

УДК 533, 533.9

ИНИЦИИРУЕМЫЙ ПОЛУВОЛНОВОЙ АНТЕННОЙ СВЧ-РАЗРЯД В ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ПОТОКАХ

© 2024 г. К. Н. Корнев^{a,*}, А. А. Логунов^a, О. С. Сурконт^a, Т. Р. Абушаев^a, А. Л. Волюнец^a,
С. А. Двинин^{a,b,**}

^a МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

^b Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

* e-mail: singuliarnost@yandex.ru

** e-mail: s_dvinin@mail.ru

Поступила в редакцию 28.11.2023 г.

После доработки 21.01.2024 г.

Принята к публикации 22.01.2024 г.

Исследован СВЧ-разряд в высокоскоростных 150–250 м/с воздушных потоках, создаваемый на полуволновом вибраторе. Для создания СВЧ-разряда использовался магнетронный СВЧ-генератор частотой 2.45 ГГц непрерывного действия мощностью до 5 кВт. С помощью высокоскоростной видеосъемки разряда изучена его структура, определены диаметр и длина плазменного канала в зависимости от скорости и давления в потоке. По полученным оптическим спектрам определена концентрация и температура электронов, характерная газовая температура. Экспериментально показана возможность использования такого СВЧ-разряда для воспламенения углеводородно-воздушных смесей в камерах сгорания прямоточных двигателей.

Ключевые слова: высокоскоростной газовый поток, СВЧ-разряд, низкотемпературная плазма

DOI: 10.31857/S0367292124030093, EDN: RFUOTW

1. ВВЕДЕНИЕ

Низкотемпературная газоразрядная плазма широко используется в научных исследованиях и различных технологических приложениях. Разряды в газовых потоках исследуют на протяжении многих лет в рамках задач плазменной аэродинамики [1].

Плазма газовых разрядов может обеспечить широкий диапазон термодинамических условий в зависимости от применяемого разряда, одной из разновидностей которого являются разряды СВЧ-диапазона. СВЧ-разряды изучаются достаточно давно и известно много способов их реализации [2].

При фокусировке квазиоптического СВЧ-пучка с помощью зеркал или линз создается свободно локализованный СВЧ-разряд, представленный, например в работе [3]. Был также изучен уникальный по своим свойствам поверхностный СВЧ-разряд [4], который создается поверхностной волной на диэлектрической антенне, обтекаемой сверхзвуковым потоком воздуха. В плазме импульсного СВЧ-разряда возможно осуществлять различные химические процессы, например катализ разложения метана [5]. Взаимодействие СВЧ-разряда с разрядами других

типов (комбинированные разряды) рассматривалось в работе [6].

В непрерывном режиме для создания СВЧ-разрядов используют магнетроны с мощностью в несколько киловатт. Такие мощности обычно недостаточны для реализации разряда без инициаторов, обеспечивающих увеличение СВЧ-поля в локальных областях пространства, где и происходит пробой.

Быстрый нагрев газа после пробоя может происходить за микросекундное время и обеспечивает существование стационарного разряда в нагретом газе. Дальнейшее развитие разряда определяется конфигурацией инициатора, в качестве которого могут быть использованы металлические объекты в форме шара, стержня, кольца, спирали и др., а также зависит от рода и давления газа.

Пространственная конфигурация плазмы и ее эволюция также зависят от того, где возбуждается разряд — в покоящемся газе, дозвуковом или сверхзвуковом течении, а также от формы инициатора и его расположения относительно скорости течения.

Различные типы таких разрядов изучали В. М. Шибков, В. Г. Бровкин и Ю. Ф. Колесниченко,

а также К. В. Ходатаев и Л. П. Грачев в МРТИ РАН [7—10]. В этих работах исследован стримерный подкритический СВЧ-разряд, диапазоны его существования и этапы развития. С его помощью осуществлено воспламенение высокоскоростного газового потока. Тем не менее систематическое исследование различных форм подкритического разряда в сверхзвуковом потоке газа в настоящий момент отсутствует.

Основными целями работы являются изучение инициируемого полуволновой антенной СВЧ-разряда в высокоскоростных воздушных и пропан-воздушных потоках и исследование основных параметров создаваемой им плазмы. В качестве инициатора использован полуволновой вибратор, расположенный параллельно вектору напряженности электрического поля в СВЧ-волне, генерируемой магнетроном. Скорость газа при выбранном способе реализации потока параллельна вибратору, обеспечивая минимальное возмущение потока и эффективный вынос плазмы, генерируемой в разряде вдоль потока. Это должно обеспечить наибольшее вытягивание разряда вдоль потока и наиболее устойчивый его поджиг.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Эксперименты проводились на стенде, позволяющем изучать воздействие разрядов на высокоскоростные газовые потоки (рис. 1). Поток создавался при пропускании воздуха из предварительно накачиваемого ресивера высокого давления 10 через сопло Лавала 6 в аэродинамический канал из оргстекла с вмонтированным внутри инициатором разряда 2. Выходное сечение канала в этих экспериментах не откачивалось, и давление было равно атмосферному. С помощью смесителя 7 в поток дополнительно мог инжектироваться пропан из баллона 9. Поток подавался с помощью электронно-управляемых клапанов 8 по команде управляющего устройства.

СВЧ-разряд создавали с помощью магнетронного генератора 4 частотой 2.45 ГГц непрерывного действия мощностью до 5кВт. Энергия от генератора подводилась к разряду по волноводному тракту стандартного сечения 90×45 мм. Возбуждалась основная мода волновода H_{10} . Включенный в тракт циркулятор 3

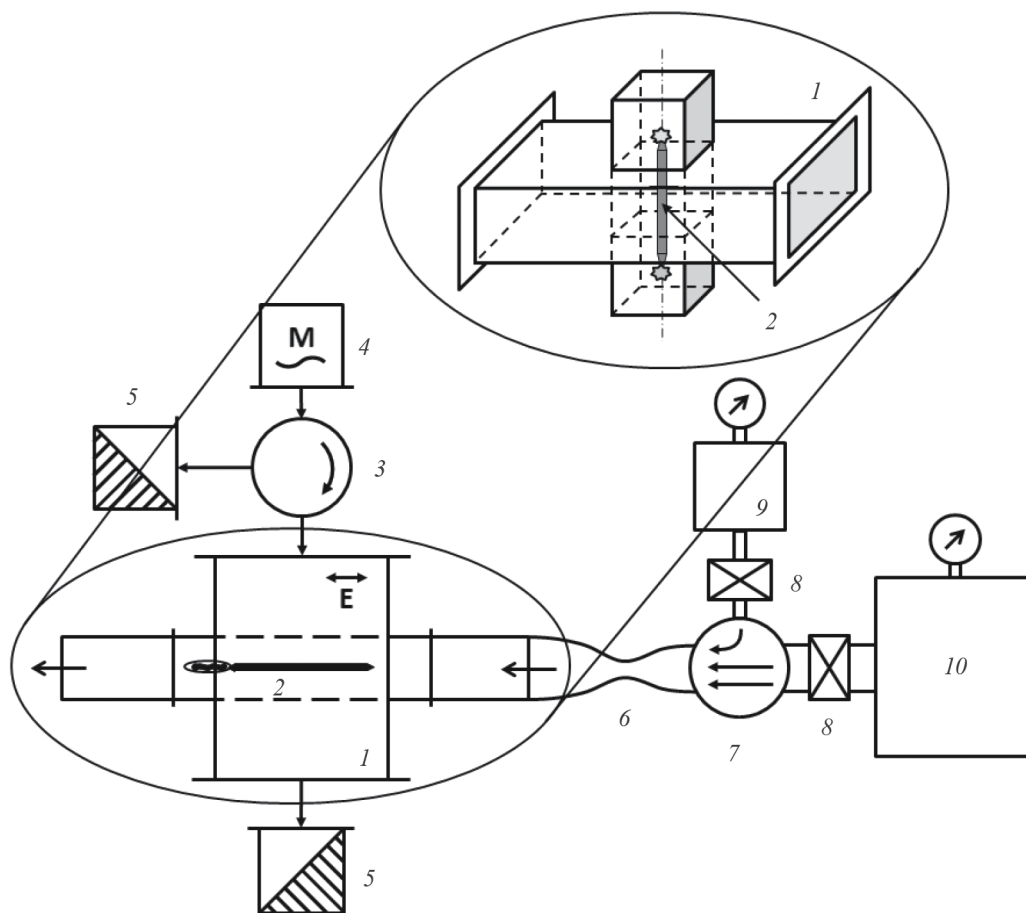


Рис. 1. Схема экспериментальной установки по изучению инициируемого СВЧ-разряда.

с подключаемой к нему водяной нагрузкой 5 обеспечивал защиту генератора от отраженной волны.

Разряд инициировали на концах полуволнового металлического стержня, который помещался в поле СВЧ-волны параллельно вектору напряженности E на специальном алюминиевом держателе. Аэродинамический канал ориентирован перпендикулярно широкой стенке волновода тестовой секции 1, т.е. поток, инициатор и напряженность поля параллельны друг другу. Плоскость держателя параллельна фланцам волновода.

Газовый поток вводился в волновод через запрельные ответвления, устранявшие потери СВЧ-мощности по оси канала. Стержень на концах заточен с характерным радиусом r острия $0.05 \div 0.1$ мм. Усиление электрического поля вблизи острия позволяет зажечь разряд при атмосферном давлении даже в относительно слабом поле ($E \sim 400$ В/см). Далее плазма сносится газовым потоком, и разряд имеет форму вытянутого вдоль потока плазменного канала. В экспериментах использовались стержни из вольфрама и меди.

Инициатор и его держатель, как уже указывалось, сделаны таким образом, чтобы минимизировать их влияние на газовый поток: диаметр стержня 1–1.5 мм, толщина держателя 1 мм, а на переднем и задних краях держателя сделаны глубокие фаски для их заострения.

Проведенное предварительно трехмерное моделирование движения воздуха в канале показало, что за инициатором наблюдается низкоскоростная зона течения, которая может стабилизировать возникающий разряд. Поле числа Маха в воздушном потоке возле инициатора в отсутствие разряда показано на рис. 2. Расчет проводился при давлении в ресивере 4 атм и атмосферном давлении на выходном сечении канала.

На боковых стенках и поверхностях электродов выполнялось условие прилипания потока. Размер ячейки расчетной сетки составлял 0.025 мм в области основного потока и уменьшался при приближении к неподвижным поверхностям. Толщина пограничного слоя $\delta \approx 5 \sqrt{\frac{\mu l}{\rho U}}$, где μ — динамическая вязкость газа, l — характерный размер обтекаемого тела, ρ — плотность газа, а U — скорость газового потока, согласно оценкам, составляла величину около $0.05 \div 0.3$ мм, соизмеримую с размером ячейки.

Исходя из результатов расчета, можно предположить, что первоначальный пробой происходит в пограничном слое, в котором газ почти неподвижен. Далее из области пробоя должен прорасти канал преимущественно вдоль направления электрического поля [11].

Простые модели развития канала [12–16] не применимы к нашему разряду, так как не учитывают гидродинамического течения газа. Изменение скорости движения газа (от нуля в пограничном слое до сверхзвуковой в течении) должно приводить к особенности в распределении скорости ионизации, аналогичной полученной в работе [17]. Там особенность наблюдали в точке, где скорость течения газа равна скорости дрейфа ионов, а в рассматриваемом случае СВЧ-разряда должна иметь место при равенстве скорости распространения фронта ионизации и скорости течения газа.

Поскольку в настоящее время известны различные механизмы распространения фронта [18–24], актуально измерение параметров плазмы в разрядном канале, так как без их знания невозможно количественное объяснение процессов в разряде. Решению этой задачи и посвящена данная работа.

Исследуемый разряд создается в воздухе или его смесях с углеводородами, и поэтому активно излучает в ближнем УФ- и видимом диапазонах. Температура определяли по сопоставлению экспериментально

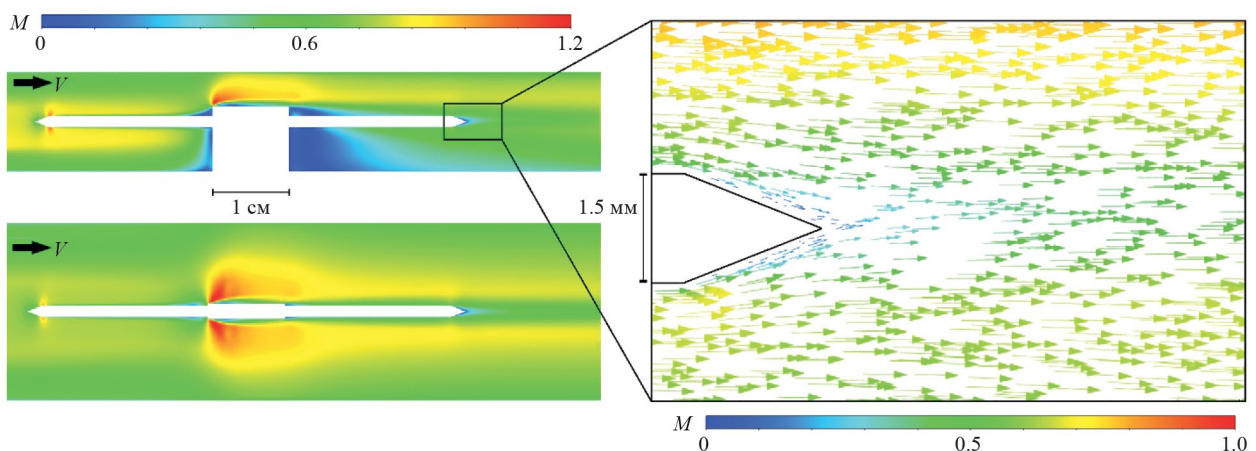


Рис. 2. Поле числа Маха в воздушном потоке возле инициатора без разряда. Давление p_0 в ресивере 4 атм, давление на выходном сечении канала 1 атм.

получаемых и рассчитываемых в программах спектров разряда в диапазонах, где наблюдаются молекулярные полосы N_2 , N_2^+ , NH , CN .

Из большого количества программ моделирования спектров двухатомных молекул (Specair [25], LIFBASE [26], Spartan [27]) нами преимущественно использовалась программа Specair. Недостаток данного метода — необходимость учета изменения спектральной чувствительности спектрометра с длиной волны, поскольку молекулярные полосы занимают относительно большой спектральный диапазон. Чувствительность спектрометра определялась во всем используемом спектральном диапазоне при сравнении спектров эталонной ленточной вольфрамовой лампы с известной яркостной температурой (ТРШ 2850—3000), и теоретического рассчитываемого теплового спектра для данных температур.

Второй недостаток метода — часто наблюдаемое наложение молекулярных полос и атомарных линий друг на друга в спектрах. В такой ситуации отношение концентраций накладывающихся компонент плазмы подбиралось в программе вручную, что приводит, в совокупности с и так большим числом параметров моделируемого спектра, к возрастанию погрешности.

Оптические спектры излучения разряда измеряли с помощью шестиканального спектрометра Ocean Optics S2000TR. Время экспозиции изменяли в пределах 3—3000 мс, в зависимости от яркости разряда в выбранной точке, что существенно дольше характерных времен развития разряда и газодинамического времени, поэтому полученные спектры являются усредненными по времени и не описывают динамику развития разряда.

Определение концентрации электронов в плазме разрядов в высокоскоростном воздушном потоке производилось по измерению уширения Штарка линии водорода H_β серии Бальмера ($\lambda_{H_\beta} = 486.1$ нм).

Метод широко известен в диагностике плазмы. Величина аппаратной функции $\Delta\lambda_g$ спектрометра определялась по ширине линий неона в свечении неоновой лампы. Для канала, охватывающего линию H_β , она составила 0.35 нм, а для канала, охватывающего линию H_α , — 0.6 нм.

Наблюдаемый в экспериментах с разрядом контур линий водорода представляет собой свертку лоренцевского и гауссовского профилей, описываемой функцией Фойгта. Используя аппроксимацию [28], из полного уширения линии возможно выделить лоренцевскую компоненту $\Delta\lambda_s$, отвечающую штарковскому уширению, если известны экспериментально определенная ширина $\Delta\lambda$ и аппаратная функция спектрометра $\Delta\lambda_g$.

В работе доплеровское уширение и уширение давлением не учитывали, так как в данных условиях они достаточно малы. Далее выделенное уширение

Штарка пересчитывали в концентрацию электронов, используя известные выражения зависимости концентрации электронов n_e от штарковской полуширины $\Delta\lambda_s$ профиля линии, которые, например, приведены в справочнике Касабова и Елисеева [29]. Для водородной линии H_β : $n_e = 10^{13} (\Delta\lambda_s)^{3/2} [C_0(T) + C_1(T) \ln \Delta\lambda_s] \text{ см}^{-3}$. В справочнике авторы приводят значения используемых коэффициентов для нескольких характерных условий.

Необходимо отметить, что расчёт концентрации n_e по аналогичному выражению для линии H_α приводит к значительному и регулярному завышению результатов в сравнении с H_β . При этом характер изменения электронной концентрации для линий H_β и H_α вдоль оси потока совпадает. Отчасти систематическое превышение электронной концентрации, рассчитанной по ширине линии H_α , можно объяснить слабой реабсорбцией излучения этой линии. Также за это превышение может быть ответственен механизм уширения линии электронным ударом [30]. Ударное уширение сильно зависит от температуры, а поскольку температура электронов заранее неизвестна, в работе концентрация электронов определялась только по уширению линии H_β .

Один из традиционных в диагностике низкотемпературной плазмы экспериментальных методов определения температуры электронов — метод относительных интенсивностей атомных линий [31]. Если заселенность уровней возбужденных атомов в состоянии ЛТР описывается формулой Больцмана, то отношение интенсивностей двух линий одного элемента в таком случае выражается как

$$\frac{I_{mn}}{I_{pq}} = \frac{A_{mn} \omega_{mn} g_m}{A_{pq} \omega_{pq} g_p} e^{\frac{E_p - E_m}{kT}}.$$

Однако интенсивные радиационные переходы для достаточно глуболежащих энергетических уровней атома приводят к искажению распределения заселенностей и отклонению от равновесного. В частности, для этих возбужденных состояний частота заселения и расселения электронным ударом должна быть существенно выше частоты радиационных переходов. Поскольку интенсивность радиационных переходов падает с уменьшением энергии связи, а сечение ударных процессов напротив растет, можно провести условную энергетическую границу, определяющую области, в которой доминируют либо ударные процессы, либо радиационные [32]

$$E_R = \left(\frac{n_e}{4.5 \cdot 10^{13}} \right)^{1/4} T_e^{-1/8}.$$

При энергии связи $E_b < E_R$ в заселении и расселении уровня преобладают ударные процессы, и они слабо искажаются радиационными переходами.

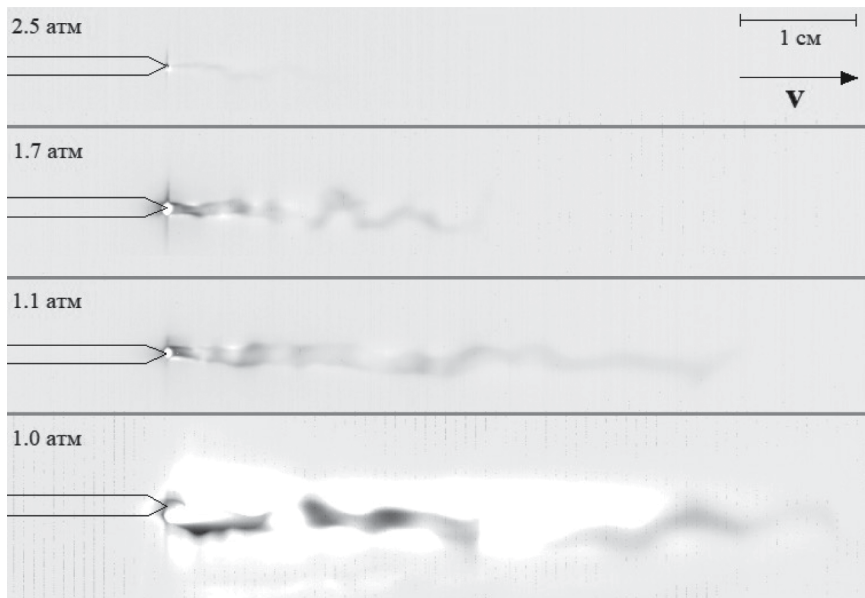


Рис. 3. Сборка кадров видеосъемки СВЧ-разряда при различных давлениях в потоке p_{flow} . Экспозиция 2 мкс. Фото- снимки инвертированы по яркости.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Скоростная видеосъемка разряда в воздушном потоке показала зависимость средних длины l и толщины d плазменного канала от давления в потоке p_{flow} . На рис. 3 представлена сборка четырех кадров видеосъемки при различных давлениях p_{flow} .

Воздушный поток направлен слева направо, вектор поля E параллелен потоку. Белыми линиями на каждом кадре слева выделен инициатор. Масштаб изображения помещен в правом верхнем углу (экспозиция 2 мкс). Рост давления приводит к уменьшению длины и толщины канала.

Падающая мощность поддерживалась постоянной на уровне 5 кВт. Скорость потока при этом изменялась слабо, поскольку при атмосферном давлении на выходном сечении канала происходит нерасчетное истечение, сверхзвуковой поток запирается вблизи сопла, и в аэродинамическом канале поддерживается дозвуковое течение со скоростью $200 \div 250$ м/с, слабо зависящей от давления в ресивере p_0 .

Давление в ресивере при этом только устанавливает давление в потоке вблизи разряда. Измеренные зависимости длины и толщины СВЧ-разряда, давления и скорости в потоке от давления в ресивере представлены на рис. 4.

С ростом давления длина l и толщина d разрядного канала падают с 5.5 до 2 см и с 2 до 0.3 мм соответственно. Поскольку падающая СВЧ-мощность, а значит, и величина поля E оставались постоянными, но при этом изменялось давление в потоке, то ука-

занные зависимости можно объяснить изменением приведенного поля E/N .

Замечено, что при высоком давлении в ресивере $p_0 = 4$ атм, а значит, и высоком давлении в потоке $p_{flow} = 2.5$ атм пробой возникает при мощности СВЧ-генератора 4 кВт и более, а при низком давлении в ресивере $p_0 = 1.4$ атм (давление в потоке $p_{flow} = 1$ атм) удавалось инициировать разряд при мощности 1.8 кВт. Точное определение порогов пробоя в данном эксперименте

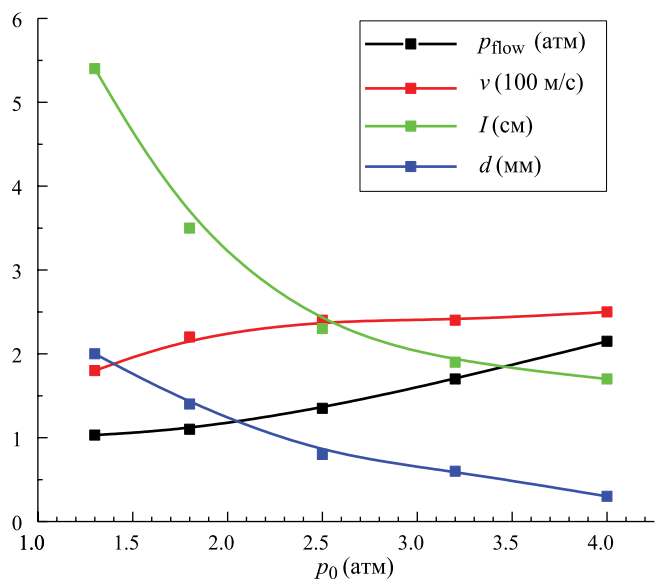


Рис. 4. Зависимости давления в потоке p_{flow} , его скорости v , длины l и диаметра d СВЧ-стримера от давления p_0 в ресивере высокого давления воздуха.

не проводилось, поскольку это осложнено рядом причин.

Во-первых, генератор имеет в схеме встроенный дроссель, из-за которого он выходит на стационарный режим около 1 с, в то время как длительность эксперимента 3–4 с.

Во-вторых, трудности контроля за радиусом острия инициатора приводят к большому разбросу коэффициента геометрического усиления поля, а соответственно, и величины порога пробоя.

Стоит отметить, что проводящий канал СВЧ-разряда с длиной, сравнимой с $\lambda/2$ и особенно большой при низких давлениях в потоке, играет роль продолжения металлического инициатора, эффективно увеличивая его длину и искажая распределение СВЧ-поля. Поскольку разряд развивается только на заднем по потоку острие стержня, систему «стержень и плазменный канал» можно рассматривать как несимметричный вибратор. Однако точное описание такой системы будет зависеть от свойств плазмы СВЧ-разряда, его формы и длины и требует отдельного исследования, как экспериментального, так и расчетного.

Скорость распространения фронта СВЧ-разряда может быть оценена с помощью эмпирического выражения [8]

$$V_{fr} = \left(1 / \sqrt{3}\right) \left(3 \cdot 10^4 \sqrt{p} + 1.7 \cdot 10^{-2} E_0 p \lambda\right), \text{ см/с.}$$

При давлении p_{flow} около 10^3 Торр, поле E_0 около 400 В/см, $\lambda = 12.2$ см скорость фронта составляет $V_{fr} \sim 6 \cdot 10^5$ см/с, в то время как скорость потока $v = 2 \cdot 10^4$ см/с, поэтому СВЧ-разряд развивается в практически неподвижном газе, и высокоскоростной поток не должен оказывать существенного влияния на возможность развития разряда. При минимально возможной экспозиции видеокамеры 2 мкс зафиксировать развитие СВЧ-стримера не удавалось.

Согласно [9] развитие СВЧ-разряда определяется степенью его подкритичности $\Psi = E_{cr}/E_0$, где E_0 — напряженность поля в разрядной области, а $E_{cr} = 40p$ — величина критического поля, где p — давление воздуха в единицах Торр. В проведенной серии экспериментов $\Psi = 100 \div 200$, что говорит о глубокой подкритичности разряда и о том, что в данных условиях он должен существовать только в форме привязанной к инициатору, что подтверждается проведенной видеосъемкой.

На рис. 5 приведена определенная указанным в разд. 2 методом концентрация электронов n_e в зависимости от осевого расстояния z от заднего по потоку острия инициатора при давлении ресивера $p_0 = 4$ атм. Значения $n_e \sim (1 \div 2) \cdot 10^{15}$ см $^{-3}$ до значения $z = 20$ мм остаются постоянными, а при $z > 20$ мм уменьшаются на порядок. В этих условиях длина

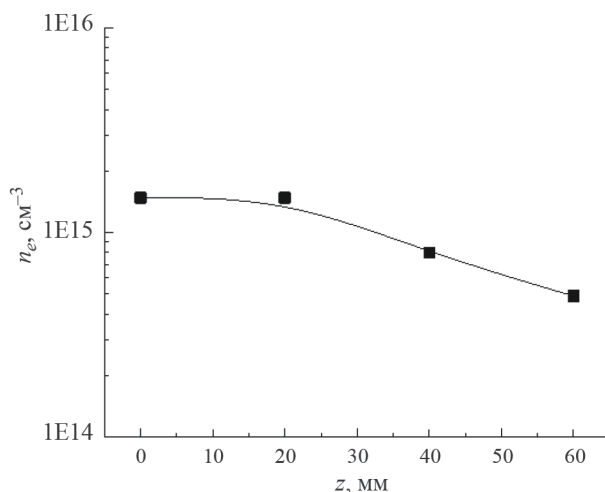


Рис. 5. Зависимость концентрации электронов n_e от расстояния вдоль оси потока z .

разряда составляет 20 мм, а значит, в пределах канала концентрация приблизительно постоянная.

После $z = 20$ мм наблюдается деионизация плазмы в потоке, интенсивность свечения при этом сильно уменьшается. Измеренные концентрации n_e согласуются с полученными в [33, 34]. При высокой частоте столкновений для данных давлений достаточно большие времена свечения плазмы можно объяснить, например проникновением СВЧ-поля в плазму, а также большими концентрациями метастабильных и колебательно-возбужденных частиц в плазме, однако их измерения требуют дополнительного исследования.

На оптическом спектре излучения разряда в воздухе наблюдаются интенсивные молекулярные полосы N_2 , N_2^+ , NH, CN, NO. Вращательная структура — неразрешенная. Наблюдаемые полосы NH, CN могли появляться по различным причинам. Поскольку это интенсивные оптические переходы, то даже небольших, примесных количеств углеводородных веществ в воздушном потоке могло быть достаточно для их наблюдения в спектрах разряда в воздухе. Источниками следов углеводородов могли послужить продукты абляции остатков лакового покрытия на медных инициаторах. Также слабыми источниками углерода и водорода могли быть углекислый газ и водяные пары в воздухе.

Аппроксимацией экспериментальных спектров определены вращательная температура T_r и колебательная температура T_v газа, а также относительные концентрации N_2 и N_2^+ . Поскольку RT-релаксация происходит за время порядка одного столкновения, много меньшее, чем время пребывания газа в разряде (порядка 100 мкс), принимаются равными газовая и вращательная температуры. Они определялись по всем наблюдаемым полосам, в том числе и полосам NH, CN.

В пределах погрешности ~ 400 К получаемые для разных молекулярных полос температуры совпадали. На рис. 6 показан спектр СВЧ-разряда в воздухе в диапазоне 340—360 нм, экспериментально полученный при $z = 20$ мм и $p_0 = 4$ атм (красная линия), и его аппроксимация (черная линия). Приблизительное равенство газовой и электронной температур ($T_e \approx T_r \approx 5500$ К) говорит о том, что плазма СВЧ-разряда находится в состоянии близком к равновесному.

Схожий результат получен в работе [35]. Однако наблюдаются повышенные значения колебательной температуры по сравнению с электронной: T_v больше $T_e \approx T_r$ на 3000 К. Это можно интерпретировать так,

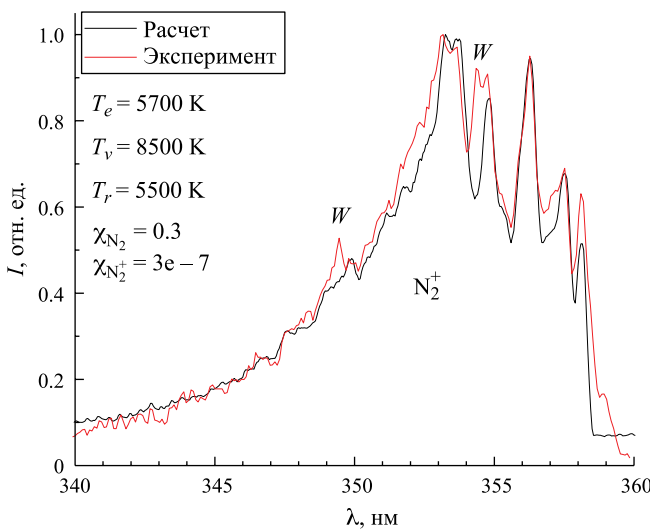


Рис. 6. Спектр СВЧ-разряда в воздухе в диапазоне 340—360 нм, экспериментально полученный при $z = 20$ мм, $p_0 = 4$ атм (красный), и его аппроксимация (черный). Экспозиция 20 мс.

что колебательное возбуждение происходит близко к острию в области пробоя, где температура электронов выше. Затем достигнутая высокая колебательная температура в потоке «замораживается».

В отличие от работы [35] поток имеет намного большие скорости. При $v \sim 200$ м/с и длине разряда около нескольких сантиметров характерное время пребывания в разряде составляет 0.1 мс, что сопоставимо с временем VT-релаксации при $T \sim 5000$ К. В этом диапазоне температур и давлений при концентрации электронов $n_e \sim 10^{15}$ см $^{-3}$ степень ионизации α составляет 10^{-3} . По отношению концентраций N_2^+ и N_2 можно сделать оценку степени ионизации азота $\alpha_{N_2} \sim 10^{-6}$.

Несогласованность этих значений говорит о том, что в условиях разряда ион N_2^+ является неосновным.

Согласно работе [36], в СВЧ-разрядах ион азота может преобразовываться в атомарную форму и участвовать в дальнейших плазмохимических реакциях, а также в разрядах могут нарабатываться значительные количества оксидов азота.

Как и в работе [37], в спектрах наблюдаются интенсивные линии атомарного кислорода O (777.4 нм) и молекулярная полоса NO(γ). Выяснение того, какой ион в СВЧ-разряде являлся основным, в данной работе не ставилось целью. Независимо получена оценка температуры электронов $T_e = 0,45 \div 0,55$ эВ по относительным интенсивностям линий меди. Для расчетов были использованы 5 линий меди $\lambda = 510.5, 515.3, 521.8, 570.0, 578.2$ нм, значения радиационных констант были взяты из работы [38].

При более низком давлении в потоке наблюдается более интенсивное свечение разряда. На рис. 7 представлены спектры СВЧ-разряда в воздухе в диапазоне 320—470 нм, экспериментально полученные при $z = 20$ мм и $p_0 = 2$ атм (вверху) и $p_0 = 1.5$ атм

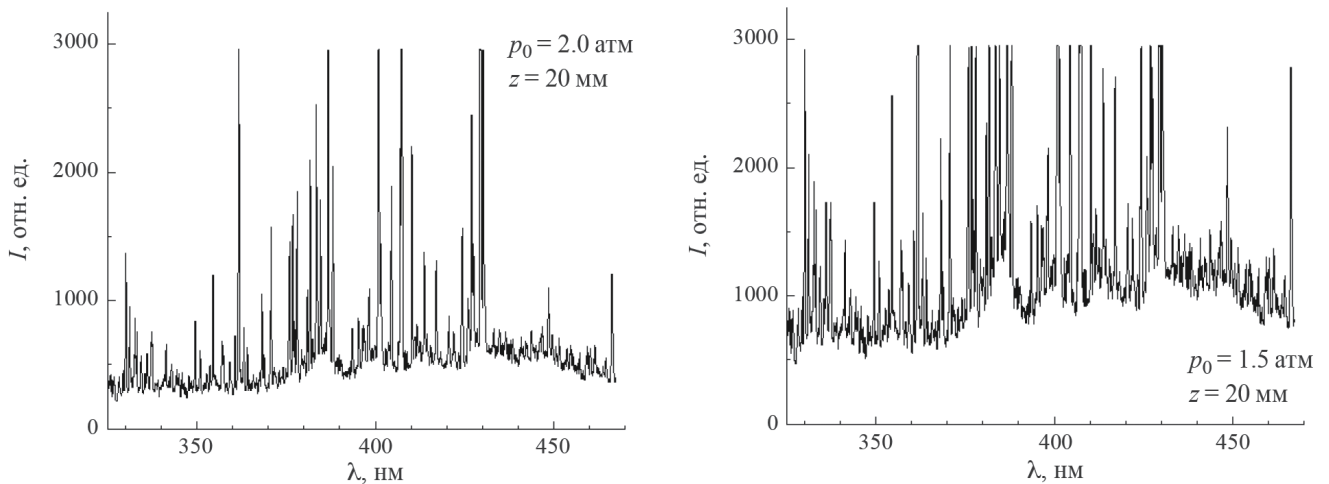


Рис. 7. Спектры СВЧ-разряда в воздухе в диапазоне 325—470 нм, экспериментально полученные при $z = 20$ мм и $p_0 = 2$ атм (вверху) и $p_0 = 1.5$ атм (внизу). Экспозиция в обоих спектрах 5 мс.

(внизу). Экспозиция спектрометра в обоих спектрах одинаковая и составляет 5 мс. Молекулярные полосы выражены слабее, также наблюдаются интенсивный континуум и линии атомов материала инициатора. На уровне ≈ 3000 отн. ед. интенсивность сигнала велика и спектры перегружены. В случае термодинамического равновесия интенсивность континуума дается выражением [31]

$$\varepsilon_{v,c} = \varepsilon_v^{ff} + \varepsilon_v^{bf} = C n_e n_Z \frac{Z^2}{T_e^{1/2}}.$$

Большая его интенсивность может говорить о более высокой концентрации электронов или более низкой их температуре. Такое предположение сходится с наблюдаемым в эксперименте ослаблением линии H_β водорода.

При инъекции в воздушный поток пропана СВЧ-разряд воспламеняет его. Фотография воспламененного пропан-воздушного потока представлена на рис. 8. Были сняты оптические спектры разряда в обедненном потоке при $z = 40$ мм и $p_0 = 3$ атм и концентрации пропана в потоке 2.5% масс., которая соответствует эквивалентному отношению $\Phi = 0.42$.

Эквивалентное отношение Φ определялось как отношение концентрации топлива в потоке (по массе) к стехиометрической концентрации, то есть при значении эквивалентного отношения $\Phi < 1$ — бедная топливом смесь, а $\Phi > 1$ — богатая. На спектрах (см. рис. 7) при инъекции пропана наблюдаются интенсивные молекулярные полосы $OH(A-X)$ и $CN(A-X)$ — маркеры горения углеводородов, а также “фиолетовая” система $CN(B-X)$.

Длина разряда в данных условиях менее 4 см, поэтому на спектре наблюдается в основном свечение воспламененного потока: молекулярные полосы

азота и его иона выражены слабо. При этом не наблюдаются полосы Свана C_2 и образование сажи. Также в спектре сильно снижается интенсивность линий атомарного кислорода O (777.4 нм), что можно объяснить участием его в реакциях окисления.

Поскольку изучаемый разряд сильно неоднороден, любые его спектральные исследования должны проводиться с минимально возможным временем экспозиции и при сборе света из одной точки в пространстве (системой линз), что не всегда было возможно в эксперименте и могло влиять на погрешность получаемых результатов.

При цилиндрической симметрии разряда для учета радиального распределения возможно использовать преобразование Абея, но это достаточно трудная задача, и в данной работе не решалась. Нерегулярность разряда (например, воздействие турбулентностей в потоке) также приводит к снижению повторяемости результатов.

Преимуществом данной реализации СВЧ-разряда является возможность его инициирования и поддержания с помощью дешевых и доступных магнетронов киловаттной мощности в непрерывном режиме. Ее недостаток заключается в необходимости после каждого запуска затачивать концы инициатора, поскольку под действием высокой температуры и потока происходит их разрушение в результате абляции.

Кроме того, после нескольких экспериментов приходится полностью заменять инициатор, поскольку при укорочении до длины менее 55 мм он выходит из резонансной области, и пробоя не происходит. Одно из возможных решений проблемы — инициировать разряд с помощью импульса высокого напряжения,

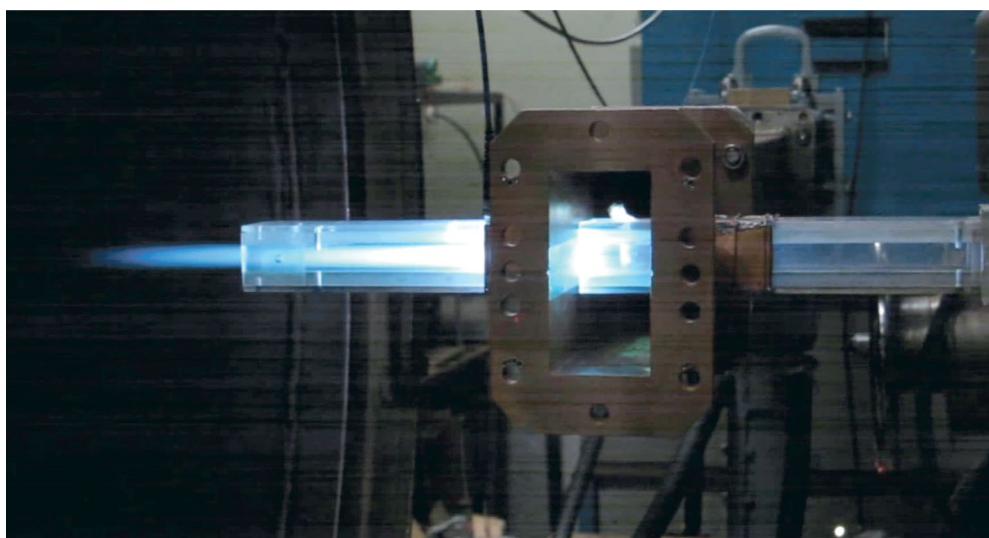


Рис. 8. Воспламененный СВЧ-разрядом пропан-воздушный поток (направлен справа налево). Скорость потока 200 м/с, эквивалентное отношение $\Phi = 0.42$.

искрового разряда или использовать магнетрон с мощностью 10–20 кВт. Необходимости в малом радиусе острия не будет, и СВЧ-разряд можно будет инициировать повторно. А при использовании стержня большего диаметра порядка нескольких миллиметров укорочение не будет столь быстрым.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследован глубоко подкритический СВЧ-разряд в высокоскоростных 150–250 м/с воздушных потоках, создаваемый на полуволновом вибраторе с помощью магнетронного СВЧ-генератора частотой 2.45 ГГц непрерывного действия мощностью до 5 кВт. С помощью высокоскоростной видеосъемки разряда изучена структура, определены диаметр и длина плазменного канала стационарного разряда в зависимости от скорости и давления в потоке.

Зависимости диаметра и длины разряда от давления объясняются различными значениями E/N . При этом зафиксировано изменение порога пробоя, но точное их определение затруднено из-за разброса радиуса острия инициатора. Начальные стадии развития СВЧ-стримеров с имеющимся оборудованием при видеосъемке зафиксированы не были. По полученным оптическим спектрам определена концентрация электронов $n_e \sim (1 \div 2) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, колебательная и вращательная температуры газа $T_v \approx 8500 \text{ К}$, $T_r \approx 5500 \text{ К}$. Степень ионизации α при этом достаточно высока и составляет 10^{-3} .

Экспериментально показана возможность использования такого СВЧ-разряда для воспламенения топливно-воздушных смесей в камерах сгорания прямоточных двигателей. На оптических спектрах при инъекции пропана наблюдаются интенсивные

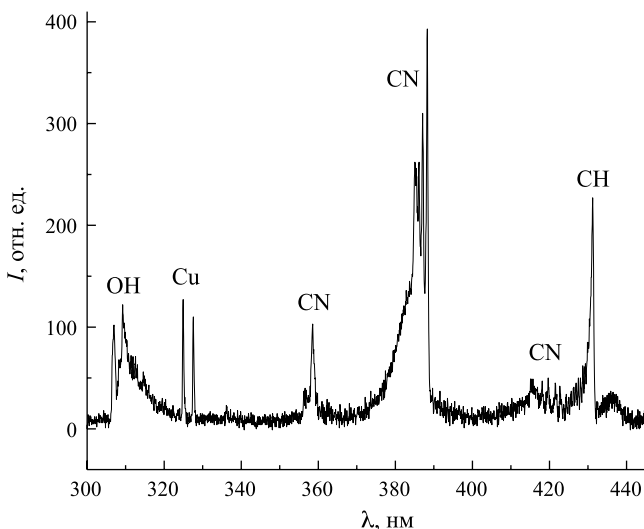


Рис. 9. Спектр СВЧ-разряда при инъекции пропана в диапазоне 300–440 нм, экспериментально полученный при $z = 40 \text{ мм}$, $p_0 = 3 \text{ атм}$ и $\Phi = 0.42$. Экспозиция 100 мс.

молекулярные полосы $\text{OH}(A-X)$ и $\text{CH}(A-X)$, а также “фиолетовая” система $\text{CN}(B-X)$. При этом не наблюдаются полосы Свана C_2 и образование сажи. Сильно снижается также интенсивность линий атомарного кислорода O (777.4 нм), что объясняется участием его в реакциях окисления пропана.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Корнев К.Н. является стипендиатом Фонда развития теоретической физики и математики «БАЗИС» и благодарит учреждение за финансовую поддержку. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-22-00233, <https://rscf.ru/project/23-22-00233/>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Leonov S. B. // *Energies* 2018. V. 11. P. 1733. <https://doi.org/10.3390/en11071733>
2. Lebedev Yu. A. // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2015. V. 24. P. 053001. <https://doi.org/10.1088/0963-0252/24/5/053001>
3. Зарин А. С., Кузовников А. А., Шибков В. М. Свободно локализованный СВЧ-разряд в воздухе. М.: Нефть и газ, 1996. 204 с.
4. Шибков В. М., Двинин С. А., Ершов А. П., Константиновский Р. С., Сурконт О. С., Черников В. А., Шибкова Л. В. // *Физика плазмы*. 2007. Т. 33. № 1. С. 77.
5. Бабарицкий А. И., Герасимов Е. Н., Демкин С. А., Животов В. К., Книжник А. А., Потанкин Б. В., Русанов В. Д., Рязанцев Е. И., Смирнов Р. В., Шолин Г. В. // *ЖТФ*. 2000. Т. 70. № 11. С. 36.
6. Kolesnichenko Yu. F., Brovkin V. G., Afanas'ev S. A., Khmara D. V., Lashkov V. A., Mashek I. Ch. // 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit 10–13 January 2005, Reno, Nevada.
7. Грачев Л. П., Есаков И. И., Ходатаев К. В. // *ЖТФ*. 1998. Т. 68. № 12. С. 15
8. Грачев Л. П., Есаков И. И., Ходатаев К. В. // *ЖТФ*. 1999. Т. 69. № 11. С. 14.
9. Грачев Л. П., Есаков И. И., Ходатаев К. В. // *ЖТФ*. 1999. Т. 69. № 11. С. 19.
10. Бычков Д. В., Грачев Л. П., Есаков И. И., Раваев А. А., Северинов Л. Г. // *ЖТФ*. 2009. Т. 79. № 9. С. 33.
11. Батанов Г. М., Грицинин С. И., Косый И. А., Магунов А. Н., Силаков В. П., Тарасова Н. М. // *Труды ФИАН*. Т. 160. 1985. С. 174.
12. Двинин С. А. // *ВМУ. Сер. 3. Физика, астрономия*. 1985. Т. 26. № 6. С. 30.
13. Гильденбург В. Б., Гуцин И. С., Двинин С. А., Ким А. В. // *ЖЭТФ*. 1990. Т. 97. № 4. С. 1151. (Gildenburg V. B., Guschin I. S., Dvinin S. A., Kim A. V. *Dy-*

- namics of a high-frequency streamer // *Sov. Phys. JETP*. 1990. V. 70. № 4. P. 645.)
14. *Гущин И. С., Двинин С. А.* // Труды факультета вычислительной математики и кибернетики МГУ. Методы математического моделирования и вычислительной диагностики. М.: МГУ, 1990. С. 275. (*Guschin I. S., Dvinin S. A.* // *Computational Mathematics and Modeling*. V. 3. № 3. July. 1992. P. 339.)
 15. *Веденин П. В., Попов Н. А.* // *ЖЭТФ*. 1995. Т. 108. Вып. 2. С. 531.
 16. *Веденин П. В., Попов Н. А.* // *ЖЭТФ*. 2003. Т. 123. Вып. 1. С. 49.
 17. *Пащенко Н. Т., Райзер Ю. П.* // *Физика плазмы*. 1982. Т. 8. С. 1086.
 18. *Райзер Ю. П.* // *ЖЭТФ*. 1971. Т. 61. С. 222.
 19. *Райзер Ю. П.* *Лазерная искра и распространение разрядов*. М.: Наука, 1976. 376 с.
 20. *Семенов В. Е.* // *Физика плазмы*. 1982. Т. 8. С. 613.
 21. *Бродский Ю. Я., Голубев С. В., Зорин В. Г., Лучинин А. Г., Семенов В. Е.* // *ЖЭТФ*. 1983. Т. 84. С. 1695.
 22. *Бородачева Т. В., Семенов В. Е.* // *ЖТФ*. 1985. Т. 55. № 9. С. 1743.
 23. *Двинин С. А., Довженко В. А.* // *Физика плазмы*. 1988. Т. 14. Вып. 1. С. 66.
 24. *Ходатаев К. В., Горелик Б. Р.* // *Физика плазмы*. 1997. Т. 23. № 3. С. 236.
 25. *Laux C. O.* von Karman Institute Lecture Series 2002—07. In: *Physico-Chemical Modeling of High Enthalpy and Plasma Flows*, eds. D. Fletcher, J.-M. Charbonnier, G.S.R. Sarma, T. Magin. Rhode-Saint-Genèse, Belgium, 2002.
 26. *Luque J., Crosley D.* SRI International. LIFBASE Software Spectroscopy Tool // SRI International MP 99-009. 1999. P. 21.
 27. The line-by-line radiative code SPARTAN. 2019. <http://esther.ist.utl.pt/spartan/>
 28. *Olivero J.J, Longbothum R. L.* // *JQSRT*. V. 17. Is. 2. P. 233.
 29. *Касабов Г. А., Елисеев В. В.* *Спектроскопические таблицы для низкотемпературной плазмы*. М.: Атомиздат, 1973, 160 с.
 30. *Плазма в лазерах* / Под ред. Дж. Бекефи. М.: Энергоиздат, 1982. 416 с.
 31. *Методы исследования плазмы: спектроскопия, лазеры, зонды* / Под ред. В. Лохте-Хольтгрёвена; пер. с англ. под ред. С. Ю. Лукьянова. М.: Мир, 197. 552 с.
 32. *Кинетика неравновесной низкотемпературной плазмы* / Л. М. Биберман, В. С. Воробьев, И. Т. Якубов; АН СССР, Ин-т высоких температур. М.: Наука, 1982. 375 с.
 33. *Злобин В. В., Кузовников А. А., Шибков В. М.* // *ВМУ. Сер. 3. Физика. Астрономия*. 1988. Т. 29. № 1. С. 89.
 34. *Булкин П. С., Двинин С. А., Солнцев Г. С., Шкрадюк И. Э.* // *Вестник Московского университета. Сер. 3. Физика, Астрономия*. 1986. Т. 27. № 5. С. 15.
 35. *Балтин Л. М., Батенин В. М., Девяткин И. И., Лебедева В. Р., Цемко Н. И.* // *ТВТ*. 1971. Т. 9. Вып. 6. С. 1105.
 36. *Kosygi I. A., Kostinsky A. Y., Matveyev A. A., Silakov V. P.* // *Plasma Sources Sci. Technol.*, 1992. V. 1. P. 207.
 37. *Tatarova E., Dias F., Felizardo E., Henriques J., Pinheiro M., Ferreira C., Gordiets B.* // *J. Appl. Phys.* 2010. V. 108. P. 123305. <https://doi.org/10.1063/1.3525245>
 38. *Kramida A., Ralchenko Yu., Reader J. and NIST ASD Team.* NIST Atomic Spectra Database. 2022. (version 5.10). <https://physics.nist.gov/asd>. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD. <https://doi.org/https://doi.org/10.18434/T4W30F>

A Microwave Discharge in High-Velocity Flows Initiated by a Half-Wave Antenna

© 2024 K. N. Kornev^{a,*}, A. A. Logunov^a, O. S. Surkont^a, T. R. Abushaev^a, A. L. Volynets^a, S. A. Dvinin^{a, b,**}

^a Faculty of Physics, Moscow State University, Moscow, 119991, Russia

^b RUDN University, Moscow, 117198, Russia

* e-mail: singuliarnost@yandex.ru

** e-mail: s_dvinin@mail.ru

A microwave discharge in high-velocity (150–250 m/s) air flows induced on a half-wave vibrator is studied. A cw magnetron microwave generator with a frequency of 2.45 GHz and an output power of up to 5 kW was used for initiation of the microwave discharge. The high-speed video imaging was used for studying the discharge structure, determining the diameter and length of the plasma channel as a function of flow velocity and pressure. Electron concentration and temperature, along with characteristic gas temperature, were determined based on the optical spectra. The possibility of using this microwave discharge for ignition of hydrocarbon–air mixtures in combustion chambers of ramjet engines is proved experimentally.

Keywords: high-velocity gas flow, microwave discharge, low-temperature plasma