# \_\_\_\_\_ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ \_\_\_\_\_ ПЛАЗМА

УДК 533.9,537.521.7

# ПОДПОРОГОВЫЙ РАЗРЯД, ВОЗБУЖДАЕМЫЙ МИКРОВОЛНОВЫМ ПУЧКОМ В ГАЗЕ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ, КАК СИСТЕМА МНОЖЕСТВА ПЛАЗМЕННЫХ "МИКРОВЗРЫВОВ"

## © 2021 г. К. В. Артемьев<sup>*a*</sup>, Г. М. Батанов<sup>*a*</sup>, Н. К. Бережецкая<sup>*a*</sup>, В. Д. Борзосеков<sup>*a*</sup>, \*, А. М. Давыдов<sup>*a*</sup>, Е. М. Кончеков<sup>*a*</sup>, И. А. Коссый<sup>*a*</sup>, К. А. Сарксян<sup>*a*</sup>, В. Д. Степахин<sup>*a*</sup>, Н. К. Харчев<sup>*a*</sup>

<sup>а</sup> Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия \*e-mail: borzosekov@fpl.gpi.ru Поступила в редакцию 04.06.2020 г. После доработки 17.07.2020 г. Принята к публикации 20.07.2020 г.

Приведены результаты исследования самоподдерживающегося несамостоятельного газового разряда (СНС-разряда), возбуждаемого микроволновыми пучками, при высоком давлении газа (атмосферном или большем атмосферного) в условиях существенно подпороговой мощности излучения. Разряд имеет ряд свойств, отличающих его от всех описанных в литературе микроволновых разрядов. Физическая модель разряда, построенная в ИОФ РАН, описывает возбуждение его при столь высоких давлениях, что частота столкновений электрон-нейтрал оказывается существенно больше циклических частот микроволн, а мощность микроволнового пучка много меньше, чем пороговая для возбуждения самоподдерживающегося плазменного образования.В статье впервые приводятся результаты "теневого" фотографирования, демонстрирующие одно из основных свойств разряда его структуру, представляющую собой множество "микровзрывных" образований, движущихся навстречу микроволновому излучению.

*Ключевые слова:* газовый разряд, ионизационно-перегревная неустойчивость, гиротрон, теневая фотография

DOI: 10.31857/S0367292121010030

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Постоянный интерес к термонеравновесным разрядам в газах высокого давления (близкого к атмосферному или превышающего атмосферное) связан во многом с возможностью их использования для решения задач поддержания высокой чистоты воздушной среды в местах проживания (прежде всего в пределах современного мегаполиса). Анализ работ последних лет свидетельствует о быстром росте этого газоразрядного направления за счет обращения к микроволновому излучению. При этом наибольшая часть исследований относится к терагерцовому диапазону (см., например, [1-4]) и не достигает в настоящее время уровня, позволяющего осуществить переход от лабораторных экспериментов к экспериментам в реальной городской среде.

В настоящей работе в качестве источника микроволнового излучения использовался гиротрон с частотой 75 ГГц. Проведенные в ИОФ РАН исследования фундаментальных физических проблем, связанных с разрядами, возбуждаемыми микроволнами в газе, обеспечили основу для создания серии оригинальных плазменных источников, предназначенных для использования в физической лаборатории, а также для решения ряда технических и технологических проблем. К наиболее привлекательным разрядам для технологий будущего можно считать разряды в плазмотронах, базирующихся на подпороговой генерации их микроволновыми пучками. Одним из этих разрядов является открытый в ИОФ РАН [5, 6] и исследуемый в настоящей работе так называемый СНС (самоподдерживающийся несамостоятельный) разряд, схема возбуждения которого и характерная фотография приведены на рис. 1 и рис. 2. Разряд реализуется в следующих условиях:

а) микроволновый пучок вводится в газ в условиях, когда его давление столь велико, что выполняется неравенство

$$v_{eff} \ge \omega,$$
 (1)

где  $v_{eff}$  — эффективная частота столкновений электрон-нейтрал, а  $\omega$  — циклическая микроволновая частота;



**Рис. 1.** Схемаэксперимента. *1* – микроволновый пучок; *2* – фокусирующие зеркала; *3*– квазиоптический ответвитель; *4* – детекторная секция регистрации отраженного излучения; *5* – детекторная секция регистрации мощности излучения гиротрона; *6* – линия регистрации спектра излучения разряда (область перетяжки микроволнового пучка); *7* – инициатор разряда.

б) приведенное микроволновое электрическое поле много меньше пороговой величины для возбуждения самоподдерживающегося разряда:

$$\gamma = E_0 / n_m \ll [E_0 / n_m]_{thr}, \qquad (2)$$

где  $E_0$  — амплитуда микроволнового электрического поля,  $n_m$  — концентрация нейтралов, а  $[E_0/n_m]_{thr}$  — пороговое приведенное электрическое поле;

в) при сильной подпороговости самоподдерживающийся разряд возбуждается в узком слое в определенном поперечном сечении микроволнового пучка с помощью вводимого в него инициатора. Конструкция и свойства инициатора, специально разработанного для задач настоящего эксперимента, таковы, что он не требует дополнительно к микроволнам внешнего источника энергии ("пассивный" инициатор) и не отражает сколько-нибудь значительной доли энергии падающего микроволнового излучения, способной привести к срыву генерации микроволн. Инициатор представляет из себя клубок хаотически спутанных тонких металлических нитей диаметром ~0.5 мм. Такая конструкция хаотического переплетения металлических нитей создает арочную систему, которой легко придавать различную форму и ею перекрывать значительную площадь сечения микроволнового пучка. Испытания данной конструкции в воздухе при нормальном

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ том 47 № 1 2021



**Рис. 2.** Подборка серии фотографий СНС-разрядов в воздушной атмосфере в свободном пространстве при различных длительностях (слева направо длительности 0.5 мс, 1.5 мс, 2.5 мс и 3.5 мс соответственно) микроволнового импульса. *P* = 380 кВт.

давлении (1 атм) продемонстрировали ее эффективность для создания тонкого (≤1 см) слоя прилегающей к инициатору плазмы самоподдерживающегося разряда. Механизм пробоя связан с образованием при случайном переплетении проволок элементарных хаотически располагаемых полуволновых диполей, в которых происходит усиление электрического поля микроволн до пробойных для атмосферного воздуха значений.

В экспериментах в ИОФ РАН показано, что возбуждение самоподдерживающегося разряда в объеме, много меньшем, чем объем, занимаемый микроволновым пучком, сопровождается ионизационной волной [7]. Волна эта распространяется навстречу микроволновому пучку и формирует аксиальный плазменный факел. Характерные фотографии факела (СНС-разряда), возбуждаемого подпороговым микроволновым пучком, приведены на рис. 2. Результаты исследования новой формы микроволнового разряда приведены в работах [7–10].

## 2. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, ПРИВОДЯЩИЕ К ФОРМИРОВАНИЮ СНС-РАЗРЯДА

В современной плазменной физике принято считать, что все газовые разряды принадлежат к одной из двух категорий: самоподдерживающийся или несамостоятельный разряд [11]. Однако проведенные за последние годы в ИОФ РАН работы [5–7, 9] позволяют нам внести поправку в эти представления, вводя третью форму микроволнового разряда. Это – форма плазменного образования, названного СНС-разрядом, представляющая собой необычную последовательность переходов от самоподдерживающегося к несамостоятельному разряду через сильно нелинейную стадию ионизацонно-перегревной неустойчивости.

Существенную роль в формировании ионизационной волны, которую представляет собой разряд, играет фронтальное вакуумное УФ-излучение, зарегистрированное и изученное в работах [12, 13].

В свою очередь в представленной работе ультрафиолетовое свечение регистрировалось с помощью пяти коллимированных фотодиодов C-UVAS 12SD с полосой чувствительности 240— 360 нм. Диоды располагались вдоль оси микроволнового пучка в 10 см от нее в интервале друг от друга в 5 см. Узость импульса УФ-свечения (0.1— 0.2 мс) и его сокращение по мере удаления от разряда от области инициации свидетельствуют о том, что энерговыделение происходит вблизи фронта факела в его узкой головной части протяженностью 1–2 см [7].

На рис. 2 сведены интегральные фотографии разряда, выполненные при различных длительностях микроволнового импульса: слева направо 0.5 мс, 1.5 мс, 2.5 мс и 3.5 мс соответственно.

Нелинейная стадия ионизационно-перегревной неустойчивости в микроволновом несамостоятельном разряде теоретически анализировалась в [14]. В этой работе оценивались параметры плазмы в возникающих локальных пробоях газа подпороговыми микроволнами. Достижимая в месте локального пробоя электронная температура определяется соотношением

$$T_e \cong (n_{eff}^0 / \omega)^2 T_{e0}, \qquad (3)$$

а электронная концентрация

$$n_e \approx (n_{eff}^0 / \omega)^{\beta i - 1} v_a / v_T n_{e0}.$$
(4)

Здесь  $\beta_i \approx 5-6$ ,  $n_{e0}$  и  $T_{e0}$  – исходные электронные концентрация и температура на начальной стадии взаимодействия с микроволновым пучком в однородной плазме,  $v_a = 1/\tau_a$ , где  $\tau_a$  – характерное время потерь электронов (из-за прилипания, рекомбинации или диффузии),

$$v_T \approx 10^{-9} \sigma_0 E_0^2 / p_0,$$
 (5)

 $\sigma_0$  — начальная проводимость плазмы в электростатических единицах, а  $E_0$  — в В/см. По схемам, показанным на рис. 1, в ИОФ РАН проведены исследования возможности использования СНС-разрядов для решения экологических проблем, связанных с состоянием воздушной атмосферы современного мегаполиса. Обращение к СНС-разряду оправдано уникальными особенностями этого плазменного образования, представляющими значительный интерес в задачах очистки воздуха крупного города от все возрастающего содержания примесей.

Согласно физической модели, представленной в [7]. СНС-разряд может рассматриваться как ионизационная волна, представляющая собой распространяющееся навстречу микроволнам множество "микровзрывных" локальных образований. Физика формирований этих микрообластей заключается в возникновении последовательности переходов от несамостоятельного разряда, поддерживаемого фронтальным УФ-излучением, к ионизационно-перегревной неустойчивости, достигающей фазы сильной нелинейности. Плазмохимические процессы, лежащие в основе появления и "жизни" этих образований, происходят при быстром уменьшении размера области нагрева газа (нагрев  $dT_g/dt \ge 10^6$  кK/с) с последующим остыванием  $(dT_a/dt \approx -10^4 \, \mathrm{\kappa K/c})$  [15]. В согласии с термодинамикой такого рода процессов, СНС-разряд может быть рассмотрен как плазмохимический объект с локально происходящей декомпозицией молекул газа и процессами закалки продуктов разложения.

Процесс формирования столь быстрого локального нагрева и быстрого же охлаждения может быть рассмотрен как "микровзрыв", а факел, образующийся в области микроволнового пучка, — как средоточие множества такого рода "микровзрывных" образований.

С построенной в [5] физической моделью СНС-разряда хорошо согласуются результаты измерения зависимости скорости аксиального распространения факела и его газовой температуры от удельной энергии, выделяемой в разряде [7]. Однако оценка возможностей использования его в актуальных промышленных и экологических приложениях требует поиска дополнительных сведений о параметрах создаваемого подпороговым микроволновым пучком плазменного образования. Именно этой задаче посвящены описываемые в настоящей работе эксперименты по применению "теневой" фотографии, позволяющей подучить представление о характере газовых возмущений, сопровождающих СНС-разряд.

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ том 47 № 1 2021



**Рис. 3.** Схема постановки "теневой" фотографии СНС-разряда. *1* – лазер для настройки схемы; *2* – источник света; *3* – диафрагма; *4* – телескоп; *5* – СНС-разряд; *6* – собирающая линза; *7* – светофильтр; *8* – фотоаппарат.

## 3. СТРУКТУРА ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ, СОПРОВОЖДАЮЩИХ ФОРМИРОВАНИЕ СНС-РАЗРЯДА В ПОДПОРОГОВОМ МИКРОВОЛНОВОМ ПУЧКЕ

Схема эксперимента по определению газодинамических последствий, сопровождающих СНС-разряд в воздухе атмосферного давления, генерируемый пучком микроволнового излучения, приведена на рис. 1. Эксперимент выполнен на стенде ФАКЕЛ [8]. Для возбуждения разряда использовался гауссовский пучок, генерируемый гиротроном БОРЕЦ 75/08. Длина волны излучения  $\lambda = 4$  мм. Мощность излучения менялась от 130 до 300 кВт. Постановка эксперимента, изображенная на рис. 3, соответствует постановке, принятой в цикле работ по возбуждению и исследованию СНС-разряда [7–10].

Примененная для регистрации газовых возмущений "теневая" методика фотографирования, представленная на рис. 3, состоит из следующих компонентов. В качестве источника излучения, подсвечивающего разряд, используется ксеноновая лампа 2. Длительность импульса излучения лампы составляла ~5-6 мкс на полувысоте импульса и ~10 мкс на уровне 0.1 от максимального уровня излучения. Излучение лампы, проходя через диафрагму 3 диаметром 3 мм, направлялось в телескоп 4, на выходе из которого формируется параллельный пучок. Таким образом, исследуемый объект – СНС-разряд 5 – облучается плоско-параллельным пучком излучения ксеноновой лампы. Собирающая линза 6 формирует изображение исследуемого объекта, регистрируемое фотоаппаратом 8. Перед фотоаппаратом установлен фильтр 3С-10 с максимумом пропускания на длине волны  $\lambda_{\text{max}} = 550$  нм и полушириной 60 нм, обеспечивающий достаточную для диагностики монохроматичность. Электрическое поле микроволнового пучка параллельно оси наблюдения "теневой" фотографии. Размер области исследования составлял ~5 см. В эксперименте имелась



**Рис. 4.** "Теневая" фотография СНС-разряда. Фронт разряда на удалении 26 см от инициатора. P = 130 кВт;  $\tau_{mw} = 6.5$  мс. Момент съемки относительно переднего фронта СВЧ t = 4.7 мс.

возможность перемещать инициатор на различные расстояния от оси пучка излучения ксеноновой лампы так, чтобы в область фотографии попадала головная часть разряда, отстоящая от инициатора на расстояние ~26 см, и (или) разряд вблизи инициатора, когда он попадал в область, просвечиваемую пучком диагностирующего света.

Типичные теневые фотографии для различных мощностей микроволнового излучения 130, 250 и 300 кВт приведены на рис. 4-7. СНС-разряд является объемной структурой множества каналов. Теневая фотография разряда является проекцией на плоскость, в результате мы получаем картину перекрытия плазменных каналов между собой в виде мелкоячеистой структуры. Такая структура характерна для разряда как вблизи, так и вдали от инициатора. Вид структуры разряда не меняется при изменении мощности микроволнового излучения от 130 до 300 кВт. В то же время при высокой мощности 250 и 300 кВт перед разрядом видны ударные волны, распространяющиеся от разряда по невозмущенному газу, что не наблюдается при низкой мощности в 130 кВт.

Картина из тесно прижатых друг к другу ячеек может возникать в том случае, когда время образования ячейки значительно меньше времени экспозиции "теневого" кадра, составляющее порядка  $10^{-5}$  с.

После образования одной системы ячеек наступает пауза до начала возникновения следующего ряда. При скорости фронта  $V_z \approx 0.8 \times 10^4$  см/с скачок  $\Delta Z \approx \lambda/4 \approx 1$  мм происходит за время, большее времени экспозиции. При скоростях фронта  $V_z = 2.0 \times 10^4$  см/с и  $V_z = 3.1 \times 10^4$  см/с за время экспозиции происходит 2 и более скачков. Головная часть разряда (волны ионизации), как это видно из рис. 4–6, обладает плавной закругленностью формы с выпуклостью на оси вол-



**Рис. 5.** "Теневая" фотография СНС-разряда. Фронт разряда на удалении 26 см от инициатора. P = 250 кВт;  $\tau_{mw} = 3.5$  мс. Момент съемки относительно переднего фронта СВЧ t = 2.5 мс.



**Рис. 6.** "Теневая" фотография СНС-разряда. Фронт разряда на удалении 3 см от инициатора. P = 260 кВт;  $\tau_{mw} = 0.5$  мс. Момент съемки от переднего фронта СВЧ t = 0.18 мс.



**Рис. 7.** "Теневая" фотография СНС-разряда. Фронт разряда на удалении 26 см от инициатора. P = 300 кВт;  $\tau_{mw} = 2$  мс. Момент съемки от переднего фронта СВЧ t = 1.3 мс.

нового пучка. Средняя длина перемещения фронта разряда за время длительности светового диагностического импульса (время экспозиции) при мощности  $P_{mw} \approx 310$  кВт составляет  $\Delta Z \approx 3$  мм, т.е. больше интервала чередования вдоль оси разряда светлых и темных пятен на "теневых" фотографиях. Отсюда, по-видимому, также можно сделать заключение о том, что время формирования ячеек меньше длительности светового импульса на порядок величины, т.е.  $\tau_{cell} \cong 10^{-6}$  с.

## 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

Анализируя результаты, полученные с помощью "теневой" фотографии, отметим, прежде всего, что они находятся в соответствии с процессами, заложенными в физическую модель, построенную в [5, 6] и кратко представленную в разделах 1—3 настоящей статьи. Исследуемый разряд, возбуждаемый подпороговым пучком микроволнового излучения, представляет собой последовательность переходов от самоподдерживающегося микроволнового разряда к несамостоятельному с развитием сильно нелинейной стадии ионизационно-перегревной неустойчивости. Формируясь таким образом, ионизационная волна распространяется вдоль оси пучка навстречу микроволновому излучению.

Результаты предшествующих исследований СНС-разрядов [10, 15, 16] продемонстрировали, что в прифронтовой области в плазме, образующейся под действием разрядного УФ-излучения, возникают локальные микрообразования, в которых газ нагревается до (4000–7000) К за времена порядка нескольких мкс, а затем остывает за (20–30) мкс до температур порядка 1000 К, сохраняя их в течение (5–9) мс. Концентрация электронов в этих областях, возникающих на сильно нелинейной фазе неустойчивости прилегающего к фронту несамостоятельного микроволнового разряда, достигает величин  $n_e \approx (10^{16}-10^{17})$  см<sup>-3</sup> при электронной температуре  $T_e \leq 5$  эВ.

Процесс, происходящий в микрообластях на нелинейной стадии неустойчивости несамостоятельного микроволнового разряда, можно рассматривать как "микровзрыв", возникающий равно как в горючих, так и в негорючих газах.

Особенно важно отметить при этом тот факт, что "теневые" фотографии (рис. 4—7) отчетливо демонстрируют, что такие аномально высокотемпературные и высококонцентрированные микрообразования оказываются не единичными (или относительно редкими), а распределены по всему объему охваченного разрядом микроволнового пучка. Плотно прилегая друг к другу, области газовых микровозмущений занимают объем, в котором газ подвергается сильному тепловому воздействию, приводящему к деструкции молекул примеси.

Полученные в экспериментах с "теневой" фотографией результаты объясняют высокий уровень очищающего воздействия СНС-разряда на воздух, содержащий примесь меркаптана [17], сероводорода  $H_2S$  [18] и двуокиси серы  $SO_2$  [19]. Кроме того, следует отметить и высокую эффективность в экспериментах с разложением в СНСразряде углекислого газа  $CO_2$  [20].

Приведенная "теневая" фотография ионизационной волны, распространяющейся в сильно подпороговом микроволновом пучке от инициатора навстречу микроволновому излучению, убедительно свидетельствует — наряду с совокупностью полученных ранее диагностических данных — о том, что изучаемое плазменное образование является новым (не наблюдавшимся и не изученным ранее) видом газового плазменного образования, впервые описанным в работах [5, 6].

Есть основания рассчитывать на успешное применение СНС-разряда в широком круге плазменных и плазмохимических приложений. К числу особенностей, делающих его применение весьма перспективным, можно отнести следующие:

 возможность возбуждения под действием пучка микроволн в воздушной среде, в газах и газовых смесях атмосферного (и более высокого) давления без привлечения систем вакуумирования и требующих энергетических затрат инициаторов;

 – существование СНС-разряда в виде ионизационной волны, распространяющейся навстречу микроволновому излучению и захватывающей значительные объемы обрабатываемой газовой среды;

 возможность одновременного вывода (очистки) из обрабатываемого газа широкого круга экологически вредных примесей;

 одновременно с "химической" очисткой осуществление высокоэффективного обеззараживания обрабатываемой газовой среды;

 возможность возбуждения СНС-разряда как в замкнутых объемах, так и в свободном воздушном пространстве у поверхности Земли и на относительно больших расстояниях от нее.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе приведены результаты изучения газодинамических процессов, сопровождающих СНС-разряды в газах высокого давления, возбуждаемые существенно подпороговыми пучками микроволнового излучения. Продемонстрировано, что за фронтом волны ионизации возникает

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ том 47 № 1 2021

мелкоячеистая структура возмущений плотности газа. Совокупность ячеек на теневой фотографии является следствием перекрытия разрядных каналов, которые характеризуются высокой плотностью энерговыделения, достигающей 1 кДж/см<sup>3</sup>, а также высокой температурой газа ( $T_g \approx 4000-7000$  K) и концентрацией электронов ~ $10^{16}$  см<sup>-3</sup>.

Полученные результаты теневой фотографии подводят черту под экспериментами, определяющими физику формирования аксиальной ионизационной волны, получившей название самоподдерживающегося несамостоятельного (СНС) разряда. Модель основана на утверждении, что определяющую роль в динамике формирования описанного разряда играют последовательные переходы от самополдерживающейся фазы к фазе несамостоятельной с возбуждением ионизационно-перегревной неустойчивости, достигающей сильно нелинейной стадии. Модель формирования плазменного факела в сильно подпороговом пучке микроволнового излучения, заложенная авторами настоящей работы, близка реальным процессам возбуждения СНС-разряда.

Работа выполнена за счет средств Российского научного фонда (проект № 17-12-01352).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *St John Braithwaite N*. Introduction to gas discharges // Plasma Sources Sci. Technol. 2000. V. 9. P. 517.
- Komurasaki K., Tabata K. // Int. J. Aerospace Engineering. 2018. ID 9247 429.
- Nakamura Y., Komurasaki K., Fukunari M., Koizumi H. // J. Appl. Phys. 2018. V. 124. P. 033303.
- 4. Cook A.M., Hummelt J.S., Shapiro M.A., Temkin R.J. // Phys. Plasmas. 2011. V. 18. 100 704.
- Batanov G.M., Gritsinin S.I., Kossyi I.A., Magunov A.N., Silakov V.P., Tarasova N.M. // Transaction of FIAN. 1985. V. 160. P. 174.
- Kossyi I.A. // 41th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, USA, 2006. Report AIAA-2006-1457.
- Артемьев К.В., Батанов Г.М., Бережецкая Н.К., Борзосеков В.Д., Давыдов А.М., Колик Л.В., Кончеков Е.М., Коссый И.А., Петров А.Е., Сарксян К.А., Степахин В.Д., Харчев Н.К. // Физика плазмы. 2018. Т. 44. С. 1011. [Artem'ev K.V., Batanov G.M., Berezhetskaya N.K., Borzosekov V.D., Davydov A.M., Kolik L.V., Konchekov E.M., Kossyi I.A., Petrov A.E., Sarksyan K.A., Stepakhin V.D., Kharchev N.K. // Plasma Phys. Rep. 2018. V. 44. P. 1146]
- Artem'ev K.V., Batanov G.M., Berezhetskaya N.K., Davydov A.M., Kossyi I.A., Nefedov V.I., Sarksyan K.A., Kharchev N.K. // J. Phys. Conf. Ser. 2017. V. 907. 012022.
- Artem'ev K.V., Batanov G.M., Berezhetskaya N.K., Davydov A.M., Kossyi I.A., Nefedov V.I., Sarksyan K.A., Kharchev N.K. // Plasma Phys. Rep. 2018. V. 44. P. 615. [Only Eng.] Артемьев К.В., Батанов Г.М., Бережецкая Н.К., Давыдов А.М., Коссый И.А., Нефе-

*дов В.И., Сарксьян К.А., Харчев Н.К.* // Успехи прикладной физики. 2017. Т. 5. № 5. С.429.

- Батанов Г.М., Бережецкая Н.К., Давыдов А.М., Кончеков Е.М., Каторгин И.Н., Коссый И.А., Сарксян К.А., Степахин В.Д., Темчин С.М., Харчев Н.К. // Прикладная физика. 2017. № 5. С. 10.
- Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1987. [Raizer Yu.P. Gas Discharge Physics. Springer-Verlag, Berlin, 1991]
- Subthreshold Discharge Excited by Microwave Beam in the High-pressure Gases. Physics and Applications / Ed. by *I.A. Kossyi*. M.: Περο, 2019. [Publishing House "Pero", Moscow, 2019]
- Bogatov N.A., Brodsky Yu.Ya., Golubev S.V., Zorin V.G. // Proc. XVIII Int. Conf. Phenomena in Ionized Gases, Swansea, UK, 1987. P. 864.
- Ким А.В., Фрайман Г.М. // Физика плазмы. 1983. Т. 9. С. 613.
- 15. Аскарьян Г.А., Батанов Г.М., Быков Д.Ф., Коссый И.А. // Труды ИОФ РАН. 1994. Т. 47. С. 9.
- Artem'ev K.V., Batanov G.M., Berezhetskaya N.K., Davydov A.M., Kharchev N.K., Kolik L.V., Konchekov E.M., Kossyi I.A., Petrov A.E., Sarksyan K.A., Stepakhin V.D. // Proc. 46<sup>th</sup> EPS Conf. Plasma Physics, Milan, Italy, 2019. P4.3017.
  - http://osc.ciemat.es/EPS2019PAP/pdf/P4.3017.pdf
- 17. Артемьев К.В., Батанов Г.М., Бережецкая Н.К., Борзосеков В.Д., Давыдов А.М., Кожевникова Н.А.,

Кончеков Е.М., Коссый И.А., Сарксян К.А., Степахин В.Д., Сысоев С.О., Темчин С.М., Харчев Н.К. // Физика плазмы. 2019. Т. 45. С. 483. [Artem'ev K.V., Batanov G.M., Berezhetskaya N.K., Borzosekov V.D., Davydov A.M., Kozhevnikova N.A., Konchekov E.M., Kossyi I.A., Sarksyan K.A., Stepakhin V.D., Sysoev S.O., Temchin S.M., Kharchev N.K. // Plasma Phys. Rep. 2019. V. 45. P. 523]

- Давыдов А.М., Артемьев К.В., Батанов Г.М., Бережецкая Н.К., Борзосеков В.Д., Кожевникова Н.А., Коссый И.А., Сарксян К.А., Степахин В.Д., Сысоев С.О., Темчин С.М., Харчев Н.К. // XLV Международная Звенигородская конф. по физике плазмы и УТС, 2018. Сб. тез. доклад. М.: ЗАО НТЦ "ПЛАЗ-МАИОФАН", 2018. С. 225.
- 19. Артемьев К.В., Батанов Г.М., Бережецкая Н.К., Борзосеков В.Д., Давыдов А.М., Кожевникова Н.А., Коссый И.А., Сарксян К.А., Степахин В.Д., Сысоев С.О., Темчин С.М., Харчев Н.К. // XLV Международная Звенигородская конф. по физике плазмы и УТС, 2018. Сб.тез. доклад. М.: ЗАО НТЦ "ПЛАЗМАИОФАН", 2018. С. 226.
- Artem'ev K.V., Batanov G.M., Berezhetskaya N.K., Davydov A.M., Dvoenko A.V., Konchekov E.M., Kossyi I.A., Sarksyan K.A., Stepakhin V.D., Kharchev N.K. // 7<sup>th</sup> Central European Symposium on Plasma Chemistry, Sveti Martinna Muri, Croatia, 2017. Scientific Program and Book of Abstracts. P. 86.