

Граничное значение поля, разделяющее области подкритических и глубоко подкритических видов СВЧ-разряда, зажигаемого на диэлектрической поверхности

© П.В. Булат,¹ Л.П. Грачев,^{2,†} И.И. Есаков,² А.А. Раваев²

¹ Университет ИТМО,
197101 Санкт-Петербург, Россия

² Московский радиотехнический институт РАН,
117519 Москва, Россия

[†] e-mail: grachev@mrtiran.ru

(Поступило в Редакцию 26 марта 2018 г.)

Описаны экспериментальные исследования инициированного электромагнитным (ЭМ) вибратором СВЧ-разряда, зажигаемого на внутренней поверхности диэлектрической трубки, помещенной в квазиоптический ЭМ-пучок. В опытах было определено граничное значение уровня СВЧ-поля, разделяющее области подкритических и глубоко подкритических видов СВЧ-разряда. Эксперименты показали, что при определенных условиях стримерные каналы подкритического разряда распространяются от инициатора как навстречу ЭМ-волне, так и вдоль нее. Варьирование мощности СВЧ-пучка позволяло изменять протяженность плазменной области подкритического разряда вдоль волнового вектора СВЧ-пучка и задавать уровень ЭМ-энергии, поглощаемой плазменными областями глубоко подкритического СВЧ-разряда.

DOI: 10.21883/JTF.2019.01.46963.128-18

Введение

В настоящее время рассматривается вариант пространственно-распределенного многоочагового поджига газовой горючей смеси СВЧ-разрядом с пространственно развитой стримерной структурой [1]. Есть основания предположить, что такой режим поджига позволит приблизиться к теоретически обоснованному энергетически эффективному детонационному режиму горения смеси [2]. Над его реализацией сейчас и работают разработчики соответствующих двигателей [3].

В настоящей работе под СВЧ-диапазоном электромагнитных (ЭМ) колебаний понимаются поля с сантиметровыми–дециметровыми длинами волн λ , чему соответствует диапазон частот $f \approx (30-2)$ GHz. В рассматриваемых случаях СВЧ-излучение формируется в виде квазиоптического ЭМ-пучка, как правило, линейно поляризованного с ТЕМ-структурой поля. В этом пучке и зажигается газовый электрический разряд [4–7]. Как правило, для реализации таких разрядов при сравнительно высоких газовых давлениях p начальный пробой газа необходимо инициировать. Например, для электрического пробоя воздуха атмосферного состава и давления начальный уровень электрической составляющей ЭМ-волны E должен быть не меньше минимального, критического пробойного уровня $E_{cr} = 30$ kV/cm. Для реализации таких значений поля требуются СВЧ-генераторы сверхвысокой мощности P_{gen} . В связи с этим в реальных экспериментах при высоких значениях p СВЧ-разряды не только инициируются, но и зажигаются в импульсном режиме при длительности СВЧ-импульсов τ_{pul} в диапазоне от 10 до 100 μ s.

В работах [4–7] рассматриваются различные способы электрического пробоя газа в квазиоптическом СВЧ-пучке, т.е. инициации СВЧ-разряда. В настоящей работе описываются эксперименты, в которых разряд, как и в работе [4], инициируется ЭМ-вибратором, представляющим собой отрезок металлического провода длиной $2l$, близкой к резонансной длине $2l \approx \lambda/2$. Вибратор помещается в заданную область ЭМ-пучка, как правило, вдоль его вектора E .

В зависимости от уровня поля E и давления газа p виды СВЧ-разряда в квазиоптическом ЭМ-пучке существенно различаются. Так, в воздухе при $p > 100$ Torr инициированный разряд в поле с $E < E_{cr}$, т.е. так называемый подкритический СВЧ-разряд, представляет собой объемную систему распространяющихся преимущественно навстречу волновому вектору k ЭМ-волны стримерных каналов. В этом же диапазоне p в поле с $E \ll E_{cr}$ инициированный уже глубоко подкритический СВЧ-разряд реализуется в виде плазменных областей, которые в течение всего времени τ_{pul} локализируются лишь около ЭМ-вибратора. В зависимости от величины E в опытах просматривается сравнительно четкая граница, разделяющая области подкритических и глубоко подкритических СВЧ-разрядов. Так, в воздухе при атмосферном p и $\lambda \approx 10$ cm это граничное значение E имеет величину $E_{thres} = 1.75$ kV/cm [4].

В настоящее время такие разряды зажигались уже как на поверхности помещенного в СВЧ-пучок диэлектрического листа [4], так и на поверхности помещенной в него диэлектрической трубки [1]. При этом если величина граничного поля E_{thres} при разряде в свободном пространстве определена, то его значение

при зажигании разряда на диэлектрической поверхности требует определения. Именно такая цель и стояла при проведении описываемых экспериментальных исследований. С практической точки зрения она достаточно актуальна, так как величина E_{thres} при заданной геометрии СВЧ-пучка позволяет оценить его требуемую мощность P_{beam} .

Экспериментальная установка

Эксперименты выполнялись на описанной в работе [4] установке с $\lambda = 8.9$ см. Ее схема приведена на рис. 1.

В опытах использовались одиночные СВЧ-импульсы с прямоугольной огибающей длительностью $\tau_{pul} = 40 \mu s$. В схеме в отходящий от СВЧ-генератора волноводный тракт включен регулируемый аттенуатор. Он представляет собой контролируемо погружаемую в волновод водяную кювету. В схеме линейно поляризованная ЭМ-волна рупорной антенной излучается в цилиндрическую СВЧ-безэховую герметичную рабочую камеру. Волна падает на сферически вогнутое металлическое зеркало. При этом СВЧ-пучок имеет характерный поперечный размер 50 см. Отразившись от зеркала, ЭМ-волна фокусируется, формируя линейно поляризованный квазиоптический СВЧ-пучок с ТЕМ-структурой поля. Его фокусное расстояние от среза зеркала $x_f \approx 10$ см. В поперечном сечении распределение поля в фокусной области является гауссовым с характерным размером вдоль вектора E — $y_0 = 5.2$ см и поперек — $z_0 = 2.5$ см.

Как показано на рис. 1, в СВЧ-пучок вдоль его оси в опытах могла помещаться диэлектрическая трубка. Она выполнена из оргстекла и имела наружный диаметр 40 мм, внутренний — $d = 30$ мм и длину 500 мм. На расстоянии 14 см от ближайшего к зеркалу торца трубки или на расстоянии 8 см от среза зеркала по внутренней поверхности трубки „вдоль“ вектора E ЭМ-пучка был укреплен дугообразный ЭМ-вибратор. Он представлял собой медный провод диаметром 0.35 мм и длиной $2l = 45$ мм.

Рабочая камера была заполнена атмосферным воздухом и могла откачиваться до $p = 10$ Торг с шагом 3 Торг.

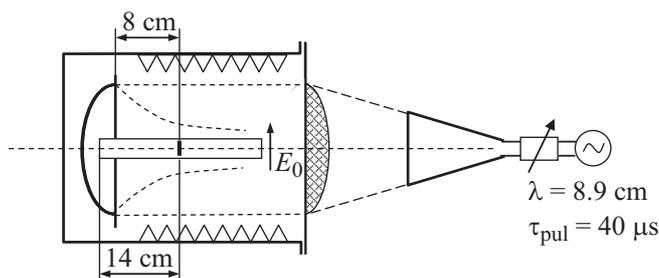


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

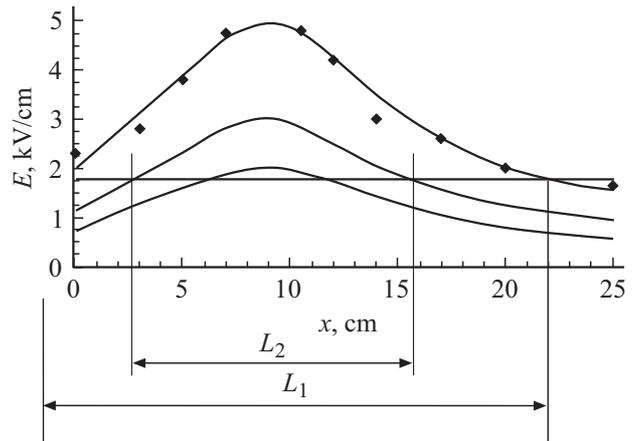


Рис. 2. Распределение величины СВЧ-поля вдоль оси ЭМ-пучка при разной его мощности.

Эксперименты по измерению поля E в СВЧ-пучке

Первоначально в опытах было определено распределение поля E вдоль оси ЭМ-пучка при различной степени погружения водяной кюветы аттенуатора в волновод. Эксперименты проводились без помещения в ЭМ-пучок диэлектрической трубки.

В работе [1] приведен экспериментально снятый график зависимости амплитуды поля E от отсчитываемого от среза зеркала расстояния x вдоль оси ЭМ-пучка $E(x)$. Этот график является верхним графиком, помещенным на рис. 2.

В этих опытах использовалась методика, описанная в работе [8]. По ней в требуемую точку ЭМ-пучка помещался металлический шарик. Рабочая камера откачивалась, и определялось максимальное давление воздуха p_{br} , при котором при включении СВЧ-импульса фиксировался пробой воздуха. Для обеспечения наличия вблизи поверхности шарика начальных электронов в течение времени τ_{pul} он облучался от удаленного источника ультрафиолетового (УФ) излучения.

Измеренное значение p_{br} позволяет рассчитать локальное значение амплитуды поля E в „точке“ расположения шарика. Действительно, из электростатики известно, что при диаметре шарика $2a \ll (\lambda/4)$ поле на его полюсах, где вектор E перпендикулярен поверхности шарика, $E_{pol} = 3E$. При удалении от поверхности шарика индуцированное поле быстро падает. Следовательно, для реализации процесса размножения начальных электронов, т. е. электрического пробоя воздуха, необходимо, чтобы поле E_{pol} было больше E_{cr} . Для воздуха E_{cr} оценивается по формуле

$$E_{cr} = 42p \text{ [V/cm]}, \tag{1}$$

при размерности p в Торг. В работе [8] приведен рассчитанный и экспериментально проверенный график зависи-

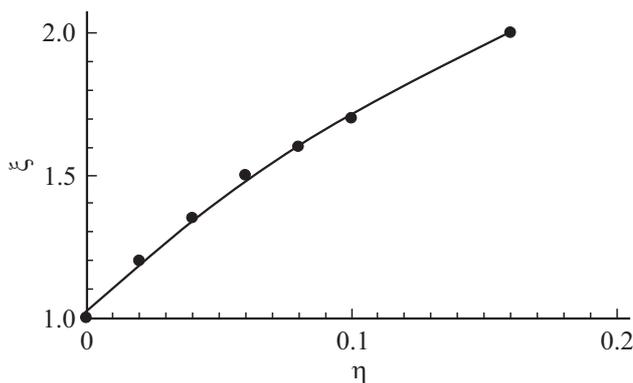


Рис. 3. Зависимость от экспериментальных условий превышения уровня пробойного поля над критическим пробойным уровнем.

мости отношения $E_{\text{pol}}/E_{\text{cr}} = \xi$ от произведения радиуса шарика a на измеренное значение p_{br} : $\eta = 0.84/(ap_{\text{br}})$ при размерности a — см и p_{br} — Торг. Он помещен на рис. 3. В результате поле

$$E = (42p_{\text{br}}\xi)/3 \text{ [V/cm]} \quad (2)$$

Эту методику мы использовали и в описываемых опытах. В них металлический шарик диаметром $2a = 5 \text{ mm}$ помещался на оси ЭМ-пучка на расстоянии $x = 9 \text{ cm}$ от среза зеркала, т.е. в фокусной области пучка. В экспериментах варьировалась глубина погружения кюветы аттенуатора в волноводный тракт, и при каждом ее значении измерялась величина p_{br} . Затем по этим величинам p_{br} по (2) рассчитывались поля E_0 , т.е. поля в фокусе ЭМ-пучка при разном уровне его ослабления.

При полностью выведенной из волновода кювете опыты дали $p_{\text{br max}} = 327 \text{ Торг}$ или значение $E_{0 \text{ max}} = 4.9 \text{ kV/cm}$. Действительно, при этом значении p_{br} величина $\eta = 0.01$ и по графику, приведенному на рис. 3, ему соответствует $\xi = 1.07$. В результате по (2) $E_{0 \text{ max}} = 4.9 \cdot 10^3 \text{ V/cm}$. Это значение поля практически совпало с его величиной, определенной в работе [1] (см. рис. 3). В связи с этим в дальнейших опытах этой серии положение шарика не менялось, а зависимость $E(x)$ аппроксимировалась по данным работы [1] при измеренных значениях E_0 .

При полностью погруженной кювете аттенуатора воздух начинал пробиваться при $p_{\text{br min}} = 106 \text{ Торг}$, что соответствует $E_{0 \text{ min}} = 1.8 \text{ kV/cm}$.

Величины E_0 и параметры поперечной геометрии ЭМ-пучка в фокусной плоскости позволяют рассчитать его мощность P_{beam} :

$$P_{\text{beam}} = \frac{E_0^2}{2Z_0} \frac{\pi y_0 z_0}{2}, \quad (3)$$

где $Z_0 = 120\pi$; Ω — волновое сопротивление свободного пространства. Эта формула дает используемую в опытах максимальную $P_{\text{beam max}} = 650 \text{ kW}$ при $E_{0 \text{ max}}$ и минимальную $P_{\text{beam min}} = 87.7 \text{ kW}$ при $E_{0 \text{ min}}$.

Так как в опытах, как показано на рис. 1, в ЭМ-пучок помещалась диэлектрическая трубка, то стоял вопрос о величине и конфигурации поля внутри ее объема. Аналитические оценки и численное моделирование показали, что без горения разряда внутри трубки наблюдаются колебания ЭМ-волны. При загорании разряда волна становится „бегущей“ и практически по всей длине трубки величина и конфигурация поля отслеживают исходные параметры. Они незначительно „искажаются“ лишь у торцов трубки на размере масштаба 5 см.

Результаты и обсуждение основных экспериментов

В ходе основных экспериментов производилась фоторегистрация разрядной области при различных значениях E_0 . При этом опыты проводились, начиная с максимального значения $E_{0 \text{ max}}$ и до $E_{0 \text{ min}}$. При каждом значении E_0 производилось несколько включений СВЧ-импульса.

Опыты показали, что в диапазоне значений полей от $E_{0 \text{ max}}$ до $E_{0 \text{ min}}$ разряд был подкритическим, т.е. представлял собой систему стримерных каналов, распространяющихся по внутренней поверхности трубки. При этом при каждом неизменном значении E_0 в различных импульсах локальная конфигурация стримерных каналов менялась, но длина разрядной области L вдоль трубки при $E_0 = \text{const}$ оставалась неизменной с точностью до нескольких мм. По мере уменьшения E_0 размер L уменьшался.

Характерные фотографии такого вида разряда помещены на рис. 4. На photographиях фокусирующее зеркало

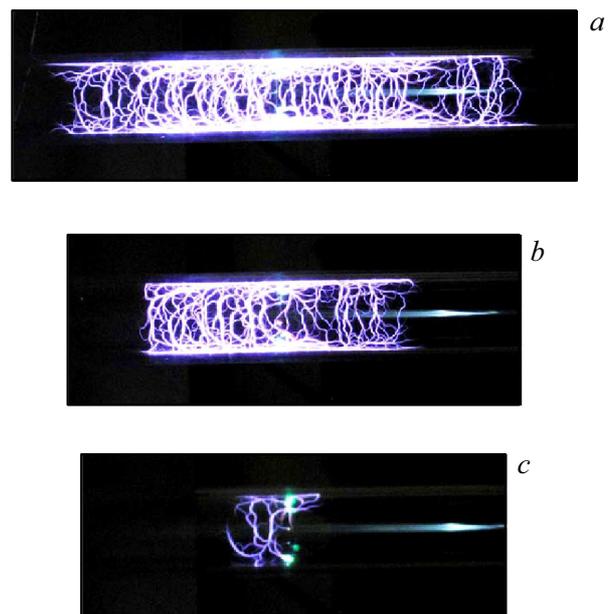


Рис. 4. СВЧ-разряд подкритического вида в квазиоптическом ЭМ-пучке при разном уровне поля $E_{0 \text{ max}}$, kV/cm: a — 4.9, b — 3 kV/cm, c — 2 kV.

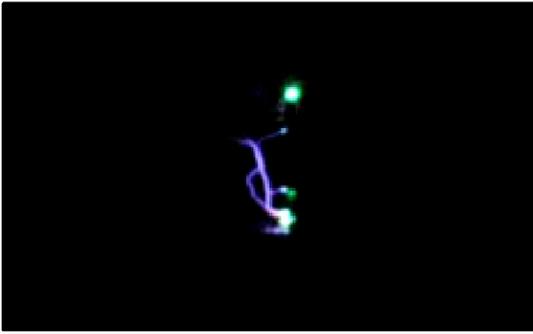


Рис. 5. Иницированный ЭМ вибратором СВЧ-разряд при глубоко подкритическом уровне поля в квазиоптическом ЭМ-пучке.

расположено слева, волновой вектор \mathbf{k} СВЧ-волны имеет направление слева направо и вектор \mathbf{E} вертикален. На фотографиях две вертикально разнесенные яркие плазменные точки расположены у концов иницирующего разряда ЭМ-вибратора. Они наиболее четкие на рис. 4, *а*, *с*. На рис. 4, *а* и *б* они расположены практически посередине плазменных областей.

Из рис. 4, *с* следует, что при малой мощности пучка P_{beam} , т.е. малом поперечном размере его поля со сравнительно большим уровнем, плазменные разрядные каналы экранируют СВЧ-поле в области за инициатором. При этом, естественно, стримерные каналы реализуются лишь в области ЭМ-пучка до инициатора. По мере роста P_{beam} поперечный размер ЭМ-пучка со сравнительно высоким уровнем поля растет, и, как следует из рис. 4, *а* и *б*, стримерные разрядные каналы начинают распространяться от инициатора не только навстречу ЭМ-излучению, но и вдоль вектора \mathbf{k} за инициатором. При этом их „густота“, естественно, падает.

По фотографиям, беря за масштаб изображений наружный диаметр трубки, равный 40 mm, можно определить длины разрядных областей. Так, по рис. 4 длины $L_1 \approx 24$ cm, $L_2 \approx 14$ cm и $L_3 \approx 4.5$ cm.

Эти величины L в свою очередь задают искомую величину $E_{\text{thres}} \approx 1.8$ kV/cm, отделяющую подкритические и глубоко подкритические виды разрядов. Действительно, на рис. 2, как указывалось, верхний график дает зависимость $E(x)$ при значении поля в фокусной области $E_{0\text{max}} = 4.9$ kV/cm. На этом рисунке дополнительно построены аналогичные зависимости $E(x)$ уже при значении поля в фокусной области $E_0 = 3$ и 2 kV/cm. На рис. 2 прямая $E(x) = 1.75$ kV/cm = const, пересекая эти зависимости, дает значения длин ЭМ-пучка L_1 и L_2 с уровнем поля $E \geq 1.75$ kV/cm. Эти величины практически совпадают с измеренными по фотографиям длинами разрядных областей при этих значениях полей E_0 в фокусной области.

Следовательно, стримерные каналы разряда, зародившись у концов инициатора, при поле $E > E_{\text{thres}}$, размножаясь, бегут по поверхности трубки, увеличивая длину

разрядной области. Добегая до областей ЭМ-пучка с $E = E_{\text{thres}}$, они теряют эту способность и продолжают „жить“ до конца длительности СВЧ-импульса только в этих плоскостях ЭМ-пучка.

По рис. 4, *а* можно рассчитать среднюю скорость распространения разрядной области по внутренней поверхности трубки v_{dis} при $\lambda = 8.9$ cm, $d = 30$ mm и данной геометрии СВЧ-пучка с $E_{0\text{max}} = 4.9$ kV/cm: $v_{\text{dis}} = (L_1/2)/\tau_{\text{pul}} = 6 \cdot 10^3$ m/s. Это значение v_{dis} почти в два раза превышает максимальную скорость детонационного распространения пламени, например, по пропанкислородной горючей смеси, равной $2.5 \cdot 10^3$ m/s [9].

На рис. 5 приведена фотография разряда, горящего при минимально возможной мощности СВЧ-пучка, т.е. $E_{0\text{min}} = 1.8$ kV/cm.

Из фотографии следует, что при таком уровне поля это уже практически разряд глубоко подкритического вида, т.е. его наиболее „энергичные“ плазменные образования локализируются лишь у концов ЭМ-вибратора. Энергию в плазме этих областей принято оценивать по формуле [4]:

$$Q_{\text{dis}} = \frac{E^2}{2Z_0} S_{\text{eff}}, \quad (4)$$

где $E^2/(2Z_0) = \Pi$; $J/(\text{s} \cdot \text{cm}^2)$ — плотность потока СВЧ-энергии в области ЭМ-вибратора, а S_{eff} — эффективная площадь энергетического взаимодействия плазмы иницированного глубоко подкритического СВЧ-разряда с возбуждающим его ЭМ-полем. В настоящее время величина S_{eff} определена лишь для свободно локализованного разряда такого вида. Так, при $\lambda \approx 10$ cm она лежит в диапазоне $(8-12)$ cm² [4]. Определение величины S_{eff} при расположении ЭМ-вибратора на поверхности диэлектрика предполагает дополнительные исследования.

Заключение

Таким образом, в экспериментах на внутренней поверхности помещенной в квазиоптический СВЧ-пучок диэлектрической трубки зажжен иницированный ЭМ-вибратором газовый электрический разряд. По результатам их проведения определен граничный уровень СВЧ-поля, отделяющий области подкритических и глубоко подкритических разрядов. По величине он практически совпал с этим уровнем для СВЧ-разрядов в воздухе при атмосферном давлении в свободном пространстве. Значение этого поля задает протяженность разрядной области СВЧ-разряда подкритического вида. Опыты показали, что стримерные каналы этого вида разряда, зародившись у полюсов ЭМ-инициатора, могут распространяться как навстречу СВЧ-волне, так и вдоль ее волнового вектора.

С практической точки зрения наибольший интерес могут представлять изучаемые СВЧ-разряды именно подкритического вида с пространственно-развитой стримерной структурой. При этом при разработке, например,

импульсных детонационных двигателей такой разряд, как уже продемонстрировано в работе [1], может не только осуществить многоочаговый поджиг газовой горючей смеси, но и за счет ее сгорания в значительном начальном объеме задавать требуемую энергию поджига смеси, необходимую для детонационного фронта распространения пламени по присоединенному объему трубки.

Инициированный глубоко подкритический СВЧ-разряд в диэлектрической трубке может быть реализован при очень малой мощности квазиоптического СВЧ-пучка. Для ее оценки необходимы дальнейшие исследования по определению эффективной площади энергетического взаимодействия СВЧ-поля с разрядной плазмой. Эти исследования, например, могут проводиться с поджигом заполняющей диэлектрическую трубку газовой горючей смеси различного состава, для которой известна величина минимальной энергии ее поджига.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение № 14.577.21.0277, уникальный идентификатор проекта RFMEFI57517X0148).

Список литературы

- [1] Александров К.В., Буслеев Н.И., Грачев Л.П., Есаков И.И., Раваев А.А. // ЖТФ. 2018. Т. 88. Вып. 2. С. 174–179. DOI: 10.21883/0000000000 [Aleksandrov K.V., Busleev N.I., Grachev L.P., Esakov I.I., Ravaev A.A. // Techn. Phys. 2018. Vol. 63. N 2. P. 167–171. DOI: 10.1134/S1063784218020020]
- [2] Зельдович Я.Б. // ЖТФ. 1940. № 1 (17). С. 1453–1461.
- [3] Булат П.В., Ильина Е.Е. О проблеме создания детонационного двигателя — современные тенденции в аэрокосмическом двигателестроении. Фундаментальные исследования. 2013. № 10. Ч. 10. С. 2140–2142.
- [4] Грачев Л.П., Есаков И.И., Александров К.В., Раваев А.А., Северинов Л.Г., Ходатаев К.В. Газовый электрический разряд в квазиоптическом СВЧ-пучке. М.: МРТИ РАН, 2015. 187 с.
- [5] Батанов Г.М., Грицинин С.И., Косый И.А., Магунов А.Н., Силаков В.П., Тарасова Н.М. // Труды Физического ин-та им. П.Н. Лебедева АН СССР. 1985. Т. 160. С. 174–203.
- [6] Зарин А.С., Кузовников А.А., Шибков В.М. Свободно локализованный СВЧ-разряд в воздухе. М.: Нефть и газ, 1996. 204 с.
- [7] Высокочастотный разряд в волновых полях. Сб. науч. тр. ИПФ АН СССР / Отв. ред. А.Г. Литвак. Горький. 1988.
- [8] Грачев Л.П., Есаков И.И., Ходатаев К.В., Цыленков В.В. // Физика плазмы. 1992. Т. 18. Вып. 3. С. 411–415.
- [9] Бартьме Ф. Газодинамика горения. М.: Энергоиздат, 1981. 279 с.