркое катодное пятно; 4 — линии тока газа; g — направление силы тяжести (заштрихована область более яркого свечения)

Наблюдения показывают, что дуговое пятно является побочным явлением и не определяет основных свойств разряда.

Описанное поведение ЛПО является типичным. В некоторых случаях удается наблюдать одновременное существование двух ЛПО и более на стадии полета после инициации. В стационарных условиях с металлической стенкой сверху всегда наблюдалось одно ЛПО, а с диэлектрической стенкой сверху — два ЛПО и более в зависимости от СВЧ-мощности (с ростом мощности число отдельных ЛПО увеличивается).

Параметры ЛПО

А. Энергетические характеристики

Калориметрические измерения мощности СВЧ-генератора $P_{\text{ген}}$, отраженной СВЧ-мощности $P_{\text{отр}}$ и тепловой мощности P_T , выделяемой в стенках разрядной камеры, показывают выполнение соотношения

$$P_{\text{ген}} = P_{\text{отр}} + P_T.$$

Это позволяет использовать величину P_T в качестве мощности ЛПО, которая достигает 1,5 кВт в описываемых экспериментах. Удельная мощность достигает величины 50 Вт/см³. При изменении мощности магнетрона ниже определенного уровня ЛПО существуют в стадии полета, но исчезают при соприкосновении со стенкой, при увеличении мощности размеры стационарного ЛПО увеличиваются незначительно.

Выполнение вышеприведенного уравнения показывает, что радиационные потери ЛПО незначительны по сравнению с теплопроводными потерями на стенку.

Б. Измерение температуры газа внутри ЛПО

Проведенные пирометрические измерения температуры ЛПО в стационарном состоянии дали значение $T \approx 3500$ К, близкое к получаемым в других экспериментах. Помещение в центр ЛПО тонких керамических палочек и приводило к их плавлению и испарению, что свидетельствовало о температуре газа, превышающей 3000 К.

Пространственное распределение температуры определялось с помощью получения инфракрасных изображений тепловизором. Инфракрасное и видимое изображения стационарного ЛПО показаны на рис. 4. Видны сфероидная форма, примерное равенство размеров и наличие горячего ядра.

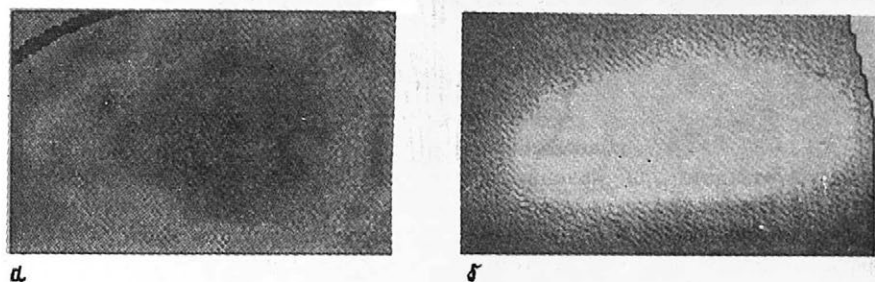


Рис. 4. Видеоизображения ЛПО в инфракрасной (а) и видимой (б) областях спектра

Цветные видеоизображения ЛПО показывают чередование цветов по мере перехода от центра к периферии, которые свидетельствуют о существовании горячего ядра с достаточно резким спадом температуры на периферии. Как показывают инфракрасные измерения, на стадии полета ЛПО имеют в центре более высокую температуру. Отметим, что распределения носят интегральный характер, поскольку интенсивность регистрируемого излучения зависит от размера излучающей области вдоль направления съемки и не совпадает с истинным профилем температуры (он может быть, например, с провалом в центре).

В. Спектральные оптические измерения

В стационарной стадии у металлической стенки были измерены спектры излучения в видимом диапазоне. Спектры имеют непрерывный характер, молекулярные полосы компонента воздуха и характеризуются отсутствием интенсивных атомарных линий. Характер спектра соответствует измеренной температуре газа. Заметим, что при дополнительном вводе в камеру потока аргона характер спектра мало изменяется и отдельные линии аргона практически не регистрируются. Общая спектральная картина очень близка к спектрам пламени при горении [8].

Г. Зондовые измерения

Стационарное помещение тонких зондов внутрь разрядной камеры оказывается невозможным из-за их сгорания при подаче СВЧ-мощности. Однако если вводить зонд быстро вдоль стенки разрядной камеры, он сохраняется и может пересекать плазменное образование. Мы использовали обычный ленгмюровский зонд для измерения потенциала и коаксиальный ВЧ-зонд для измерения распределения СВЧ-полей в разрядной камере при наличии в ней ЛПО. Измерения показали, что ЛПО в стационарном состоянии вблизи стенки имеет потенциал в несколько вольт и структура СВЧ-полей в камере кардинально изменяется по сравнению со структурой полей в отсутствие ЛПО.

Д. Структура свободных конвективных потоков газа

В стационарном режиме у металлической стенки мы исследовали установившийся режим свободной (самопроизвольной) конвекции. Визуализация газовых потоков вне ЛПО производилась с помощью дымов, внутри ЛПО — вводом в него микрочастиц, которые светились при испарении. Распределение температур газовых потоков контролировалось с помощью тепловизора. Схема течения, восстановленная из описанных выше измерений, показана на рис. 3.

Наиболее характерной чертой этого течения является наличие особой точки с нулевой скоростью. Холодный газ входит в основном по центру ЛПО, резко увеличивает скорость внутри (в $T/T_{\text{комн}}$ раз) и тепло выносится нагретым воздухом из ЛПО вдоль стенок разрядной камеры. Эти потоки горячего воздуха хорошо видны на инфракрасных изображениях разряда. Скорость газа внутри ЛПО составляет $\sim 0,3$ м/с.

Е. Распад ЛПО

Быстрое выключение СВЧ-мощности (за 1 мкс) приводило к достаточно медленному исчезновению видимого свечения плазмы. На рис. 5 показана зависимость интенсивности свечения от времени на стадии распада ЛПО у стенки камеры. Распад идет по экспоненциальному закону с характерным временем 12 мс. Аналогичные измерения на стадии полета, когда СВЧ-мощность отключалась в момент движения ЛПО вверх, дали существенно большие значения 50 мс, соизмеримые со временем полета ЛПО. Отметим, что эти измерения проводились в атмосфере воздуха лаборатории без специального контроля влажности.

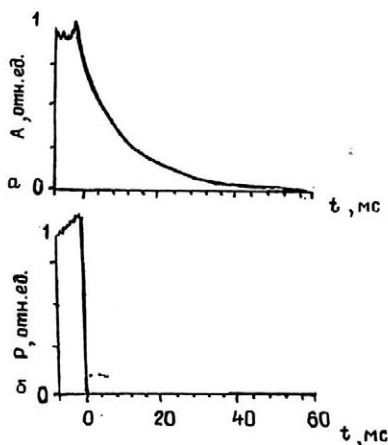


Рис. 5. Осциллограмма распада ЛПО после выключения магнетрона:

а — сигнал с ФЭУ свечения ЛПО в видимой области;
б — сигнал с СВЧ-детектора, находящегося в резонансе

Измеренные параметры ЛПО, полученные на основании проведенных экспериментов, приведены в таблице.

Показатели	ЛПО на стенке	ЛПО в полете
Порог мощности устойчивого горения, кВт	1,5	1,5
Характерный радиус, см	2	1—3
Удельная мощность, Вт/см ³	50	—
Время распада, с	0,012	0,05
Характерная скорость газа внутри ЛПО, м/с	0,3	0,5
Температура, К	3500 ± 100	4000 ± 500
Характерная скорость расширения ЛПО, м/с	—	0,1
Плотность плазмы, см ⁻³	10 ¹³	—
Потенциал ЛПО, В	+5	+0,05

Некоторые измеренные параметры ЛПО в стационарной стадии у стенки могут быть оценены из теории равновесных СВЧ-разрядов [6], использующих понятие нормальной скорости распространения v_n , аналогичной известной скорости распространения пламени [9]. Используя аналог формулы Зельдовича [10]

$$v_n = s_0 / \rho_0 w(T),$$

где s_0 — поток СВЧ-мощности на ЛПО;

ρ_0 — плотность холодного воздуха;

w — удельная энтальпия нагретого воздуха,

получаем величину, близкую к 0,1 м/с. Именно с такой скоростью движется газ внутри ЛПО, что и обеспечивает стационарность границы ЛПО [10]. Учитывая скинирование СВЧ-поля, получаем из энергетического баланса

$$v_n = \frac{\chi}{\delta} \frac{4kT}{I} \frac{c_p T}{w} \frac{\rho}{\rho_0}$$

(где χ — температуропроводность горячего воздуха; δ — толщина скин-слоя; c_p , ρ — теплоемкость и плотность горячего воздуха; I — эффективный потенциал ионизации) температуру газа, близкую к измеряемой.

Характерный размер ЛПО близок к размеру скин-слоя, когда идет наиболее эффективный разогрев ЛПО токами СВЧ. Время жизни определяется конвективным и теплопроводным отводом тепла и по оценке близко к измеренному времени распада.

Таким образом, существующая теория позволяет в общих чертах описать основные параметры стационарного ЛПО у верхней стенки. При этом мы считали течение газа фактически известным, в то время как в эксперименте оно определяется свободной конвекцией, вызванной силой тяжести и градиентом температуры, т. е. должно рассчитываться самосогласованно с разрядом.

В этой связи наиболее интересным становится вопрос о структуре течения газа на стадии полета ЛПО, когда сфероид окружен спокойной атмосферой. С этим вопросом тесно связаны проблема описания равномерного движения ЛПО, регистрируемого экспериментально, и объяснение сферической формы свободного ЛПО. К сожалению, теория движения ЛПО в атмосфере практически отсутствует. Напомним в этой связи, например, дискуссию, которая идет о возможности описания движения дуги в атмосфере как твердого тела [11]. Наиболее близким аналогом к исследуемой нами ситуации является “термик” — локальная сфероидная область повышенной температуры в атмосфере Земли, появляющаяся самопроизвольно или в результате воздушного (атомного) взрыва [12]. Движение термиков, всплывающих от Земли вверх под действием силы Архимеда, описывается следующим уравнением

$$\dot{v} = g \frac{T - T_{\text{ком}}}{T_{\text{ком}}} - \frac{3}{8} \left(\frac{3}{2} K + \xi \right) \frac{v^2}{R},$$

где R — радиус ЛПО;

ξ — коэффициент лобового сопротивления;

K — доля массы термика, участвующая в обмене с окружающей атмосферой;

g — ускорение силы тяжести [12].

В этом уравнении первый член справа описывает подъемную силу Архимеда, второй — проток газа, третий — турбулентное сопротивление. Вязкое сопротивление не учитывается из-за его малости. Равномерное движение в нашем эксперименте, $v = 0$, может быть объяснено только турбулентным сопротивлением и протоком газа. Действительно, горячий воздух в ЛПО поднимается вверх, расталкивая верхней границей неподвижный более плотный холодный воздух по бокам и засасывая его под себя в образующееся разрежение в следе, где и создаются завихрения, тормозящие движение ЛПО. Такая картина движения возможна только при наличии механизма, определяющего сохранение сфероидной формы ЛПО в процессе движения. В атмосферном термике в качестве такого механизма используют образование вихря Хилла [13] в “голове” термика [12].

Какой механизм действует в случае ЛПО — в настоящее время неизвестен. Можно отметить несколько фактов, указывающих на определенную изолированность ядра ЛПО от окружающей среды. При кратковременном внесении

излучающей примеси внутрь ЛПО, например, соли NaCl, характерная желтая линия Na наблюдается продолжительное время (несколько секунд); расширение ЛПО может быть объяснено расширением воздуха, попадающего внутрь ЛПО и нагреваемого внутри, но не покидающего ЛПО; образование самопроизвольной завихренности наблюдалось в экспериментах с дымами вне ЛПО и должно происходить, как предсказывает теория [9], и при попадании воздуха внутрь ЛПО. Является ли газ внутри ЛПО на стадии полета сильно завихренным (турбулентным) или устанавливается ламинарное циркуляционное движение — неизвестно. Однако в пользу последнего предположения говорят небольшая измеряемая скорость воздуха внутри ЛПО в стационарной стадии у стенки, обнаруженная визуально ламинарность течения в этом режиме и отсутствие характерных акустических звуков.

Стационарная скорость подъема ЛПО 0,5 м/с может быть определена из вышеприведенной формулы, если использовать турбулентное сопротивление твердого шара радиусом 2 см при числе Рейнольдса 2500 и предположить долю протока газа $\approx 50\%$.

Теперь обсудим наличие потенциала у стационарного ЛПО у металлической стенки, значительно превышающего температуру электронов (предполагаем, что температура электронов не превышает 1 эВ). С появлением этого потенциала мы связываем и появление дугового пятна, которое характерно для стационарного ЛПО у металлической поверхности. Пятно появляется всегда, когда ЛПО приближается к поверхности. Потенциал возникает в результате явления детектирования СВЧ-поля плазмой [7], и большая величина его связана с большой величиной напряженности СВЧ-поля в разрядной камере.

Как видно из рис. 3, при наличии пятна на фоне обычного свечения ЛПО в виде сфероида наблюдается дополнительное яркое свечение, исходящее из пятна и расходящееся веером по мере удаления от стенки вниз. При этом инфракрасная картина показывает сфероидную форму без особенностей, связанных с пятном (см. рис. 4, а). Объяснение этому явлению пока не найдено.

В работе [1] отмечалось, что ЛПО развивается в узлах стоячей СВЧ-волны в одномодовых резонаторах. В нашем эксперименте разрядная камера была сверхразмерной и из-за чрезвычайно сильной перестройки СВЧ-полей в камере при образовании ЛПО мы не смогли проверить это утверждение. Микроволновый зонд показывал очень сложное поведение СВЧ-полей около поверхности ЛПО и внутри, и требуются дальнейшие измерения для выяснения этого вопроса.

Таким образом, описана методика гарантированного получения пространственно локализованного микроволнового разряда сфероидной формы в спокойной атмосфере и измерены его основные характеристики в стационарной стадии и в режиме свободного движения в воздухе. Стационарный режим горения описывается в общих чертах теорией равновесных СВЧ-разрядов [10] с учетом измеренного характера движения газа из-за свободной конвекции. Режим свободного движения объясняется по аналогии с движением термиком в Земной атмосфере.

Л и т е р а т у р а

1. Капица П. Л. ДАН СССР, 1955, 101, 245 и Sov. Phys. JETP, 1970, 30, 973.
2. Powell J. R., Finkelstein D., Amer. Sci. 1970, 58, 262/В кн.: Д. Барри. Шаровая молния и четочная молния. — М.: Мир, 1983.
3. Ohtsuki Y. H., Ofuruton H. // Nature. 1991. № 350. P. 139.
4. Райзер Ю. П. Лазерная искра и распространение разрядов. — М.: Наука, 1974.
5. Райзер Ю. П. Основы современной физики газоразрядных процессов. — Там же, 1980.

6. Физика и техника низкотемпературной плазмы/Под ред. С. В. Дресвина. — М.: Атомиздат, 1972.
7. Кононенко К. И. Детекторные свойства газоразрядной плазмы. — Там же, 1980.
8. Каманищев В. А., Пластинин Ю. А. и др. Радиационные свойства газов при высоких температурах. — М.: Машиностроение, 1971.
9. Зельдович Я. Б., Баренблатт Г. И. и др. Математическая теория горения и взрыва. — М.: Наука, 1980.
10. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. — М.: Наука, 1992.
11. Низкотемпературная плазма. Вып. 1. Теория столба электрической дуги. — Новосибирск: Наука, 1991.
12. Винниченко Н. К., Пинус Н. З. и др. Турбулентность в свободной атмосфере. — Л.: Гидрометеоиздат, 1976.
13. Ламб Г. — М.: Гидродинамика. ОГИЗ, 1947.

*Работа доложена на Международной
конференции "Микроволновая плазма и ее
применения"*

SPACE LOCALIZED MICROWAVE DISCHARGE IN ATMOSPHERE

V. A. Zhilt'sov, E. A. Manykin, E. A. Petrenko, A. A. Skovoroda

RRC "Kurchatov Institute", INF, Moscow, Russia

Technique of guaranteed reception of the space localized microwave discharge of the spheroidal form in quiet atmosphere is described and its main characteristics in a stationary stage and in a mode of free movement in air are measured.

The stationary mode of burning is described in general by the theory of equilibrium microwave discharge with gas flow because from free convection. The mode of free movement is explained by analogy to thermics movement in Earthly atmosphere.