

**Подпороговый разряд высокого давления, возбуждаемый пучком микроволн:  
физические основы и приложения**

*К. В. Артемьев, Г. М. Батанов, Н. К. Бережецкая, А. М. Давыдов,  
И. А. Коссий, В. И. Нефедов, К. А. Сарксян, Н. К. Харчев*

*Представлено обсуждение новой формы разряда, возбуждаемого пучком микроволн в газах высокого (вплоть до атмосферного и выше) давления как в свободном пространстве, так и в замкнутой камере. Впервые для осуществления такого разряда использовался мощный гиротрон с параметрами импульсного излучения: мощность импульса  $200 \leq P \leq 600$  кВт, длительность импульса  $0,5 \text{ мс} \leq \tau \leq 20 \text{ мс}$  и длина волны  $\lambda = 0,4$  см. В глубоко подпороговых условиях в свободном пространстве в воздухе атмосферного давления плазменный столб длиной  $L = 50$  см возбуждался микроволновым пучком, формируемым квазиоптической системой зеркал. При применении гиротрона с указанными параметрами принципиально возможна генерация плазменного столба, достигающего нескольких метров в длину. Исследованы параметры и структура плазменного образования, позволяющие отнести его к категории открытого и ранее описанного в ИОФ РАН СНС самоподдерживающегося–несамостоятельного разряда. В качестве одного из возможных актуальных приложений разряда рассматривается плазмохимическая очистка городской воздушной среды от экологически опасных примесей.*

*Ключевые слова:* микроволновый разряд, ионизационная волна, городская воздушная среда, экологически вредные примеси, газоразрядная очистка.

**Введение**

Исследования фундаментальных проблем физики разрядов, возбуждаемых микроволновым излучением в газах и проводимые в Институте общей физики им. А. М. Прохорова РАН (ИОФ РАН), легли в основу создания ряда оригинальных

источников плазмы, предназначенных как для работы в физической лаборатории, так и для решения задач, представляющих интерес для современной техники [1, 2]. Из них к числу наиболее перспективных и востребованных следует отнести плазменные источники (плазматроны), основанные на открытом и исследуемом в ИОФ РАН подпороговом самоподдерживающемся [3–6], возбуждаемом микроволновым пучком в газах высокого давления. Новый тип микроволнового разряда (т. н. СНС-разряд) представляет собой необычную комбинацию самостоятельного и самоподдерживающегося газовых разрядов, возбуждаемых импульсными пучками мощных микроволн.

Целью данной работы является обсуждение физических основ и возможных практических приложений новой формы разряда (СНС-разряда), возбуждаемого пучком микроволн в газах высокого (вплоть до атмосферного и выше) давления как в свободном пространстве, так и в замкнутой камере.

**Условия возникновения СНС-разряда**

Проведенные ранее исследования показывают, что СНС-разряд возникает при выполнении следующих условий:

**Артемьев Константин Владимирович**<sup>1</sup>, младший научный сотрудник.

**Батанов Герман Михайлович**<sup>1</sup>, заведующий лабораторией, д.ф.-м.н.

**Бережецкая Наталья Константиновна**<sup>1</sup>, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.

**Давыдов Алексей Михайлович**<sup>1</sup>, научный сотрудник.

**Коссий Игорь Антонович**<sup>1</sup>, заведующий лабораторией, д.ф.-м.н.

**Нефедов Виктор Иванович**<sup>2</sup>, заведующий кафедрой.

**Сарксян Карен Агасевич**<sup>1</sup>, ведущий научный сотрудник, к.ф.-м.н.

**Харчев Николай Константинович**<sup>1</sup>, научный сотрудник.

<sup>1</sup> Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН.

Россия, 119111, Москва, ул. Вавилова, 38.

E-mail: kossyi@fpl.gpi.ru

<sup>2</sup> Московский технологический университет (МИРЕА).

Россия, 119454, Москва, просп. Вернадского, 78.

Статья поступила в редакцию 8 августа 2017 г.

© Артемьев К. В., Батанов Г. М., Бережецкая Н. К., Давыдов А. М., Коссий И. А., Нефедов В. И., Сарксян К. А., Харчев Н. К., 2017

а) пучок микроволн распространяется в газовой среде столь высокого давления, когда удовлетворяется соотношение:

$$v_{eff} \gg \omega \quad (1)$$

где  $v_{eff}$  – эффективная частота электрон-нейтральных соударений, а  $\omega$  – циклическая частота микроволнового излучения;

б) величина *приведённого* микроволнового электрического поля столь низка, что во всём объёме пучка исходно выполняются условия сильной подпороговости по отношению к возбуждению самоподдерживающегося разряда:

$$\gamma \equiv E_0 / n_m \ll [E_0 / n_m]_{thr} \quad (2)$$

где  $E_0$  – амплитуда микроволнового электрического поля, а  $n_m$  – концентрация нейтральных частиц.  $[E_0/n_m]_{thr}$  – пороговое по отношению к возбуждению самоподдерживающегося разряда приведённое микроволновое электрическое поле;

в) при наличии локального импульсного инициатора разряда в пределах пучка в объёме  $V_d$ , значительно меньшем объёма, занимаемого микроволновым пучком  $V_{MW}$ , т. е. при выполнении соотношения:

$$V_d \ll V_{MW}, \quad (3)$$

а также при времени действия источника инициации  $\tau_i$  меньшим (или много меньшим) длительности микроволнового импульса  $\tau_{MW}$ :

$$\tau_i \ll \tau_{MW}. \quad (4)$$

В условиях, когда микроволновое электрическое поле меньше (или много меньше), чем пробойное поле, разряд может быть возбуждён локально в области микроволнового пучка в том случае, если электрическое поле электромагнитной волны **локально** увеличивается или концентрация нейтралов  $n_m$  **локально** уменьшается настолько, что начинает выполняться соотношение, обратное соотношению (2).

Схематическое изображение вариантов инициации СНС-разряда, использованных в ИОФ РАН, приведены на рис. 1. Так, в качестве инициаторов локализации в некотором сечении глубоко подпорогового микроволнового пучка самоподдерживающегося разряда в работе [6] использовались метало-диэлектрические мишени (схема на рис. 1, а). На рис. 1, б изображена схема эксперимента, в котором инициатором СНС-разряда являлся кольцевой многоискровой источник УФ-излучения, создающего в приосевой области структуру «фотоионизованная плазма – несамостоятельный микроволновый разряд», неустойчивость которой приводит к появлению вблизи оси самоподдерживающейся стадии в виде ярко светящихся вытянутых вдоль электрического поля микроволнового пучка «нитей» [8, 9]. В работе [7] в качестве способа возбуждения локализованного пробоя в сильно подпороговом микроволновом пучке применена искра в воздухе от излучения импульсного  $CO_2$ -лазера (схема на рис. 1, в).

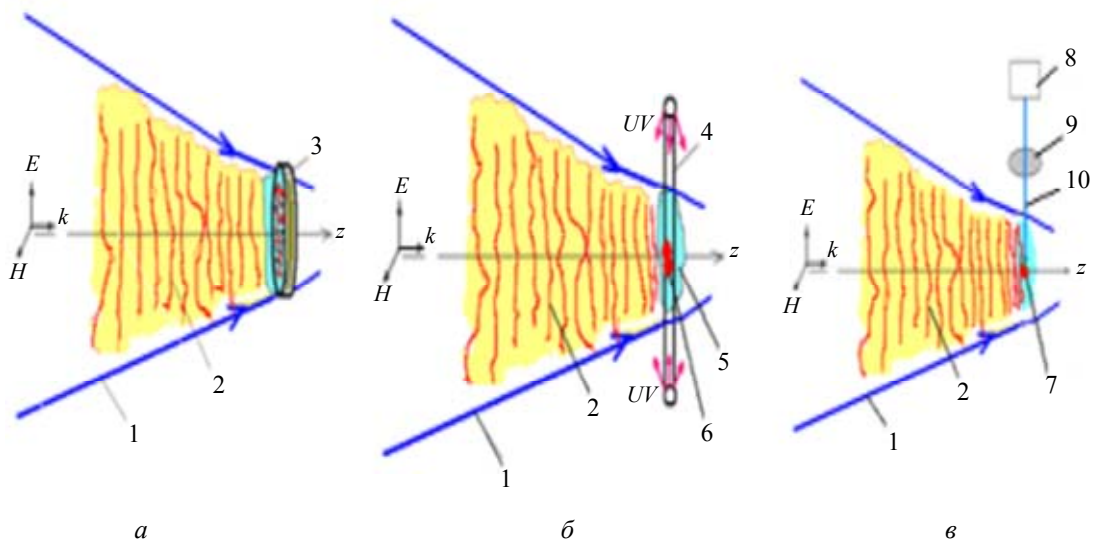


Рис. 1. Реализованные схемы инициаторов СНС-разрядов: а) металлодиэлектрическая мишень; б) кольцевой источник УФ-излучения; в)  $CO_2$ -лазерная искра. Обозначения на схемах: 1 – микроволновый пучок; 2 – СНС-разряд; 3 – метало-диэлектрический инициатор; 4 – кольцевой многоискровой инициатор; 5 – несамостоятельный разряд как инициатор СНС-разряда; 6 – начальное микроплазменное образование; 7 – искра от  $CO_2$ -лазера; 8 –  $CO_2$ -лазер; 9 – линза; 10 – пучок излучения  $CO_2$ -лазера.

При всех способах инициации в экспериментах, проведённых в ИОФ РАН, показано, что локальное возбуждение самоподдерживающегося разряда в объёме, значительно меньшем объёма, занимаемого пучком, сопровождается волной ионизации, распространяющейся навстречу микроволновому потоку и формирующей столб плазмы, вытянутый вдоль оси пучка на расстояние тем большее, чем больше длительность микроволнового импульса. Таким образом, наблюдается весь

ма парадоксальное явление, а именно, формирование протяжённого газоразрядного плазменного столба в микроволновых полях, меньших (или существенно меньших) пороговых для возбуждения обычного самоподдерживающегося разряда в газовой среде в свободном пространстве. Характерные фотографии СНС-разрядов, инициированных металло-диэлектрической мишенью и искрой  $\text{CO}_2$ -лазера, приведены соответственно на рис. 2, а, б.

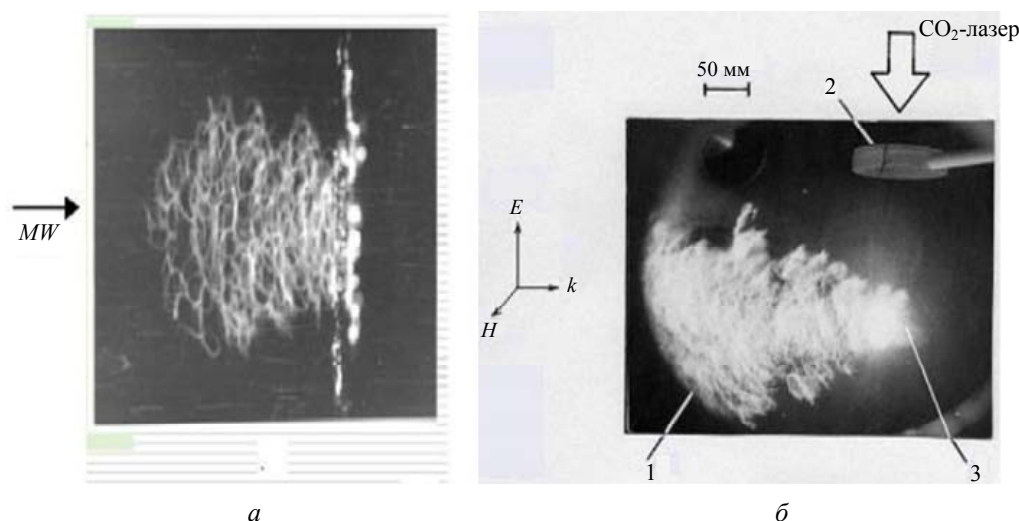


Рис. 2. Фотография СНС-разряда, возбуждаемого подпороговым микроволновым (MW) пучком ( $\lambda = 2,5$  см) в воздухе ( $p = 200$  Торр) при инициации: а) – на металло-диэлектрической мишени; б) – искрой от излучения  $\text{CO}_2$ -лазера. 1 – СНС-разряд, 2 – линза, 3 – область лазерной искры.

Заметим, что все ранее описанные в литературе экспериментальные исследования СНС-разрядов проводились при следующих условиях:

- при давлениях газа, меньших атмосферного ( $p \leq 200$  Торр);
- при сантиметровых длинах волн микроволнового излучения ( $\lambda \approx 2\text{--}5$  см);
- при уровнях мощности микроволнового пучка, как правило, не превышающем  $\sim 100$  кВт.

Задача настоящей работы заключалась в расширении области фундаментальных исследований разряда со сдвигом области давлений газовой среды в сторону близких (или несколько больших) атмосферного давления, соответственно области мощностей микроволнового пучка в сторону столь высоких значений, как  $P \leq 1$  МВт и с переходом от сантиметровых микроволн к миллиметровым ( $\lambda \approx 0,2\text{--}0,8$  см). Интерес к реализации указанных выше областей параметров газовой среды и микроволнового пучка определяется как стремлением продвинуться вперёд в проблеме построения адекватной физической модели газоразрядного явления, так и интересами актуальных плазмохимических приложений.

Далее приводится краткий анализ физических процессов, лежащих в основе необычного микроволнового газоразрядного формирования. Описываются первые эксперименты по получению СНС-разряда в газах атмосферного давления при больших мощностях импульсного микроволнового пучка, генерируемого в миллиметровом диапазоне длин волн. Формулируются особенности и преимущества СНС-разряда как основы плазмохимического реактора.

#### Физические процессы, лежащие в основе микроволнового СНС-разряда

Общепринято, что все известные и описанные в литературе газовые разряды могут быть отнесены только к одной из двух категорий: самостоятельные и несамостоятельные разряды [10]. Однако исследования, проведенные в ИОФ РАН [1–6] по СНС-разрядам, позволяют нам квалифицировать это явление как новую, т. е. третью форму разряда. Действительно, СНС-разряд представляет необычную последовательность переходов от самоподдерживающегося к несамостоятельному разряду. Трансформация одной формы в другую происходит через процесс возбуждения и развития ионизационно-перегревной неустойчивости.

Физический анализ, проведенный в работах [3, 11, 12], объясняет механизмы образования волны ионизации в первоначально чрезвычайно подпороговом микроволновом пучке в газах высокого давления. Модель, представленная в [3, 11], исходит из предположения о решающей роли ультрафиолетового излучения, возникающего как на стадии инициации, так и на более поздних стадиях ионизации, особенно на ее фронте. Модель проиллюстрирована на рис. 3, на котором показаны схематические границы микроволнового пучка и волны ионизации в некоторый момент времени. Показанные на рисунке разрядные каналы («нити») возникают как вблизи инициатора, так и в аксиально распространяющейся ионизационной волне как результат перехода несамостоятельного разряда в самоподдерживающийся разряд через сильно нелинейную стадию ионизационно-перегревной неустойчивости.

На фронте волны ионизации разрядные каналы играют роль источника УФ-излучения, создающего фотоионизованную плазму перед фронтом ионизационной волны на расстоянии  $l \leq l_f$  ( $l_f$  – средняя длина свободного пробега ионизирующего излучения). Микроволновый пучок взаимодействует с этой плазмой, частично поглощается ею и, соответственно, через электронный компонент греет газовую среду.

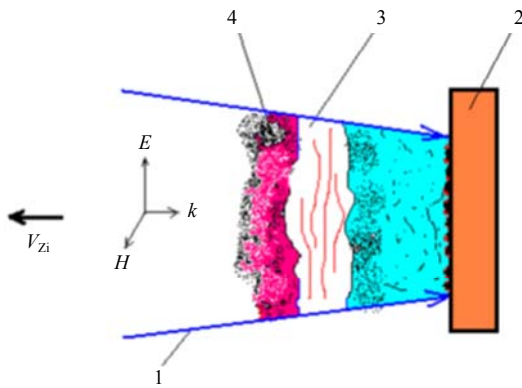


Рис. 3. Схема формирования СНС-разряда. 1 – микроволновый пучок; 2 – металл-диэлектрический инициатор локальных разрядов; 3 – самоподдерживающийся разряд; 4 – несамостоятельный разряд.

Как было показано в работе [3], скорость распространения СНС-разряда в микроволновом пучке в воздушной среде при высоком давлении ( $v_{eff} \gg \omega, v_{eff}^*$ ) может быть оценена с использованием следующего соотношения:

$$v_{zi} \approx 10 n_e E_0^3 / p_0^4 \approx 6,8 \times 10^{-5} n_e I_f^{3/2} / p_0^4. \quad (5)$$

Здесь  $v_{eff}^*$  – частота электронно-нейтральных столкновений, соответствующая молекулярной

плотности газа  $n_m^*$ , причем такая, что  $\gamma = \gamma_{thr}$ ;  $n_e$  – электронная плотность фотоионизированной плазмы перед фронтом СНС-разряда;  $p_0$  – начальное давление газа в Торр; напряженность электрического поля  $E_0$  выражается в кВ/см, а  $I_f$  – интенсивность микроволнового излучения в Вт/см<sup>2</sup>.

Нелинейная стадия ионизационно-перегревающей неустойчивости, возникающая в несамостоятельном микроволновом разряде, теоретически исследована в [13]. В рамках этой работы можно оценить параметры плазмы в разрядных «каналах» («нитях»), являющихся следствием развития неустойчивости. Конечная температура электронов в нитях рассчитывается по формуле:

$$T_e \approx (v_{eff0} / \omega)^2 T_{e0} \quad (6)$$

а электронная плотность оценивается из соотношения:

$$n_e \approx (v_{eff0} / \omega)^{\beta_i + 1} v_a / v_T n_{e0}. \quad (7)$$

Здесь параметр  $\beta_i \approx 5-6$ ;  $v_{eff0}$  – эффективная частота неупругих электрон-нейтральных столкновений;  $n_{e0}, T_{e0}$  – начальная концентрация и температура электронов соответственно в однородной плазме несамостоятельного разряда;  $v_a = 1/\tau_a$ , где  $\tau_a$  – характерное время потерь электрона (за счет прилипания, рекомбинации или диффузии). Величина  $v_T$  определяется выражением:

$$v_T \approx 10^{-9} \sigma_0 E_0^2 / p_0, \quad (8)$$

где  $\sigma_0$  – начальная проводимость плазмы в электростатических единицах, а  $E_0$  в В/см.

При подстановке значений  $v_{eff0}, T_{e0}, \sigma_0$  и  $v_a$ , характерных для экспериментов, описанных в [3, 11, 14], мы находим, что конечное состояние плазмы в каналах соответствует почти полной ионизации при электронной температуре в несколько сотен электрон-вольт. Однако реальные значения электронной плотности и температуры могут быть ограничены рядом неучтенных в [13] процессов, в частности, отражением микроволн от нитей и др. Тем не менее, результаты оценок показывают, что разрядные нити действительно являются областями достаточно плотной высокотемпературной плазмы, которые в соответствии с измерениям, проведенным в [14], дают значения концентрации  $n_e \approx 10^{16}-10^{17}$  см<sup>-3</sup> и показывают неизбежное присутствие «ореола» фотоионизированной плазмы вокруг каналов разряда. Температура газа в элементарных нитях измерялась в ряде работ [11] и оказалась в диапазоне  $T_g^* \approx 5000-7000$  К.

Есть основания полагать, что разряд типа СНС, обладающий областями быстрого и высоко-го нагрева газа с последующим быстрым охлаждением, может оказаться весьма эффективным средством плазмохимической обработки газообразных сред.

### Подпороговый СНС-разряд в пучке миллиметровых волн в газах атмосферного давления

#### Схема эксперимента

Поиск возможности реализовать столь необычную по физическим свойствам и вместе с тем перспективную для ряда технических приложений форму микроволнового плазмообразования как сильно подпороговый СНС-разряд в больших газовых объёмах при давлениях, превышающих или порядка атмосферного, привёл к созданию в ИОФ РАН установки TORCH.

В основе установки TORCH лежит гиротронный комплекс «МИГ-3 ГИРОТРОН», генерирую-

щий микроволновой пучок со следующими параметрами: мощность микроволнового импульса  $P_i \leq 600$  кВт, длительность импульса  $\tau_{MW} \leq 20$  мс, длина волны  $\lambda \approx 0,4$  см. Собственно гиротронный комплекс предназначен для создания и удержания высокотемпературной плазмы в стеллараторе Л-2М [15] (см. схему на рис. 4). Данный комплекс снабжен квазиоптической системой, разработанной и изготовленной в ИОФ РАН [16]. Квазиоптическая система формирует микроволновой пучок, распространяющийся от выходного окна гиротрона к входному окну камеры стелларатора. Распределение электрического поля в поперечном сечении микроволнового пучка близко к гауссову.

В экспериментах, проведенных на установке TORCH, СНС-разряды возбуждались в различных сечениях микроволнового пучка, создаваемого комплексом «МИГ-3 ГИРОТРОН», с помощью специально разработанных инициаторов (см. рис. 5 и 6). Большая часть экспериментов проведена с инициаторами, помещенными в поперечные сечения пучка на расстоянии 650 мм или 440 мм от внешнего окна гиротрона.

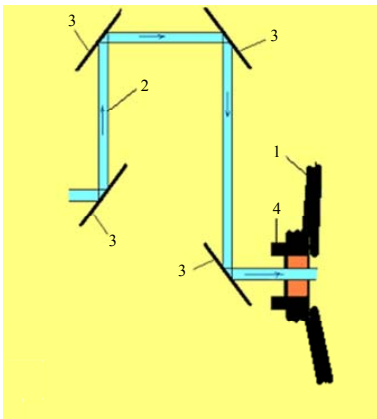


Рис. 4. Схема экспериментальной установки, предназначенная для создания и удержания высокотемпературной плазмы в стеллараторе Л-2М: 1 – камера стелларатора Л-2М; 2 – микроволновый пучок; 3 – отражающие микроволны зеркала; 4 – входное окно стелларатора.

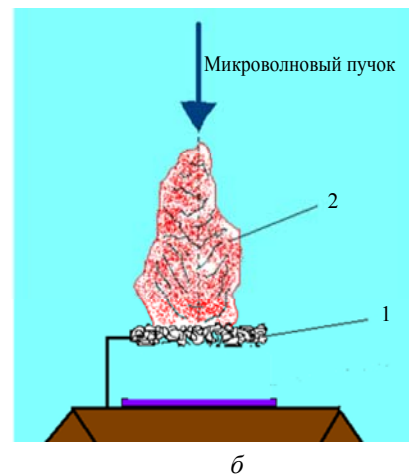
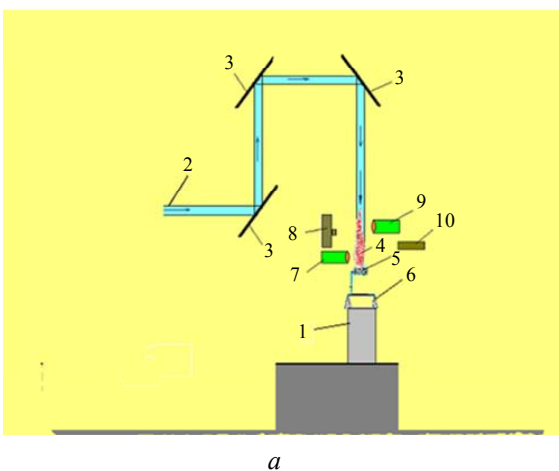


Рис. 5. Схема экспериментальной установки, предназначенной для возбуждения СНС-разряда с помощью подпорогового микроволнового пучка в свободном пространстве атмосферного воздуха: а) 1 – стойка со схемами питания диагностической аппаратуры; 2 – микроволновый пучок; 3 – отражающие зеркала; 4 – СНС-разряд; 5 – инициатор; 6 – держатель инициатора; 7 – скоростная видеокамера; 8 – скоростной фоторегистратор FER-7; 9 – оптический спектрограф; 10 – фотомножитель. б) 1 – инициатор; 2 – СНС-разряд.

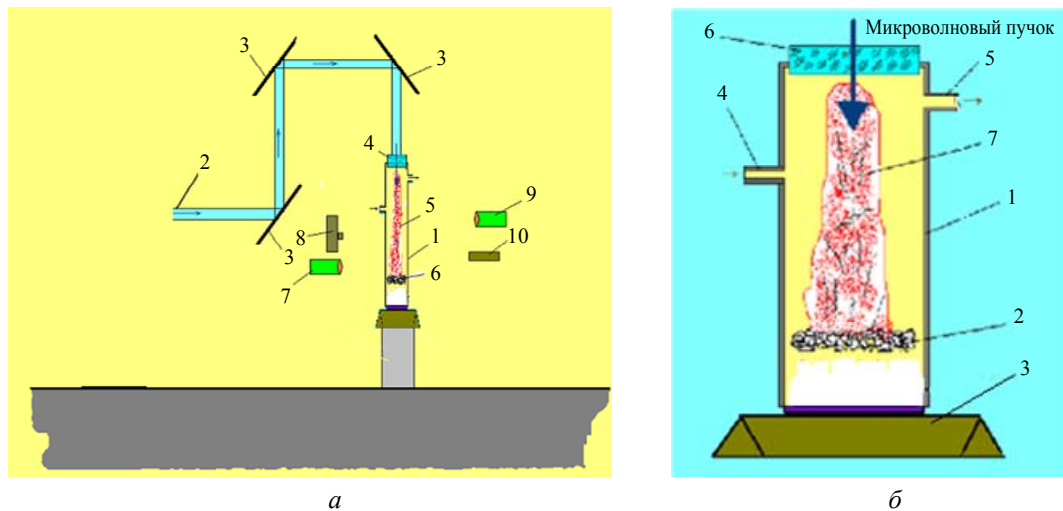


Рис. 6. Схема экспериментальной установки, предназначенной для возбуждения СНС-разряда в закрытой цилиндрической камере с помощью подпорогового микроволнового пучка: а) 1 – цилиндрическая камера; 2 – микроволновый пучок; 3 – отражающие зеркала; 4 – радиопрозрачное окно; 5 – СНС-разряд; 6 – инициатор; 7 – скоростная видеокамера; 8 – скоростной фоторегистратор FER-7; 9 – оптический спектрограф; 10 – фотоумножитель. б) 1 – цилиндрическая камера; 2 – инициатор; 3 – крепление камеры; 4 – напуск рабочего газа; 5 – выпуск отработанного газа; 6 – радиопрозрачное окно; 7 – СНС-разряд.

Минимальное поперечное сечение пучка на расстоянии 650 мм является эллиптическим с полуосями  $a = 3$  см и  $b = 1$  см. Площадь поперечного сечения  $S = \pi ab = 9,5$  см<sup>2</sup>. На расстоянии 440 мм поперечное сечение луча является круглым с радиусом 3 см, при этом  $S = \pi r^2 = 28$  см<sup>2</sup>. Электрическое поле в пучке можно рассчитать по формуле

$$E_{\max} = 27,5(P/S)^{0,5} \text{ В/см}, \quad (9)$$

где  $P$  – микроволновая мощность, выраженная в ваттах, а площадь пучка  $S$  – в см<sup>2</sup>. В минимальном поперечном сечении пучка при заданной мощности 200 кВт имеем  $E_{\max} = 3990$  В/см, тогда как в круговой области  $E_{\max} = 2300$  В/с.

Даже при максимальных мощностях микроволнового импульса значения приведенного электрического поля в пучке не превышают  $\gamma \leq 10^{-16}$  В см<sup>2</sup>. Заметим, что это значение более чем на порядок ниже порога генерации самоподдерживающегося разряда в свободном пространстве [10]:  $\gamma_{thr} \approx 10^{-15}$  В см<sup>2</sup>.

Конструкция и свойства инициатора, специально спроектированного для нашего эксперимента, таковы, что он не нуждается в каком-либо внешнем источнике энергии и не отражает какой-либо существенной части энергии падающего микроволнового излучения, способной привести к срыву генерации микроволн в гиротроне. Инициатор представляет собой клубок из хаотически спутанных тонких металлических нитей диаметром  $\sim 0,5$  мм. Подобная конструкция (хаотического переплетения металлических проводников) образует

арочную систему, которой легко придавать различную форму и ею перекрывать значительную площадь сечения микроволнового пучка. Испытания данной конструкции в воздухе при нормальном давлении (1 атм) продемонстрировали её эффективность для создания тонкого слоя плазмы самоподдерживающегося разряда, прилегающей к инициатору. Механизм пробоя газа может быть объяснён как результат образования при случайном переплетении проволок элементарных хаотически расположенных полуволновых резонаторов, в которых происходит усиление поля до пробойных для атмосферного воздуха значений. Предполагаемая добротность таких резонаторов для усиления поля должна составлять  $\sim 100$ .

На установке TORCH изучена возможность возбуждения СНС-разряда в свободном пространстве в воздухе при атмосферном давлении, а также в закрытой камере, заполненной различными газами или газовыми смесями при давлениях, близких к нормальному атмосферному. Схемы экспериментов с подпороговым микроволновым разрядом в атмосферном воздухе и в закрытой камере схематически изображены на рис. 5 и 6 соответственно.

Цилиндрическая камера может быть выполнена как из диэлектрика, так и из металла. Поперечные размеры её должны превышать поперечный размер микроволнового пучка. Один из торцов, а именно, обращённый к микроволновому излучению, закрыт радиопрозрачным кварцевым окном, предназначенным для ввода микроволнового пучка. Инициатор располагается у противоположного конца цилиндра. В камере предусмот-

рена возможность откачки и последующего заполнения рабочим газом, а также вывод газа, обработанного разрядом.

В качестве диагностических методик использовались:

- интегральное за время микроволнового импульса фотографирование разряда;
- регистрация проходящего и отражённого уровня микроволнового излучения;
- регистрация скоростной видеокамерой динамики аксиального распространения СНС-разряда;
- фотографирование с помощью фотоэлектронного регистратора ФЭР-7 в режиме непрерывной развёртки аксиального распространения СНС-разряда;
- регистрация оптического спектра излучения разряда с помощью спектрографов AVASPEC 2048, 3648 и HR2000;
- регистрация с помощью фотоэлектронных умножителей ФЭУ-106 временного и пространственного поведения свечения СНС-разряда;
- регистрация УФ-излучения СНС-разряда в области 240–360 нм УФ-фотодамиодами GUVVA-S12SD.

### Результаты экспериментов

Проведённые на стенде TORCH эксперименты по схемам, представленным на рис. 5 и 6, продемонстрировали возможность возбуждения СНС-разряда как в свободном пространстве, так и в закрытой камере при атмосферном давлении в одиночных микроволновых (на длине волны 0,4 см) импульсах, начиная с пиковой мощности порядка  $P_i \approx 150$  кВт и выше (до 600 кВт) при длительности микроволнового импульса от  $\tau_{MW} \approx 200$  мкс и выше (до 20 мс). Разряд, инициированный при помощи специального инициатора, занимал объём пучка с аксиальным размером тем большим, чем больше уровень мощности и длительность микроволнового импульса.

Получено несколько снимков разряда, возбуждаемого по схеме на рис. 5 микроволновыми пучками мощностью 150 и 400 кВт при различной длительности микроволнового импульса. Фотографии разряда при  $P_i = 380$  кВт в нарастающей вдоль оси плотности мощности излучения, когда перетяжка пучка находилась на  $\sim 50$  см выше инициатора, представлены на рис. 7.

По фотографиям в случае спадающей вдоль оси плотности мощности излучения, когда перетяжка пучка находилась в области инициатора, была определена скорость осевого распространения СНС-разряда, свободно локализованного в атмосферном воздухе. Данные измерений представлены на рис. 8. Осовой размер разряда достигает величины  $L \approx 50$  см.

Ультрафиолетовое излучение СНС-разряда, возбуждаемого в воздухе атмосферного давления, регистрировалось в течение одного микроволнового импульса с помощью пяти GUVVA-S12SD УФ-фотодиодов, которые были размещены вдоль оси СНС-разряда на расстоянии 5 см друг от друга. Пространственное разрешение излучения на оси разряда составляло  $\Delta L \approx 2$  см. Временная зависимость аксиальной скорости СНС-разряда также показана на рис. 8 (кривая 3).

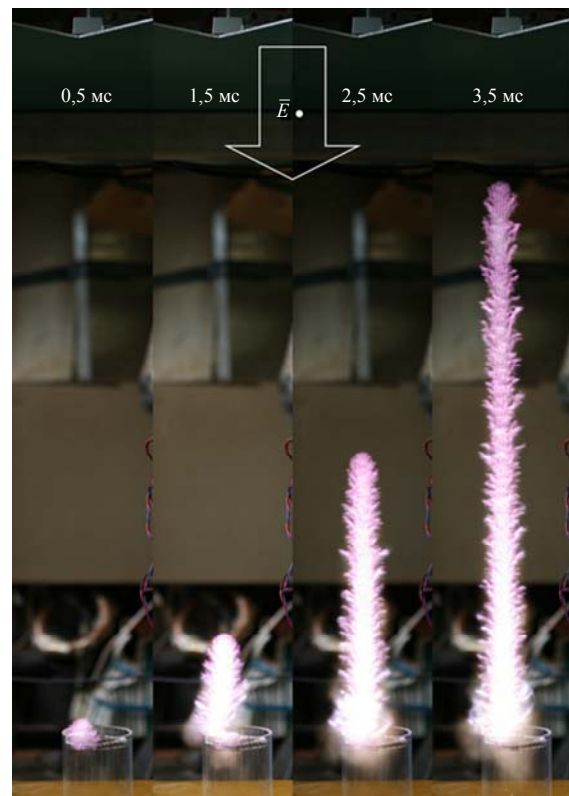


Рис. 7. Фотографии СНС-разрядов в свободном пространстве в атмосфере воздуха при различных длительностях микроволновых импульсов. Микроволновая мощность  $P_i = 380$  кВт.

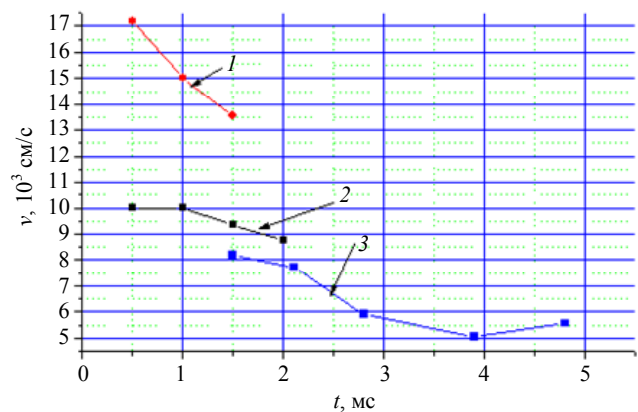


Рис. 8. Временная зависимость скорости аксиального распространения СНС-разряда, возбуждаемого в атмосфере воздуха, определенная по фотографиям (кривые 1 и 2) и сигналам УФ-фотодиодов (кривая 3).  $P_i = 400$  кВт (кривая 1) и 200 кВт (кривые 2 и 3),  $\tau_{MW} = 6$  мс.

Проведено фотографирование разряда в воздухе скоростной видеокамерой с покадровой разверткой. Характерный кадр, соответствующий задержке 2,4 мс от начала разряда и снятый с экспозицией 0,4 мс, приведен на рис. 9. Мощность микроволнового излучения 380 кВт, длительность ~4 мс.

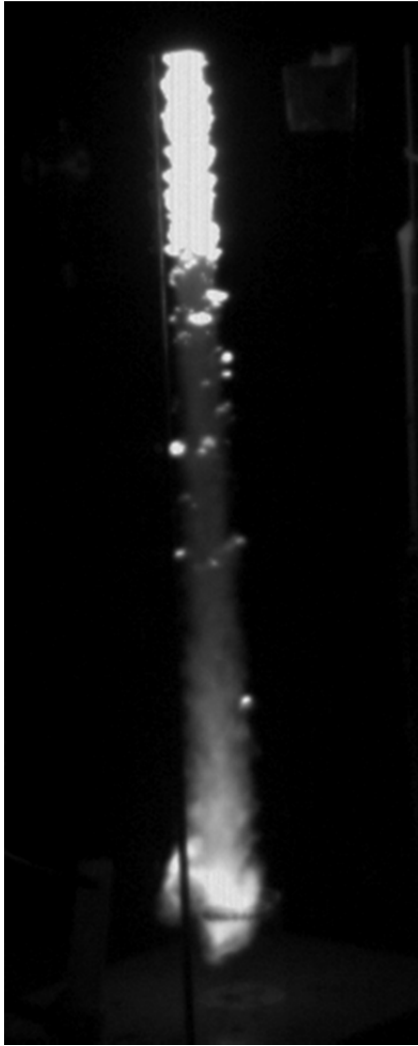


Рис. 9. Высокоскоростная съемка СНС-разряда (воздух, свободное пространство).  $\tau_{MW} = 4$  мс;  $P_i = 380$  кВт. Экспозиция 0,4 мс, задержка 2,4 мс от начала разряда.

На фотографиях и осциллограммах УФ-фотодиодов можно видеть, что интенсивность излучения плазмы максимальна на фронте ионизации. За фронтом свечение ослабевает, что можно объяснить уменьшением интенсивности микроволнового излучения. Аналогичная картина наблюдается и на осциллограммах, регистрируемых фотоумножителем. Динамика свечения трех последовательных разрядов, зарегистрированная при помощи ФЭУ-106, расположенного на расстоянии 8 см от инициатора, представлена на рис. 10. Коллимация обеспечивает пространственное разрешение порядка 2,5–3,0 см. Мощность микроволнового излу-

чения составляет 200 кВт, длительность 4 или 6 мс. Из осциллограмм видно, что в начале интенсивность свечения быстро нарастает и уменьшается за фронтом разряда.

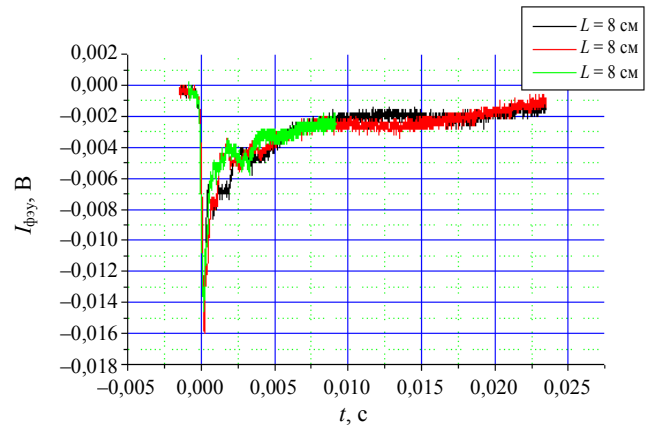


Рис. 10. Осциллограммы сигналов ФЭУ при последовательных СНС-разрядах в воздухе (условия свободного пространства).  $L = 8$  см;  $P_i = 200$  кВт;  $\tau_{MW} = 4$  мс.

Проведено исследование спектра оптического излучения разряда в воздухе при помощи спектрографов AVASPEC 2048, 3648 и HR2000. Наиболее характерный спектр получен при помощи спектрографа HR2000, работающего в диапазоне 300–400 нм. В этом диапазоне лежит вторая положительная система азота. На рис. 11 приведен спектр микроволнового разряда в воздухе с расшифровкой полос второй положительной системы азота. Температура газа в области, являющейся источником регистрируемого оптического излучения, согласно обработке спектров, аналогичных представленным на рис. 11, составляет ~4000–4500 К.

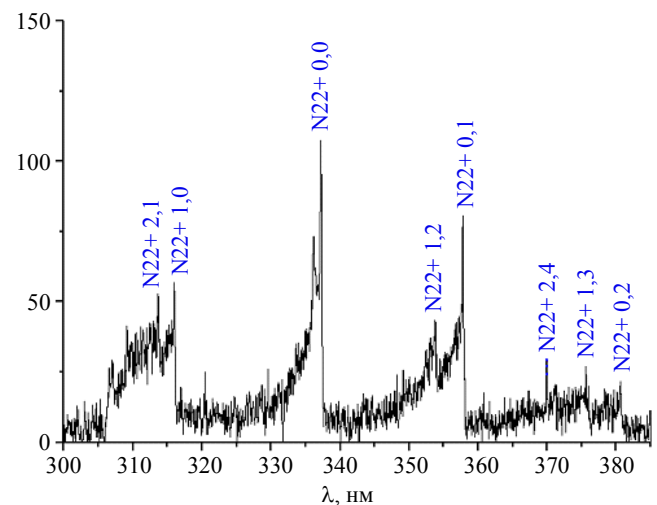


Рис. 11. Оптический спектр СНС-разряда в воздухе (свободное пространство).  $P_i = 200$  кВт;  $\tau_{MW} = 6$  мс.



На рис. 12 представлена фотография СНС-разряда, возбуждаемого по схеме, представленной на рис. 6, б, т. е. в закрытой камере, наполненной смесью  $\text{CH}_4:\text{CO}_2$  при атмосферном давлении. При работе с метан-водородными и метан-водяными смесями в спектре излучения чётко регистрировалось свечение линии  $\text{H}_\alpha$  (см. рис. 13). В предположении, что штарковский механизм ответственен за уширение этой линии, плотность электронов в разряде превышает  $10^{16} \text{ см}^{-3}$ .

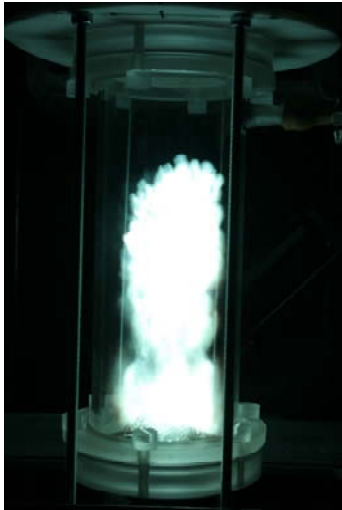


Рис. 12. Фотография СНС-разряда, возбуждаемого в закрытой кварцевой камере, наполненной  $\text{CH}_4:\text{CO}_2$  газовой смесью.  $P_i = 400 \text{ кВт}$ ;  $\tau_{\text{MW}} = 4 \text{ мс}$ ;  $p = 1 \text{ атм}$ .

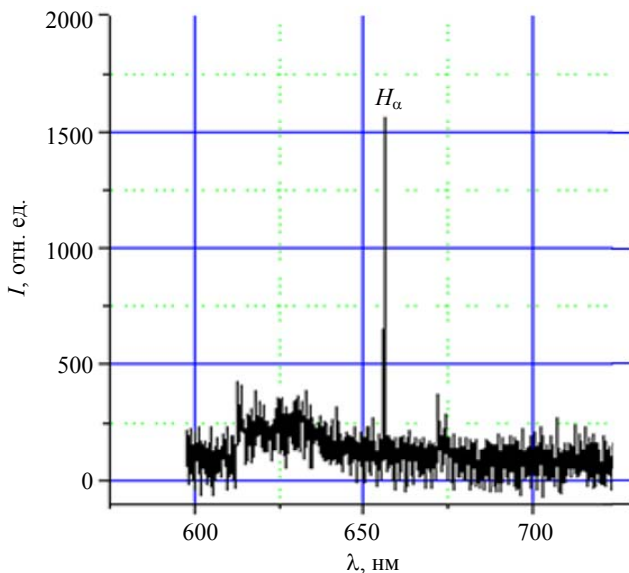


Рис. 13. Оптический спектр СНС-разряда в  $\text{CH}_4:\text{H}_2\text{O}$  газовой смеси (закрытая цилиндрическая камера).  $P_i = 200 \text{ кВт}$ ;  $\tau_{\text{MW}} = 6 \text{ мс}$ ,  $p = 1 \text{ атм}$ .

**Обсуждение результатов эксперимента**

Структура возбуждаемого по схемам, представленным на рис. 5 и 6, разряда, динамика его

распространения в микроволновом пучке с уровнем приведённого электрического поля, существенно меньшем порогового для самоподдерживающегося в газовой среде разряда, соответствуют характеристикам СНС-разрядов, описанных в [3, 5, 13]. То, что аксиальные скорости, зарегистрированные в настоящей работе, оказываются дозвуковыми и существенно меньшими, чем полученные, в частности, в [3], может быть, связано с тем, что при работе с МИГ-3 мы впервые подняли уровень давления рабочего газа до атмосферного. При столь сильной зависимости скорости  $V_{zi}$  от давления ( $\sim 1/p^4$ ), как это предсказывается соотношением (5), снижение аксиальной скорости в описываемых экспериментах вполне объяснимо. Достаточно высокие значения  $v_{\text{eff}} / \omega$ , превышающие 10, объясняют, согласно (7), достижение столь высокой концентрации электронов, как  $n_e \approx 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , определённой по штарковскому уширению линии  $\text{H}_\alpha$ . Газовая температура в разрядной области, определённая в настоящем эксперименте, оказывается на уровне 4000–4500 К, что меньше величин 5000–7000 К, полученных в более ранних экспериментах [3, 5, 13] в сантиметровом диапазоне длин волн и при давлениях газа, существенно меньших атмосферного.

В рамках физической модели СНС-разряда, разработанной в [3, 13], можно оценить удельный энергозатрат,  $\varepsilon$ , вводимый в элементарную «нить» разряда:

$$\varepsilon \approx \sigma E_0^2 \tau_i, \tag{10}$$

где  $\sigma$  – проводимость элементарной «нити», а  $\tau_i$  – время взаимодействия нити с микроволновым излучением во время распространения ионизационной волны.

Выражая проводимость, как в работе [10], т. е. в виде формулы:

$$\sigma \approx n_e e^2 v_{\text{eff}} / m (\omega^2 + v_{\text{eff}}^2) \tag{11}$$

и полагая, что  $v_{\text{eff}} \gg \omega$ , мы получаем выражение:

$$\sigma \approx 2,82 \times 10^{-4} n_e / v_{\text{eff}} \Omega^{-1} \text{ см}^{-1}. \tag{12}$$

Здесь  $n_e$  в  $(\text{см}^{-3})$ , а  $v_{\text{eff}}$  в  $(\text{с}^{-1})$ .

В этом случае оценочная формула для удельного энергозатрата имеет вид:

$$\varepsilon \approx 2,82 \times 10^{-4} n_e / v_{\text{eff}} E_0^2 \tau_i, \tag{13}$$

где  $E_0$  в  $(\text{В/см})$ , а  $\tau_i$  в  $(\text{с})$ .

Если мы подставим в формулу (13) характерные для нашего эксперимента данные ( $n_e \approx 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ,

$v_{eff} \approx 2 \times 10^{11} \text{ с}^{-1}$ ,  $\tau_i \approx 5 \text{ мкс}$  и  $E_0 \approx 2 \times 10^3 \text{ В/см}$ , то удельный энергозатрат в нить будет на уровне:

$$\varepsilon \approx 0,4 \text{ кДж/см}^3.$$

Таким образом, исходя из результатов эксперимента и проведенных оценок, наблюдаемый нами разряд может быть отнесен к категории СНС-разрядов на следующих основаниях:

- разряд возбуждается в условиях, при которых во всём объёме газа, занятом микроволновым пучком, приведённое электрическое поле существенно ниже порогового по отношению к развитию и поддержанию самостоятельного разряда;
- разряд имеет структуру, состоящую из тонких каналов («нитей»), вытянутых вдоль микроволнового электрического поля;
- скорость аксиального распространения разряда, параметры газоразрядной плазмы и газа в занятом разрядом объёме вполне согласуются с физической моделью микроволнового СНС-разряда;
- как было предсказано физической моделью [3, 5] разряда, возбуждаемый в этом эксперименте является источником интенсивного УФ-излучения.

### Возможные приложения

Результаты, полученные в описанных экспериментах, позволяют нам начать разработку лабораторного плазмохимического реактора на основе мощного пучка миллиметрового излучения, следуя схеме, изображенной на рис. 6, на основе комплекса «МИГ-3 ГИРОТРОН».

Основные исследования в области плазмохимии, являющиеся актуальными для современной техники, предполагается провести по следующим проблемам:

- углекислотная конверсия метана в синтез-газ;
- водно-паровая конверсия метана в синтез-газ;
- утилизация двуокиси углерода.

Цикл ранее проведенных экспериментов и теоретических (расчётных) работ (см. [17–20]) показал, что специфика СНС-разряда, представляющего собой «нитевидную» плазменную структуру, отличающуюся высокой электронной концентрацией, высокой электронной и газовой температурой и рекордно высокими удельными энергозатратами, оказывается весьма привлекательной для решения ряда плазмохимических задач, в число которых входят и перечисленные выше. Объясняется этот феномен тем, что чрезвычайно высокие газовые температуры, достигаемые в «нитях» на

«взрывной» нелинейной стадии ионизационно-перегревной неустойчивости, приводят к эффективному и практически полному разложению молекул рабочего газа на радикалы и атомы. Быстрое же охлаждение контрагированных структур сопровождается процессом закалки состава обработанного разрядом газового объёма.

В рамках программы Chemical Bench [21] проведены расчёты, в которых разрядная «нить» моделировалась последовательностью двух терморавновесных реакторов. В одном из реакторов газ нагревался до температур, соответствующих измеренным и достигаемым за определённые в эксперименте времена, а затем поступал в реактор охлаждения с динамикой спада температуры, полученной в экспериментах. Расчётная эффективность плазмохимических процессов оказалась близкой к измеренной экспериментально.

Приближённое выражение для аксиального размера  $L_b$  СНС-разряда можно, согласно (5), представить в виде:

$$L_b \approx 6,8 \times 10^{-5} \tau_{MW} n_e I_f^{3/2} / p_0^4. \quad (14)$$

Исходя из соотношения (14) и принимая во внимание, что в описываемых экспериментах при разряде в воздухе для  $\tau_i = 2 \text{ мс}$  и  $P_i = 200 \text{ кВт}$  получена длина  $L_b \approx 15 \text{ см}$ , можно рассчитывать на принципиальную возможность формирования (как в свободном пространстве, так и в цилиндрических камерах) больших размеров СНС-разрядов. Предполагая параметры одиночного микроволнового импульса  $\tau_{MW} = 20 \text{ мс}$   $P_i = 600 \text{ кВт}$  (максимальные при работе с комплексом «МИГ-3 ГИРОТРОН») можно рассчитывать на принципиальную возможность получения аксиального размера области пучка, обработанного разрядом, столь протяжённого, как 5–7 м, что требуется для практической реализации метода.

Возможность возбуждения протяженных СНС-разрядов в газах при атмосферном давлении может существенным образом расширить область их применения путем включения проблем глобального газоразрядного очищения атмосферы от озонразрушающих примесей, а также очистки промышленных газов от экологически вредных загрязнений.

Физические аспекты конкретных проблем очистки атмосферы от хлорфторуглеродов (фреона) обсуждались ранее в ряде работ в Институте общей физики и Институте прикладной физики [17, 22–24]. В качестве способа разложения хлорфторуглеродов рассматривались подпороговые микроволновые пучки, генерируемые наземной станцией и фокусируемые в область на заданной высоте. Реализация в этих целях СНС-

разрядов, возбуждаемых по схеме, представленной на рис. 14, могла бы быть предпочтительней благодаря характеристикам, типичным для этой формы разряда. К наиболее важным характеристикам относятся следующие:

использование относительно низкого значения микроволновой мощности (существенно ниже порогового значения), ведущее к удешевлению технологии очистки;

из-за низкой (дозвуковой) скорости распространения волны ионизации СНС-разряда существенно более высокий удельный энергозатрат в

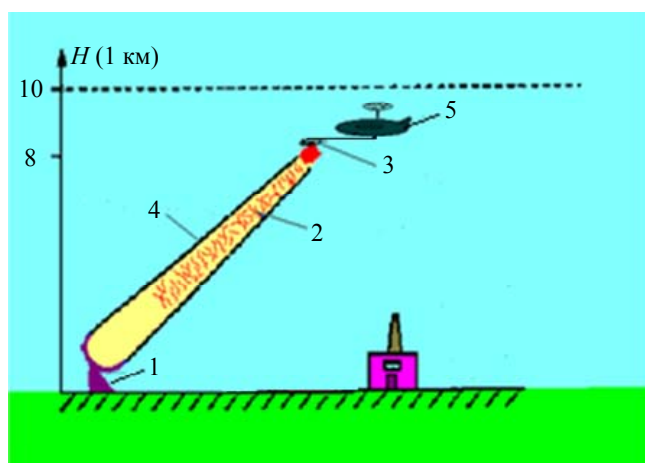


Рис. 14. Схематическое изображение системы очистки атмосферы на основе СНС-разряда. 1 – гиротрон и микроволновая антенна; 2 – СНС-разряд; 3 – инициатор; 4 – микроволновый пучок; 5 – беспилотник.

### Заключение

Как следует из последних выполненных в ИОФ РАН экспериментов, область реализации новой формы глубокого подпорогового самоподдерживающегося-несамостоятельного (СНС) разряда значительно расширена. Впервые возбуждение такого разряда при давлении газа порядка (и выше) атмосферного было продемонстрировано в свободном пространстве атмосферного воздуха, а также в замкнутой цилиндрической камере, заполненной разными газами.

Впервые СНС-разряд был создан миллиметровыми микроволновыми пучками с высокой импульсной мощностью  $\approx 600$  кВт. Разряд впервые инициирован в любом поперечном сечении пучка с помощью специально изготовленной конструкции, состоящей из металлических тонких нитей. В этом случае инициирование разряда, а также его поддержание в виде аксиально распространяющейся волны ионизации осуществлялось с помощью только одной микроволновой энергии.

газовую среду, чем в случае использования надпороговых пучков;

простота инициирования СНС-разряда и контроль его размеров;

возможность в рамках современной микроволновой техники возбуждать плазменный столб длиной до 20–30 м.

При достижении СНС-разрядов метровой длины микроволновые пучки могут использоваться для проектирования электроразрядной системы для очистки потоков промышленных газовых выбросов (схематичный вариант показан на рис. 15).

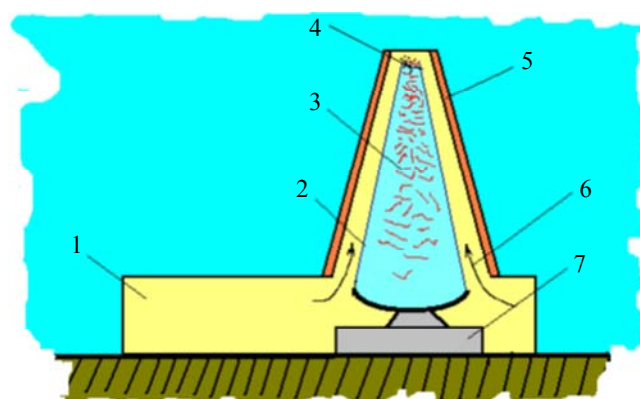


Рис. 15. Схематическое изображение очистки промышленных выбросов газа на основе СНС-разряда. 1 – заводское здание; 2 – микроволновый пучок; 3 – СНС-разряд; 4 – инициатор; 5 – дымоход, 6 – поток газа; 7 – ГИРОТРОН и антенна.

Параметры разряда не противоречат предсказаниям физической модели, рассматривающей СНС-разряд как чередование последовательных переходов несамостоятельных и самоподдерживающихся разрядов через возбуждение и развитие ионизационно-перегревающей неустойчивости.

Был применен гиротрон, способный генерировать в импульсно-периодическом режиме микроволновое излучение со средней мощностью, достигающей нескольких сотен кВт (при пиковой мощности импульса 600 кВт). Относительно простое введение этого микроволнового излучения в цилиндрический реактор, также как и высокий эффективный вклад микроволновой энергии в глубоко подпороговый разряд и через него в газовую среду позволяют сделать вывод о целесообразности создания плазмохимического реактора на основе гиротрона и СНС-разряда, который мог бы удовлетворить современные требования промышленности в отношении производительности различных химических технологий. Например, для конверсии метана в синтез-газ, утилизации  $\text{CO}_2$ , очистки промышленных газовых отходов и т. д.

Работа поддержана Российским Научным Фондом Проект 17-12-01352.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Kossyi I. A., Gritsinin S. I., Davydov A. M. / 8th Int. Workshop Microwave Discharges: Fundamentals and Applications Book of Abstracts Zvenigorod, Russia, (STC "PLAZMAIOFAN"). 2012. P. 39.
2. Kossyi I. A. / Proc. 8th Int. Workshop "Strong Microwaves and Terahertz Waves Sources and Applications N. Novgorod – St. Petersburg, Russia (Institute of Applied Physics RAS). 2011. P. 25.
3. Batanov G. V., Gritsinin S. I., Kossyi I. A., Magunov A. N., Silakov V. P., Tarasova N. M. In Book: Plasma Physics and Plasma Electronics, Ed. L. M. Kovrizhnykh (Nova Science Publishers, Commack., 1985). P. 241-82.
4. Batanov G. M., Gritsinin S. I., Kossyi I. A. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2002. 35. P. 2687.
5. Kossyi I. A. / 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit Reno Nevada Report AIAA-1457. 2006.
6. Kossyi I. A., Batanov G. M., Berezhetskaya N. K., Davydov A. M., Sarksjan K. A., Harchev N. K. / Physical Basis and Plasma-Chemical Application HAKONE 15th High pressure low temperature plasma Chemistry Symposium Brno Czech Republic Book Of Abstract (Masaryk University). 2016.
7. Бровкин В. Г., Быков Д. Ф., Голбев С. К. и др. // ЖТФ. 1991. Т. 61. С. 153.
8. Бархударов Э. М., Бережеская Н. К., Большаков Е. Ф., Елецкий А. В., Косый И. А., Тактакишвили М. И. // ЖТФ. 1984. Т. 54. С. 1219.
9. Gritsinin S. I., Kossyi I. A., Silakov V. P., Tarasova N. M., Terekhin V. E. Preprint of IOFAN. No. 14. 1986.
10. Raizer Yu. P. Gas Discharge Physics (Nauka: Moscow, 1987, Springer-Verlag: Berlin, 1991).
11. Kossyi I. A., Batanov G. M., Berezhetskaya N. K., Davydov A. M., Sarksjan K. A., Harchev N. K. / 43rd Conference on Plasma Physics EPS-2016 Proc Leuven, Belgium. (EPS). 2016. P. 1–4.
12. Артемов В. И., Левитин Ю. С., Синкевич О. А. Неустойчивость и турбулентность в низкотемпературной плазме. – М.: Московский энергетический институт. 1994.
13. Ким А. В., Фрайман Г. М. // Физика плазмы. 1983. № 9. С. 613.
14. Аветисов В. Г., Грицинин С. И., Ким А. В. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1990. Т. 51. С. 306.
15. Батанов Г. М., Белоусов В. И., Бондарь Ю. Ф., Борзюсеков В. Д. и др. // Прикладная физика. 2012. № 6. С. 79.
16. Батанов Г. М., Колик Л. В., Курбатов В. И., Петров А. Е., Сапожников А. В., Сарксян К. А., Шатц М. Г. // Физика плазмы. 1986. № 12. С. 762.
17. Аскарьян Г. А., Батанов Г. М., Бархударов А. Е., Грицинин С. И., Корчагина Е. Г., Косый И. А., Силаков В. П., Тарасова Н. М. // Физика плазмы. 1992. Т. 18. С. 1198.
18. Gritsinin S. I., Knyazev V. Yu., Kossyi I. A., Popov N. A. // Plasma Physics Reports. 2006. Vol. 32. P. 520.
19. Gritsinin S. I., Gushchin P. A., Davydov A. M., Ivanov E. V., Kossyi I. A., Misakyan M. A. // Plasma Physics Reports. 2009. Vol. 35. P. 933.
20. Parkhomenko Yu. N., Polisan A. A., Skryleva E. A., Tabachkova N. Yu., Shul'ga N. Yu., Davydov A. M., Kossyi I. A., Duyzhikov I. N., Pokalyakin V. T. // Russian Microelectronics. 2012. Vol. 41. P. 491.
21. Potapkin B. V. et al., Program "Chemical Work Bench (Kinetic Technologies (KINTECH))". 1998–2000.
22. Batanov G. M., Kossyi I. A., Silakov V. P. // Plasma Physics Reports. 2002. Vol. 28. P. 204.
23. Askaryan G. A., Batanov G. M., Kossyi I. A., Kostinskii A. Yu. / 1992 ISPP-10 (Piero Caldirola), High Power Microwave Generation and Applications Eds E. Sindoni and C. Wharton, SIF, Bologna (Editrice Compositori, 1992). P. 207.
24. Askaryan G. A., Batanov G. M., Bykov D. F., Gritsinin S. I., Kossyi I. A., Kostinskii A. Yu., Matveyev A. A., Silakov V. P. / ISPP-7 "Piero Caldirola", Controlled Active Global Experiments (CAGE). Eds E. Sindoni and A. Y. Wong SIF, Bologna, (Editrice Compositori, 1991). P. 239.

PACS: 52.80.Pi

## Subthreshold high-pressure discharge excited by a microwave beam: the physical basics and applications

K. V. Artem'ev<sup>1</sup>, G. M. Batanov<sup>1</sup>, N. K. Berezhetskaya<sup>1</sup>, A. M. Davydov<sup>1</sup>,  
I. A. Kossyi<sup>1</sup>, V. I. Nefedov<sup>2</sup>, K. A. Sarksyian<sup>1</sup>, and N. K. Kharchev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences  
38 Vavilov str., Moscow, 119991, Russia  
E-mail: kossyi@fpl.gpi.ru

<sup>2</sup> Moscow Technological University (MIREA)  
78 Vernadsky av., Moscow, 119454, Russia

Received August 8, 2017

*A new form of discharge excited by microwave beam in the high-pressure (up to atmospheric one and higher) gas in the free space and in a closed chamber is under discussion. For the first time, a*

**discharge realization has been ensured by the gyrotron with a pulse radiation having such parameters as the pulse power  $200 \leq P_i \leq 600$  kW, pulse duration  $0.5 \leq \tau \leq 20$  ms and wavelength  $\lambda = 0.4$  sm. At the deeply subthreshold conditions in an atmospheric pressure, the air plasma column having as high length as  $L \cong 50$  sm has been generated by the use of microwave beam formatted with help of quasi-optical transmission line. In the application of the MIG-3 GYROTRON complex with indicated parameters, the generation of the plasma column reaching several meters in length could be realized in principle. Parameters and structure of investigated plasma formations are allowing to relate it to the category of open-described in the GPI SNSS (self-nonself-sustained) discharge. One of the important applications of this discharge is plasma-chemical cleaning the urban air environment from environmentally hazardous contaminants.**

**Keywords:** microwave discharge, ionization wave, urban air environment, environmentally hazardous contaminants, gas-discharge cleansing.

## REFERENCES

1. I. A. Kossyi, S. I. Gritsinin, and A. M. Davydov, in *Book of Abstracts: 2012 8th Int. Workshop Microwave Discharges: Fundamentals and Applications* (Zvenigorod, Russia, STC "PLAZMAIOFAN"), P. 39.
2. I. A. Kossyi, in *Proc. 8th Int. Workshop "Strong Microwaves and Terahertz Waves Sources and Applications"* (N. Novgorod – St. Petersburg, Russia, Institute of Applied Physics RAS, 2011), P. 25.
3. G. V. Batanov, S. I. Gritsinin, I. A. Kossyi, A. N. Magunov, V. P. Silakov, and N. M. Tarasova, in *Book: Plasma Physics and Plasma Electronics*, Ed. L. M. Kovrizhnykh (Nova Science Publishers, Commack, 1985), P. 241.
4. G. M. Batanov, S. I. Gritsinin, and I. A. Kossyi, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **35**, 2687 (2002).
5. I. A. Kossyi, in *44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit Reno* (Nevada, 2006) Report AIAA-1457.
6. I. A. Kossyi, G. M. Batanov, N. K. Berezhetskaya, A. M. Davydov, K. A. Sarksjan, and N. K. Harchev, in *Book of Abstracts: Physical Basis and Plasma-Chemical Application HAKONE; 15th High pressure low temperature plasma Chemistry Symposium* (Masaryk University, Brno, Czech Republic, 2016).
7. V. G. Brovkin, D. F. Bykov, S. K. Golubev, et al., *Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki*, **61**, 153 (1991).
8. E. M. Barkhudarov, N. K. Berezhetskaya, E. F. Bol'shakov, A. V. Elets'kii, I. A. Kossyi, and M. I. Taktakishvili, *Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki*, **54**, 1219 (1984).
9. S. I. Gritsinin, I. A. Kossyi, V. P. Silakov, N. M. Tarasova, and V. E. Terekhin, Preprint of IOFAN, No. 14 (1986) [in Russian].
10. Yu. P. Raizer, *Gas Discharge Physics* (Springer-Verlag: Berlin, 1991; Nauka: Moscow, 1987).
11. I. A. Kossyi, G. M. Batanov, N. K. Berezhetskaya, A. M. Davydov, K. A. Sarksjan, and N. K. Harchev, in *Proc. 43rd Conference on Plasma Physics EPS-2016* (Leuven, Belgium, 2016), P. 1.
12. V. I. Artemov, Yu. S. Levitin, and O. A. Sinkevich, *Instability and Turbulence of Low-Temperature Plasma* (Moscow, Moscow Energetic Institute, 1994) [in Russian].
13. A. V. Kim and G. M. Frayman, *Fizika Plazmy*, **9**, 613 (1983).
14. V. G. Avetisov, S. I. Gritsinin, A. V. Kim, et al., *Pis'ma v Zhurnal Eksperimental'noi i Tekhnicheskoi Fiziki* **51**, 306 (1990).
15. G. M. Batanov, V. I. Belousov, Yu. F., Bondar', V. D. Borzosekov et al. *Prikl. Fiz.*, No. 6, 79 (2012).
16. G. M. Batanov, L. V. Kolik, V. I. Kurbatov, A. E. Petrov, A. V. Sapozhnikov, K. A. Sarksyian, and M. G. Shatz, *Fizika Plazmy*, **12**, 762 (1986).
17. G. A. Askar'yan, G. M. Batanov, A. E. Barkhudarov, S. I. Gritsinin, E. G. Korchagina, I. A. Kossyi, V. P. Silakov, and N. M. Tarasova, *Fizika Plazmy* **18**, 1198 (1992).
18. S. I. Gritsinin, V. Yu. Knyazev, I. A. Kossyi, and N. A. Popov, *Plasma Physics Reports* **32**, 520 (2006).
19. S. I. Gritsinin, P. A. Gushchin, A. M. Davydov, E. V. Ivanov, I. A. Kossyi, and M. A. Misakyan, *Plasma Physics Reports* **35**, 933 (2009).
20. Yu. N. Parkhomenko, A. A. Polisan, E. A. Skryleva, N. Yu. Tabachkova, N. Yu. Shul'ga, A. M. Davydov, I. A. Kossyi, I. N. Duyzhikov, and V. T. Pokalyakin, *Russian Microelectronics* **41**, 491 (2012).
21. B. V. Potapkin et al. *Program "Chemical Work Bench (Kinetic Technologies (KINTECH))"* (1998–2000).
22. G. M. Batanov, I. A. Kossyi, and V. P. Silakov, *Plasma Physics Reports* **28**, 204 (2002).
23. G. A. Askaryan, G. M. Batanov, I. A. Kossyi, and A. Yu. Kostinskii, in *Proc. High Power Microwave Generation and Applications, ISPP-10, Piero Caldirola*, (Bologna, Editrice Compositori, 1992), P. 207.
24. G. A. Askaryan, G. M. Batanov, D. F. Bykov, S. I. Gritsinin, I. A. Kossyi, A. Yu. Kostinskii, A. A. Matveyev, and V. P. Silakov, *Controlled Active Global Experiments (CAGE). ISPP-7 "Piero Caldirola"*, (Bologna, Editrice Compositori, 1991), P. 239.