

# Probability, Induction Time and Size of Microwave Discharge with Laser Sparkless Initiation at Different Gas Pressure and Laser Pulse Energy

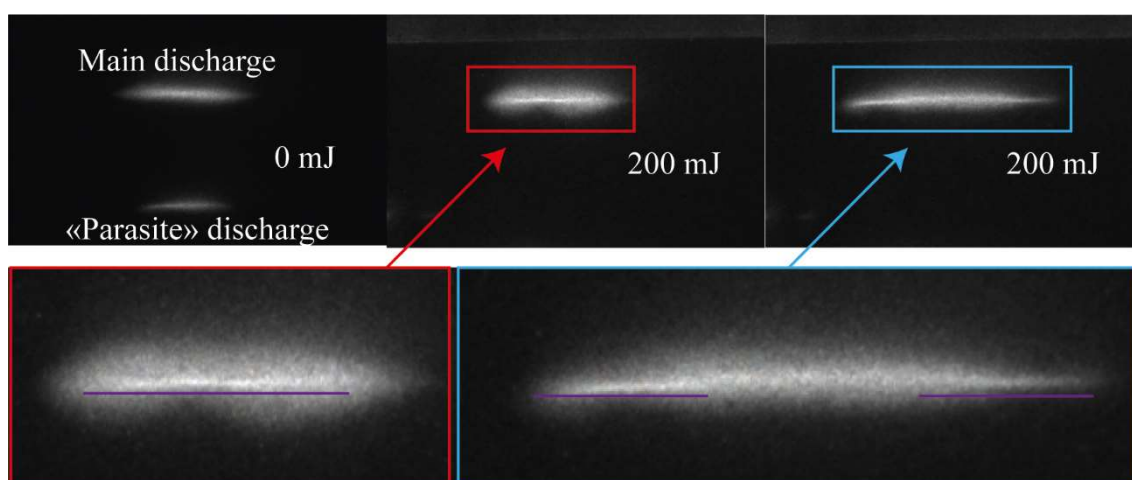
M. E. Renev, Yu. V. Dobrov, N. D. Osipov, V. A. Lashkov,  
I. Ch. Mashek, R. S. Khoronzhuk

*St. Petersburg University, Saint-Petersburg, 199034, Russia*  
renevme@mail.ru.

## Abstract

In the work experimental data on the ignition probability, induction time, length and diameter of the subcritical microwave discharge initiated by a laser pulse without a laser spark were obtained. The studies were carried out in air at pressures from 50 to 80 Torr, laser pulse energies of 10 ÷ 200 mJ and its delivery times from – 100 to 0.5  $\mu$ s relative to the microwave pulse. To create microwave radiation, MI-505 magnetron with a radiation frequency of 9.6 GHz, a pulse duration of 2.5  $\mu$ s and a focusing system were used. In the plasma appearance zone, the microwave radiation intensity was estimated at 2.0 kV/cm. Evergreen 200 laser was used to initiate the microwave discharge, creating pulses with a half-width of 10 ns, a wavelength of 532 nm. Laser pulses are focused by a lens with a focal length of 250 mm. It was possible to increase the threshold pressure of the microwave discharge from 50 Torr (without initiation) to 80 Torr (with laser initiation). Synchronous supply of microwave and laser pulses gives the best result: discharge ignition without misfires, and the spread of characteristics (geometry, induction time) is the smallest. Premature supply of a laser pulse also allows obtaining a discharge with an increased ignition threshold, but its characteristics are worsened. Laser initiation also has a positive effect on the supercritical microwave discharge. The results obtained can be useful in developing a generator of plasma formations in aerodynamics problems and other problems with plasma energy input.

Keywords: Microwave plasma, actuator, laser initiation, subcritical discharge, experiment



Microwave discharge without initiation (0 mJ) and with initiation (synchronously, 200 mJ) at a pressure near the ignition threshold (50 Torr), thin bright channels are shown in close-up (with initiation, underlined by purple stripes)

УДК 533.9.03

# Вероятность, время появления и размеры СВЧ-разряда с лазерной безыскровой инициацией при различных давлениях среды и энергии импульса лазера

М. Е. Ренев, Ю. В. Добров, Н. Д. Осипов, В. А. Лашков,  
И. Ч. Машек, Р. С. Хоронжук

*Санкт-Петербургский государственный университет.  
Россия, 199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7–9;  
renevme@mail.ru.*

## Аннотация

В работе получены экспериментальные данные о вероятности зажигания, времени индукции, длине и диаметре подкритического СВЧ-разряда, инициированного лазерным импульсом без лазерной искры. Исследования проводились в воздухе при давлениях от 50 до 80 Торр, энергиях импульса лазера  $10 \div 200$  мДж и временах его подачи от  $-100$  до  $0.5$  мкс относительно СВЧ-импульса. Для создания СВЧ-излучения использован магнетрон МИ-505 с частотой излучения  $9.6$  ГГц, длительностью импульса  $2.5$  мкс и фокусирующая система. В зоне появления плазмы напряженность СВЧ-излучения оценена значением  $2.0$  кВ/см. Для инициации СВЧ-разряда использован лазер Evergreen 200, создающий импульсы с полушириной  $10$  нс и длиной волны  $532$  нм. Лазерные импульсы фокусируются линзой с фокусным расстоянием  $250$  мм. Удалось поднять пороговое давление СВЧ разряда с  $50$  Торр (без инициации) до  $80$  Торр (с лазерной инициацией) Синхронная подача импульсов СВЧ и лазера дает наилучший результат: зажигание разряда без осечек, а разброс характеристик (геометрия, время индукции) наименьший. Преждевременная подача лазерного импульса также позволяет получать разряд с повышенным порогом зажигания, однако его характеристики ухудшаются. Лазерная инициация положительно влияет и на надкритический СВЧ разряд. Полученные результаты могут быть полезны при разработке генератора плазменных образований в задачах аэродинамики и иных задачах с плазменным энерговыделением.

Ключевые слова: СВЧ-плазма, актуатор, лазерная инициация, подкритический разряд, эксперимент.

## 1. Введение

Современные сверхзвуковые летательные аппараты (ЛА) используют «классические» механические способы управления обтеканием и изменения как силы лобового сопротивления, так и подъемной силы для получения желаемых характеристик по управляемости и экономичности. С ростом числа Маха термомеханические нагрузки значительно возрастают [1]. Требуется использовать более жаропрочные материалы для корпуса, а также увеличивать мощность и вес приводов систем управления ЛА. В то же время остро стоит проблема снижения веса и стоимости изготовления и эксплуатации перспективных ЛА. Все сложнее находить компромиссные решения этих проблем.

Известным исследуемым альтернативным путем снижения нагрузок на сверхзвуковой ЛА является применение плазменных технологий (плазменных актуаторов) [2–7]. Можно выделить класс актуаторов, создающих протяженный соосный нагрев в сверхзвуковом потоке

перед самой передней затупленной частью обтекаемого объекта (ЛА). Это, например, системы с лазерными искрами [8–11], СВЧ-разряды [5, 12–15] и комбинированные [16–18]. Перестройка обтекания ЛА и изменение его аэродинамических характеристик связывается многими авторами с локальным нагревом набегающего сверхзвукового потока. Эффективность рассматриваемых актуаторов при постоянной полной величине энергозатраты растет с числом Маха [19], а также с увеличением протяженности нагрева [20–27]. На работу актуатора влияет также геометрия плазменного образования и его положение относительно ЛА [28]. Отмечается также вклад фактора высокой степени ионизации в уменьшение сопротивления [29, 30].

Лазерные искровые плазменные актуаторы [8–11] могут быть использованы при высоких давлениях, однако при понижении давления следует экспоненциально увеличивать энергию импульса [31, 32]. Для получения разряда в воздухе при давлении 100 Торр требуется значение интенсивности лазерного излучения в фокусе оптической системы около  $10^{16} \div 10^{17}$  Вт/м<sup>2</sup>. Например, для этого подойдет лазер с энергией импульса не менее 100 мДж, длительностью 10 нс и линза с фокусным расстоянием не более 50 мм. Лазерная искра будет образовываться без осечек (в тех случаях, когда искра не возникает), но иметь малые размеры. Создание лазерной искры не зависит от редкого во времени естественного возникновения электронов [33]. Лазерное излучение создает затравочные электроны самостоятельно [34].

СВЧ-разрядная система может создавать СВЧ-плазму при низких давлениях. Для получения разряда при 50 Торр требуется около 2 кВ/см амплитуды электрической напряженности в СВЧ-излучении (или  $10^8$  Вт/м<sup>2</sup> интенсивности СВЧ-излучения), а при атмосферном давлении — 30 кВ/см ( $10^{10}$  Вт/м<sup>2</sup>). СВЧ-излучение не может создать затравочные электроны (с которых развивается плазма) самостоятельно. Электроэнергия расходуется на создание излучения даже в тех случаях, когда плазмы нет (осечка, длительное образование). В связи с гораздо большей длиной волны у СВЧ по сравнению с лазерным излучением размеры области с высокими амплитудами электромагнитного поля около точки фокуса имеют существенные размеры. Отметим стоит и то, что для более сильного воздействия на среду необходима филаментная стадия СВЧ-разряда (тонкий, яркий канал) [32]. Эта стадия идет после диффузной, и при низких давлениях ее приходится долго ожидать [35] (порядка 10 мкс), расходуя электроэнергию.

Сами СВЧ-антенны для фокусировки излучения являются многофокальными [35]. Это приводит к получению «паразитных» СВЧ-разрядов: СВЧ-разряд происходит не только в главном фокусе, но и во вторичных. Это, очевидно, уменьшает энергозатраты «главным» разрядом.

Комбинированный СВЧ-разряд с лазерной инициацией [16–18] является перспективным. Лазерная инициация снижает требования к мощности СВЧ-излучения локально, в районе фокуса лазерного луча, для получения плазмы. Лазерная искра, поданная за десять микросекунд до СВЧ-импульса, создает след, способствующий развитию СВЧ-плазмы с пониженной плотностью и высокой проводимостью, что значительно ускоряет ее развитие в виде филамента и локализует место ее появления. Это важно для практического применения плазменного актуатора в сверхзвуковом потоке. От актуатора требуются экономичность, приемлемость (скорость получения эффекта) и надежность: отсутствие осечек и воспроизведение характеристик при повторном запуске.

В работе [36] показано, что лазерное излучение без образования лазерной искры принципиально способно снижать требования к пробойной интенсивности СВЧ-поля. В то же время эта технология требует дальнейшего изучения: необходимо выяснить чувствительность свойств СВЧ-плазмы к варьированию энергии импульса лазера и времени его подачи при различных давлениях.

Различают над- и подкритические разряды. В первом случае СВЧ-разряд зажигается при электрической напряженности или интенсивности излучения выше порога зажигания без

применения специальных методов. Подкритический разряд получается при создании локального возмущения: понижения плотности, нагрева, фокусировки электрического поля электродами и т.д. Такие возмущения должны приводить к преобладанию скорости реакций ионизации над реакциями прилипания и рекомбинации.

В данной работе представлены результаты исследования подкритического СВЧ-разряда с лазерной инициацией (луч вдоль электрического СВЧ-поля) в неподвижной среде при давлениях  $50 \div 80$  Торр, напряженности импульсного СВЧ-поля  $2.0$  кВ/см и длительности  $2.5$  мкс. Лазерная безыскровая инициация производится импульсами лазера  $10 \div 200$  мДж с различными временами подачи относительно СВЧ-импульса от  $-100$  мкс (до СВЧ, «преждевременно») до  $+0.5$  мкс (во время СВЧ-разряда, «синхронно»). Использована линза с фокусным расстоянием  $250$  мм. Получены данные о вероятности и времени индукции разряда, его геометрии и координатах. Под временем индукции понимается время, требуемое для появления подкритического разряда после подачи обоих импульсов (лазерного и СВЧ). Отдельно проводится сравнение инициированного СВЧ-разряда с обычным при давлении, равном пороговому, на предмет воспроизводимости характеристик и наличия паразитных разрядов.

## 2. Постановка эксперимента

Зона исследования показана на рис. 1, а, оптическая схема для лазера — рис. 1, б. Исследование плазмы СВЧ-разряда с инициацией проводится в камере Эйфеля для создания воздушной среды с необходимым давлением. Давление отслеживается по манометру и удерживается с точностью до  $2.5$  Торр. В камеру через волновод поступает СВЧ-излучение от магнетрона МИ-505 (частота  $9.6$  ГГц) импульсно (длительность прямоугольных импульсов –  $2.5$  мкс, фронт –  $200$  нс). СВЧ-антенна имеет рупор и отражающую поверхность эллиптической формы. Такая антенна создает стоячую электромагнитную волну с множеством пучностей (фокусов). Главный фокус имеет размеры полудлины и полуширины  $30$  и  $5$  мм соответственно. Вектор электрической компоненты линейно поляризованного СВЧ-поля направлен горизонтально.

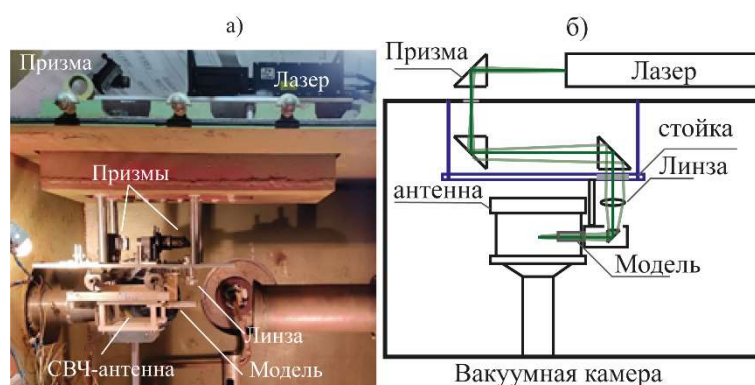


Рис. 1. Система получения лазерного и СВЧ-излучений в камере Эйфеля: а) вид установки, б) оптическая схема установки

Лазер Evergreen 200 генерирует импульсы излучения по внешнему сигналу с длительностью  $10$  нс и варьiruемой энергией до  $200$  мДж; длина волны излучения составляет  $532$  нм. Через поворотные призмы и оптическое отверстие в камере лазерный луч направляется в специальную изготовленную модель, которая в разобранном виде показана на рис. 2. В ней также устанавливается призма (в торце справа) на небольшой платформе с регулировкой для получения горизонтального луча. Луч проходит через пластиковую полую насадку со стеклом на торце.



Рис. 2. Разобранная система для размещения призмы в сверхзвуковом потоке: модель с пластиковой полкой вставкой ( $\varnothing$  12 мм), обтекаемый пилон, регулировочная платформа призмы в торце оболочки, призма

Проведена серия отладочных экспериментов. В ходе них измерялось пороговое давление, при котором происходит СВЧ-пробой без инициации. Это давление составляет 50 Торр, что соответствует пороговой электрической напряженности СВЧ около 2.0 кВ/см. После измерений порогового давления напряжение питания магнетрона не изменялось.

С помощью задымления, фотосъемки и лазерной указки проводилась юстировка оптической системы, в результате которой было получено прохождение лазерного луча через всю систему в главный фокус СВЧ-системы. С использованием измерителя светового потока ИМО-2Н проверено соответствие энергии лазерного импульса заявленным характеристикам.

В ходе одной серии экспериментов с выбранными значениями давления среды  $p_g$ , энергии импульса лазера  $Q_{las}$ , времени его подачи  $t_{las}$  проводится 30 измерений исследуемых величин для их усреднения и вычисления неопределенности. Экспериментальная установка оснащена измерителями прямого и отраженного излучения СВЧ в волноводе с осциллографом Tektronix, видеокамерой PCO DiCAM-PRO GaAs P46 для фоторегистрации разряда (выдержка 5 мкс, разрешение  $1024 \times 1024$ ), фотодиодом для контроля времени появления импульса лазера. Применено оборудование National Instruments и пакет LabVIEW для написания программы управления экспериментом.

Экспериментальная **вероятность** зажигания разряда  $P(t_{las}, Q_{las}, p_g)$  – это доля фотографий с видимым на них разрядом из общего числа пусков в серии. Предполагается, что разряд может находиться в двух состояниях: "зажётся" или "осечка". По экспериментальной вероятности вычисляется ее неопределенность с доверительной вероятностью 95 %. Для этого перебираются биномиальные распределения с параметром теоретической вероятности от 0 до 1 с шагом 0.0001. Проверяется, попадает ли экспериментальный результат в 95 % доверительного интервала каждого из перебираемого распределения. Если ответ положительный, то соответствующее значение записывается. Неопределенность измерения экспериментальной вероятности определяется по диапазону записанных значений теоретических вероятностей.

**Время индукции разряда**  $t_{ind}$  – это время, необходимое для образования разряда после подачи создающего его воздействия. Оно ассоциируется с моментом резкого изменения отраженного сигнала в волноводе. Пример осциллограммы прямого и отраженного сигналов приведен на рис. 3, где  $t$  – начало отсчета и момент выхода на постоянный уровень прямого сигнала,  $t_{las}$  – время подачи лазерного импульса (равное +0.5 мкс на рис. 3),  $t_{back}$  – время образования усиленного отраженного сигнала (0.7 мкс в примере). Формула для вычисления времени индукции

$$t_{ind} = \begin{cases} t_{back}, & t_{las} < 0; \\ t_{back} - t_{las}, & t_{las} > 0 \end{cases} \quad (1)$$

В данной работе исследуются обычные и инициированные разряды. В случае обычного разряда в качестве  $t_{las}$  необходимо подставить « $-\infty$ ». Лазерная инициация значительно влияет на образование СВЧ-разряда. Если он подкритический, то без инициации невозможен. В связи с этим, если лазерный импульс подан позднее, чем  $t = 0$ , следует вычесть время его подачи из  $t_{back}$  для получения величины  $t_{ind}$ . На рис. 3 время индукции равно 0.2 мкс. Неопределенность измерения времени зажигания по осциллографу составляет  $\pm 0.05$  мкс.



Рис. 3. Пример показаний осциллографа при измерении сигналов прямого и отраженного излучения СВЧ в волноводе, импульс лазера подан к 0.5 мкс

**Измерение положения и размеров разряда.** На фотографии (пример на рис. 4) представлено 2D-распределение яркости по координатам в области исследования. Под областью разряда понимается место с яркостью 50 % от максимальной. Центр разряда вычисляется по формуле центра масс, где плотность – это яркость пикселя. Диаметр  $D$  и длина  $L$  разряда вычисляются по крайним координатам с заданным порогом яркости: по столбцам или построчно находится наибольшее расстояние.

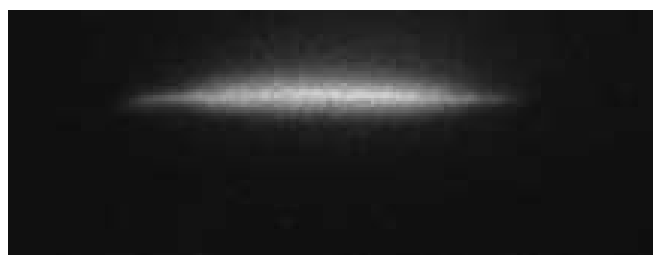


Рис. 4. Пример фотографии активной фазы СВЧ-разряда

### 3. Влияние лазерной инициации на надкритический СВЧ разряд

СВЧ-разряд в надкритическом СВЧ-поле без инициации и с инициацией в эксперименте в неподвижной среде зажигался без осечек – экспериментальная вероятность зажигания разряда равна единице. В таком случае теоретическая вероятность лежит в диапазоне от 0,88 до 1,00.

На рис. 5 приведены типовые фотографии надкритического СВЧ разряда без инициации (0 мДж) и с лазерной инициацией (синхронно, 200 мДж). Без инициации в половине случаев зажигался главный СВЧ-разряд, а в другой половине он появлялся вместе с паразитным разрядом. Главный разряд, как правило, имел тусклое свечение с максимальной яркостью в цен-

тре, но без видимых ее резких изменений. Инициация лазером позволила, во-первых, стабильно получать только главные разряды. Во-вторых, обнаруживались на некоторых фотографиях тонкие (около 5 пикселей, 0.4 мм) и яркие области, выделяющийся на фоне плавно меняющейся яркости разряда. На рис. 5 они подчеркнуты снизу фиолетовыми полосами.

Лазерный луч с большой интенсивностью излучения, по оценкам [37] для схожих условий, значительно ускоряет процесс зажигания СВЧ-разряда. Лазерный импульс способен оставлять после себя лазерный след с характерным уровнем удельной проводимости 10 См/м. Такой уровень проводимости в длинной и тонкой области приводит к искажению суммарного СВЧ-излучения. Полагаем, что это является причиной исчезновения паразитных разрядов. Проводящий лазерный след может, потенциально, ускорить образование филаментной фазы СВЧ-разряда, что проявилось в эксперименте в виде тонких и ярких областей на фото.

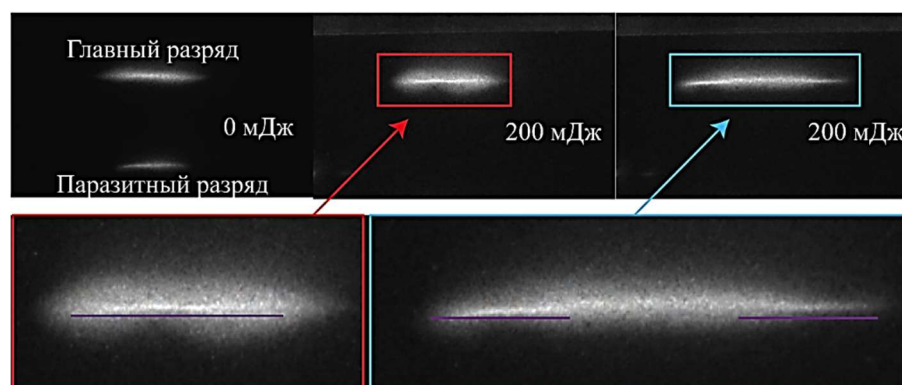


Рис. 5. СВЧ-разряд без инициации (0 мДж) и с инициацией (синхронно, 200 мДж) при давлении около порога зажигания (50 Торр); крупным планом приведены тонкие яркие каналы (с инициацией), подчеркнуты фиолетовыми полосами)

Время индукции СВЧ-разряда без инициации находится в диапазоне от 0.50 до 1.30 мкс. С инициацией разряд зажигался стабильно к 0.25 мкс. Длина разряда без инициации получается в диапазоне  $15 \div 20$  мм, инициация сдвигает диапазон к большим значениям  $17 \div 20$  мм и уменьшает неопределенность. Лазерный импульс изменяет ширину всего разряда: с  $2.0 \div 2.6$  мм до  $2.4 \div 2.5$  мм. На горизонтальное расположение плазмы импульс лазера заметно не влияет: в обоих случаях составляет  $-1 \div 1$  мм, но уменьшилась неопределенность вертикальной координаты с  $-0.5 \div 0.4$  мм до  $-0.4 \div 0.1$  мм. Лазерный луч точно задает положение плазмы по вертикали, поскольку его каустика является узкой, а получение плазмы вне лазерного следа невозможно из-за резкого усложнения условий зажигания плазмы.

#### 4. Подкритический СВЧ разряд с синхронной подачей импульсов лазера и СВЧ

Синхронная лазерная инициация позволила поднять порог образования СВЧ-разряда с 50 до 80 Торр. Осечки не обнаруживаются в диапазоне энергий импульса лазера от 25 до 200 мДж. Теоретическая вероятность зажигания может быть в диапазоне  $0.88 \div 1$ . При энергии импульса 10 мДж – вероятность зажигания  $0.6 \div 0.9$ .

Разброс вертикальной координаты плазмы при давлениях  $50 \div 80$  Торр и энергиях лазерного импульса  $25 \div 200$  мДж не превышал  $\pm 0.25$  мм. Горизонтальная компонента –  $\pm 1.0$  мм.

На рис. 6 приведены примеры фотографий подкритического иницированного СВЧ-разряда при давлениях 60 и 80 Торр. С ростом давления разряд уменьшается в размерах, становится тусклее. Факт уменьшения размеров согласуется с результатами работы [38].

Количественные показатели размеров разрядной области приведены на рис. 7 с линейной аппроксимацией. Энергия импульса лазера составляет 200 мДж. При увеличении давления с 50 до 80 Торр длина разряда убывает с 18.5 до 10 мм, а диаметр – с 2.4 до 1.7 мм.

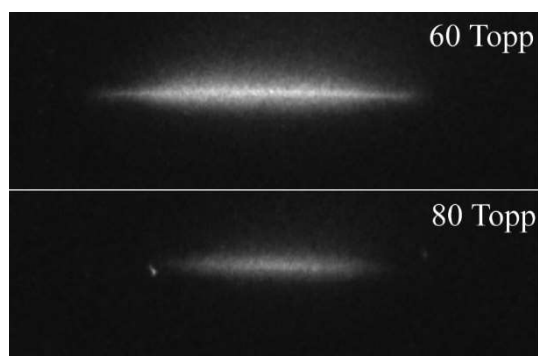


Рис. 6. СВЧ-разряд с синхронной инициацией (200 мДж) при давлении 60 и 80 Торр

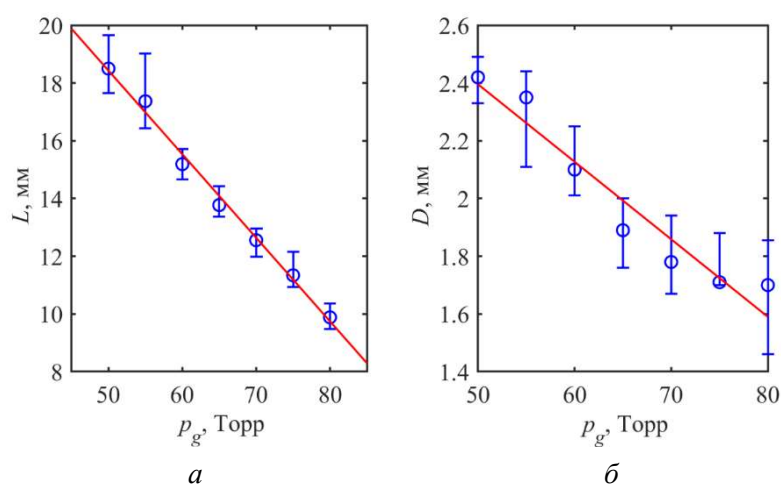


Рис. 7. Зависимости длины (а) и диаметра (б) подкритического СВЧ-разряд с синхронной инициацией (200 мДж) от давления среды

Зависимости длины и диаметра разряда от энергии импульса лазера при давлении среды 55 и 75 Торр приведены на рис. 8. Уменьшение энергии импульса лазера с 200 до 10 мДж при 55 Торр не дает отличимых с учетом неопределенности изменений в длине, диаметре разряда. При 75 Торр длина разряда уменьшилась на 16 %.

С ростом давления фиксировалось нелинейное увеличение времени индукции. Зависимость времени от давления представлена на рис. 9, а для случая синхронной подачи лазерного импульса с энергией 200 мДж. Зависимость, предположительно, может быть близка к квадратичной по следующим причинам. Пусть есть температура, до которой должен нагреться распадающийся лазерный след в подкритическом СВЧ-излучении, чтобы выполнить условия зажигания в нем. Тогда с увеличением давления в  $N$  раз СВЧ-излучению следует дольше греть лазерный след в  $N^2$  раз, поскольку он имеет больше плотность в  $N$  раз, а подвижность электронов снижена в  $N$  раз. Подвижность электронов отвечает за полный Джоулев нагрев всей плазмы. Квадратичная аппроксимация приемлемо укладывается на экспериментальные значения времени индукции.

На рис. 9, б и 9, в приведены зависимости времени индукции разряда от энергии импульса лазера при давлениях 55 и 75 Торр. Увеличение энергии с 10 до 200 мДж в рассмотренном диапазоне давлений сокращает в 1.5 ÷ 2 раза время индукции.



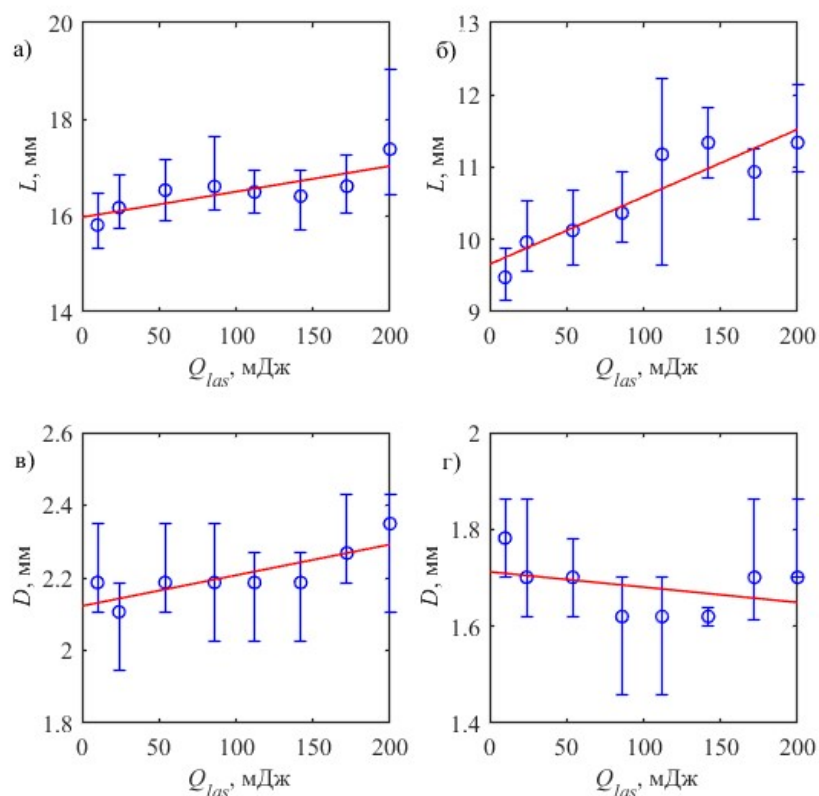


Рис. 8. Зависимости длины при 55 (а) и 75 Торр (б), а также диаметра при 55 (в) и 75 Торр (г) подкритического СВЧ-разряда с синхронной инициацией от энергии импульса лазера

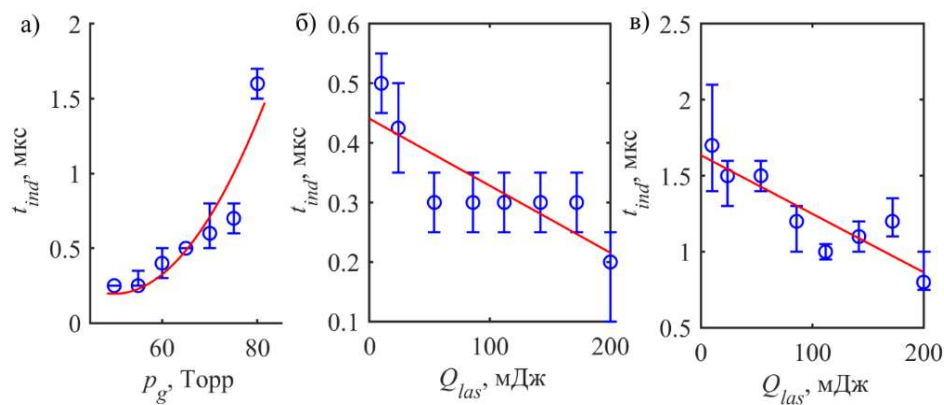


Рис. 9. Зависимость времени индукции с синхронной инициацией: а) от давления для СВЧ-разряда с энергией импульса 200 мДж; б) от энергии лазерного импульса при давлении 55 Торр; в) от энергии лазерного импульса при давлении 75 Торр

При давлении выше 80 Торр разряд визуально не обнаруживается на фотографиях: только осечки или крайне малая яркость изображения. При таких высоких давлениях время индукции (рис. 9, а) оказывается сравнимым с длительностью СВЧ-импульса или больше. Следовательно, разряд или только успевает появляться к концу СВЧ-импульса или вовсе отсутствует.

## 5. Преждевременная подача лазерного импульса для инициации СВЧ разряда

На рис. 10, *а* представлены вероятности зажигания разряда  $P$  при энергии импульса лазера  $Q_{las}$  200 мДж для различных давлений среды  $p_g$  от 50 до 80 Торр и времени подачи лазерного импульса. Преждевременная подача импульса лазера приводит к появлению подкритического разряда, но, в отличие от синхронной подачи, наблюдаются осечки. Зависимости теоретической вероятности появления разряда от давления среды, полученные при различных моментах подачи импульса лазера, практически совпадают, но они все отличаются от случая синхронной инициации (+0.5 мкс). С учетом результатов работы [37], где показано, что за 1 мкс лазерный след значительно теряет проводимость, можно сделать вывод о значимом различии в образовании разряда между синхронной и преждевременной инициациями.

На рис. 10, *б* приведены аналогичные данные, но давление фиксировано (65 Торр), а варьируется энергия импульса лазера. Ее увеличение приводит к уменьшению числа осечек разряда с преждевременными импульсами лазера.

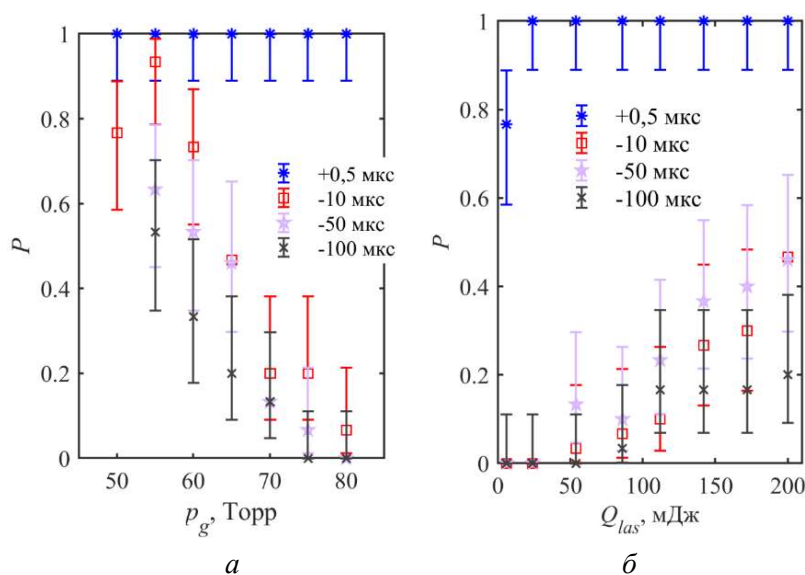


Рис. 10. Вероятность получения СВЧ-разряда для ряда  $t_{las}$  от  $-100$  до  $0.5$  мкс: *а* – при различных  $p_g$  при  $Q_{las}$  200 мДж; *б* – варьируется  $Q_{las}$ ,  $p_g$  равно 65 Торр

При преждевременной инициации увеличивается неопределенность рассматриваемых геометрических параметров разряда по сравнению с синхронной инициацией. На рис. 11 представлены величины смещения при 55 и 75 Торр для различных времен подачи импульса (200 мДж). Разряд смещается на величину до 5 мм в направлении прохождения луча (рис. 11, *а*, *б*). Рисунки 11, *в*, *г*: вертикальное положение плазмы указывается с точностью до  $\pm 0,3$  мм при всех рассмотренных временах подачи импульса лазера.

На рис. 12 приведены зависимости длины и диаметра разряда при 55 и 75 Торр от времени подачи импульса лазера с энергией 200 мДж. Разряд с преждевременной подачей с  $t_{las}$  в диапазоне от  $-100$  до  $-25$  мкс получается более коротким (до 1.5 раз). Диаметр разряда с учетом неопределенности неразличим.

На рис. 13 приведено время индукции при давлении среды 55 и 75 Торр для различных значений времени подачи импульса лазера (200 мДж). Значительные увеличения медианного значения (до 4 раз) и неопределенности времени индукции имеются при преждевременной подаче лазерного импульса.

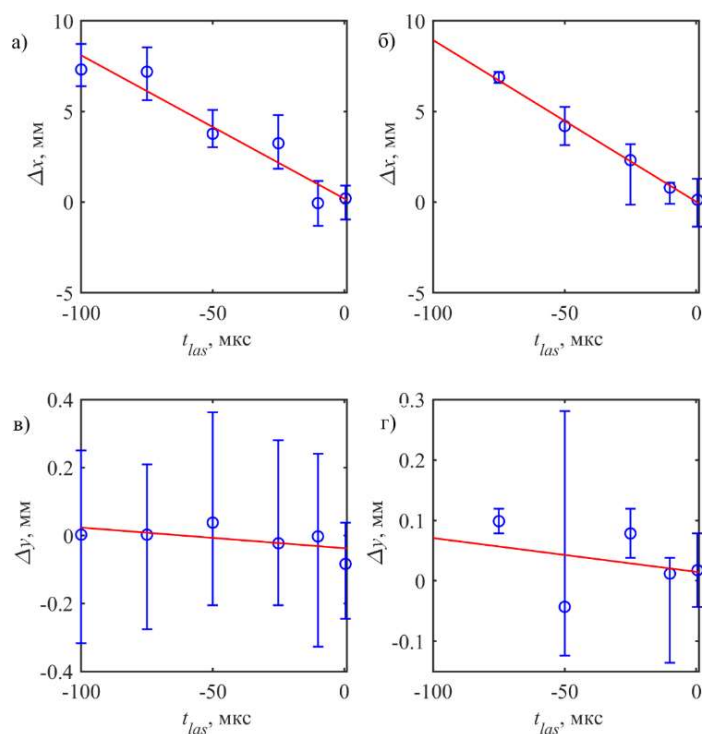


Рис. 11. Зависимости величины смещения вдоль луча лазера при 55 (а) и 75 Торр (б), а также поперек луча при 55 (в) и 75 Торр (г) подкритического СВЧ-разряда от времени подачи импульса лазера с энергией 200 мДж

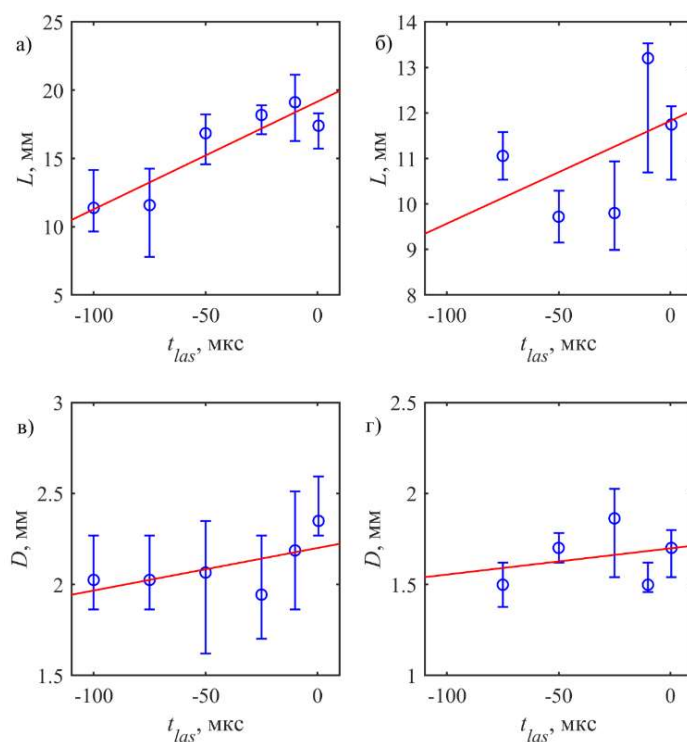


Рис. 12. Зависимости длины при 55 (а) и 75 Торр (б), а также диаметра при 55 (в) и 75 Торр (г) подкритического СВЧ-разряда от времени подачи импульса лазера с энергией 200 мДж

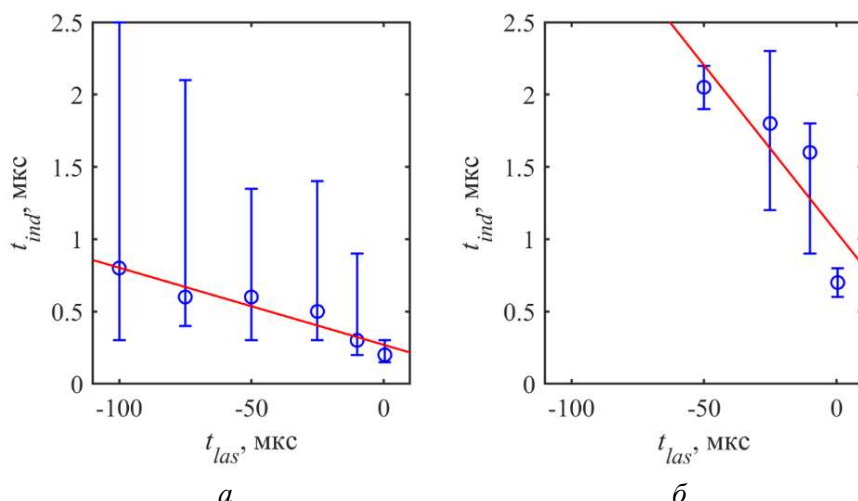


Рис. 13. Зависимости времени индукции при 55 (а) и 75 Торр (б) подкритического СВЧ-разряда от времени подачи импульса лазера с энергией 200 мДж

## 6. Заключение

Проведены эксперименты по исследованию зажигания СВЧ разряда с лазерной инициацией без лазерной искры при различных давлениях, энергиях лазерного импульса, времени его подачи относительно времени подачи СВЧ-импульса. Измерены вероятность зажигания, время индукции, координаты центра плазмы, длина и диаметр разрядной области.

Синхронная лазерная инициация надкритического СВЧ-разряда позволила устранить паразитные плазмоиды во вторичных фокусах СВЧ-антенны, увеличить яркость главного плазмоида. Время индукции разряда благодаря лазерной инициации сокращено с  $0.5 \div 1.3$  мкс до 0.25 мкс. Разряд экспериментально зажигается без осечек (теоретическая вероятность зажигания не менее 88 %), его характеристики воспроизводятся с малой неопределенностью, по сравнению с разрядом без инициации. В некоторых случаях обнаруживаются на фотографиях разряда яркие тонкие каналы на фоне более тусклого и плавно изменяющегося свечения, что может означать филаментацию разряда.

Имеется возможность получения подкритических СВЧ-разрядов с повышенным порогом зажигания по давлению на 60 % благодаря инициации. С приближением давления к новому значению порога разряд становится тусклее, короче. Он появляется позднее, и при давлении равном новому значению порогового момент зажигания близок к моменту отключения СВЧ-импульса.

Энергия лазерного импульса влияет на время индукции подкритического СВЧ-разряда: изменение времени в 2 раза при варьировании энергии от 10 до 200 мДж. Заметного влияния энергии импульса на геометрию не обнаружено. При энергии меньше 25 мДж могут происходить осечки зажигания (теоретическая вероятность  $60 \div 90$  %).

Лазерный импульс следует подавать синхронно с импульсом СВЧ-излучения (во время него), поскольку иначе часто происходят осечки зажигания разряда, значительно увеличивается разброс его времени индукции, уменьшается длина. Увеличение энергии лазерного импульса при его преждевременной подаче позволяет повысить вероятность зажигания разряда до примерно 50 %. Повышение давления уменьшает вероятность зажигания с преждевременной инициацией.

## Благодарности и ссылки на гранты

Экспериментальное исследование свойств лазерноиницированного СВЧ разряда в покоящемся газе поддержано грантом № 22-1-1-17-4 Фонда развития теоретической физики и математики «БАЗИС»

## Литература

1. Bletzinger P., Ganguly B. N., Wie D. W., Garscadden A. Plasmas in high speed aerodynamics // J. Phys. D: Appl. Phys. 2005. Vol. 38, № 4. Pp. R33–R57. DOI: 10.1088/0022-3727/38/4/R01
2. Fomin V. M., Tretyakov P. K., Taran J.-P. Flow control using various plasma and aerodynamic approaches (Short review) // Aerospace Science and Technology. 2004. Vol. 8, № 5. Pp. 411–421. DOI: 10.1016/j.ast.2004.01.005
3. Knight D. Survey of Aerodynamic Drag Reduction at High Speed by Energy Deposition // Journal of Propulsion and Power. 2008. Vol. 24, № 6. Pp. 1153–1167. DOI: 10.2514/1.24595
4. Russell A., Zare-Behtash H., Kontis K. Joule heating flow control methods for high-speed flows // Journal of Electrostatics. 2016. Vol. 80. Pp. 34–68. DOI: 10.1016/j.elstat.2016.01.004
5. Starikovskiy A. Y., Aleksandrov N. L. Gasdynamic Flow Control by Ultrafast Local Heating in a Strongly Nonequilibrium Pulsed Plasma // Plasma Physics Reports. 2021. Vol. 47, № 2. Pp. 148–209. DOI: 10.1134/S1063780X21020069
6. Knight D., Kianvashrad N. Review of Energy Deposition for High-Speed Flow Control // Energies. 2022. Vol. 15, № 24. Pp. 9645. DOI: 10.3390/en15249645
7. Azarova O. A., Kravchenko O. V. The Use of Spatially Multi-Component Plasma Structures and Combined Energy Deposition for High-Speed Flow Control: A Selective Review // Energies. 2024. Vol. 17, № 7. P. 1632. DOI: 10.3390/en17071632
8. Thiyagarajan M., Scharer J. E. Experimental Investigation of 193-nm Laser Breakdown in Air // IEEE Trans. Plasma Sci. 2008. Vol. 36, № 5. Pp. 2512–2521. DOI: 10.1109/TPS.2008.2004259
9. Adelgren R., Elliot G., Knight D., Zheltovodov A., Beunter T. Energy deposition in supersonic flows // 39<sup>th</sup> Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, NV, U.S.A.: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2001. DOI: 10.2514/6.2001-885
10. Elias P.-Q., Severac N., Luyssen J. M., Andre Y.-B., Doubet I. Improving supersonic flights with femto-second laser filamentation // Sci. Adv. 2018. Vol. 4, № 11. P. eaau5239. DOI: 10.1126/sciadv.aau5239
11. Зудов В. Н., Третьяков П. К., Тупикин А. В. Некоторые особенности импульсно-периодического энергоподвода в сверхзвуковом потоке // Вестник НГУ. Серия: Физика. 2010. Т. 5, № 2. С. 43–54.
12. Kolesnichenko Y., Azarova O., Brovkin V., Khmara D., Lashkov V., Mashek I., Ryvkin M. Basics in Beamed MW Energy Deposition for Flow/Flight Control // 42<sup>nd</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, Nevada: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2004. DOI: 10.2514/6.2004-669
13. Lashkov V., Mashek I., Anisimov Y., Ivanov V., Kolesnichenko Y., Azarova O. Method of Vortex Flow Intensification under MW Filament Interaction with Shock Layer on Supersonic Body // 44<sup>th</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, Nevada: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2006. DOI: 10.2514/6.2006-404
14. Бровкин В. Г., Венедин П. В., Колесниченко Ю. Ф. СВЧ-разряд в свободном пространстве: физика и приложения // Низкотемпературная плазма в процессах нанесения функциональных покрытий. 2019. Т. 1, № 10. С. 65–69.
15. Knight D., Kolesnichenko Y. F., Brovkin V., Khmara D., Lashkov V. A., Mashek I. Interaction of Microwave-Generated Plasma with a Hemisphere Cylinder at Mach 2.1 // AIAA Journal. 2009. Vol. 47, № 12. Pp. 2996–3010. DOI: 10.2514/1.43657

16. Afanas'ev S. A., Brovkin V. G., Kolesnichenko Y. F., Mashek I. Ch. Effect of gasdynamic processes on structure and threshold of laser spark initiated microwave discharge // *Tech. Phys. Lett.* 2011. Vol. 37, № 8. Pp. 710–713. DOI: 10.1134/S1063785011080025
17. Afanas'ev S. A., Brovkin V. G., Kolesnichenko Yu. F. Laser spark initiated microwave discharge // *Tech. Phys. Lett.* 2010. Vol. 36, № 7. Pp. 672–674. DOI: 10.1134/S1063785010070266
18. Khoronzhuk R. S., Karpenko A. G., Mashek I. C., Lashkov V. A., Potapenko D. P. Microwave discharge initiated by double laser spark in a supersonic airflow // *J. Plasma Phys.* 2015. Vol. 81, № 3. P. 905810307. DOI: 10.1017/S0022377814001299
19. Lashkov V. A., Karpenko A. G., Khoronzhuk R. S., Mashek I. Ch. Effect of Mach number on the efficiency of microwave energy deposition in supersonic flow // *Phys. Plasmas.* 2016. Vol. 23. P. 052305. DOI: 10.1063/1.4949524
20. Kolesnichenko Yu. F., Brovkin V. G., Azarova O. A., Grudnitsky V. G., Lashkov V. A., Mashek I. Ch. Microwave energy release regimes for drag reduction in supersonic flows // 40<sup>th</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit. Reno, NV, U.S.A.: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2002. DOI: 10.2514/6.2002-353
21. Azarova O. A. Generation of Richtmyer–Meshkov and secondary instabilities during the interaction of an energy release with a cylinder shock layer // *Aerospace Science and Technology.* 2015. Vol. 42. Pp. 376–383. DOI: 10.1016/j.ast.2015.01.027
22. Dobrov Y. V., Lashkov V. A., Mashek I. Ch., Khoronzhuk R. S. Investigation of heat flux on aerodynamic body in supersonic gas flow with local energy deposition // *THE EIGHTH POLYAKHOV'S READING: Proceedings of the International Scientific Conference on Mechanics*, Saint Petersburg, Russia, 2018. P. 050009. DOI: 10.1063/1.5034637
23. Dobrov Y. V., Renev M. E., Lashkov V. A., Mashek I. Ch., Khoronzhuk R. S. Heat flux on streamlined body surface after local energy input // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2021. Vol. 1959, № 1. P. 012016. DOI: 10.1088/1742-6596/1959/1/012016
24. Anderson K., Knight D. D. Interaction of heated filaments with a blunt cylinder in supersonic flow // *Shock Waves.* 2011. Vol. 21, № 2. Pp. 149–161. DOI: 10.1007/s00193-011-0306-2
25. Azarova O. A., Gvozdeva L. G. Control of triple-shock configurations in high-speed flows over a cylindrically blunted plate in gases for different Mach numbers // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering.* 2018. Pp. 1–9.
26. Азарова О. А., Грудницкий В. Г., Колесниченко Ю. Ф. Стационарное обтекание тел сверхзвуковым потоком газа, содержащим бесконечный тонкий разреженный канал // *Матем. моделирование.* 2006. Т. 18, № 1. С. 79–87.
27. Azarova O. A. Supersonic Flow Control Using Combined Energy Deposition // *Aerospace.* 2015. Vol. 2, № 1. Pp. 118–134. DOI: 10.3390/aerospace2010118
28. Knight D., Azarova O., Kolesnichenko Y. Drag force control via asymmetrical microwave filament location in a supersonic flow // *Sixth European Symposium on Aerothermodynamics for Space Vehicles At: Versailles, France* Volume: European Space Agency, 2008, 1–8. 2008. Vol. 50, № 100. P. 150.
29. Kourtzanidis K., Raja L. L., Courmar S., Lago V. Numerical simulation of DC glow discharges for shock wave modification // 54<sup>th</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting. San Diego, California, USA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2016. Pp. 1–11. DOI: 10.2514/6.2016-2157
30. Azarova O. A., Erofeev A. V., Lapushkina T. A. A comparison of plasma and thermal effects upon supersonic flow past aerodynamic bodies // *Tech. Phys. Lett.* 2017. Vol. 43, № 4. Pp. 405–408. DOI: 10.1134/S1063785017040150
31. Phuoc T. X. Laser-induced spark ignition fundamental and applications // *Optics and Lasers in Engineering.* 2006. Vol. 44, № 5. Pp. 351–397. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2005.03.008
32. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. Долгопрудный: Интеллект, 2009. 736 с.

33. Usoskin I. G., Desorgher L., Velinov P., Storini M., Fluckiger E. O., Butikofer R., Kovaltsov G. A. Ionization of the earth's atmosphere by solar and galactic cosmic rays // *Acta Geophys.* 2009. Vol. 57, № 1. Pp. 88–101. DOI: 10.2478/s11600-008-0019-9
34. Федоров В. Ю., Кандидов В. П. Нелинейно-оптическая модель воздушной среды в задаче о филаментации фемтосекундных лазерных импульсов различной длины волны // *Оптика и спектроскопия.* 2008. Т. 105, № 2. С. 306–313.
35. Сайфутдинов А. И. Гидродинамические и гибридные модели электрических разрядов в газах и их приложения: ДИССЕРТАЦИЯ на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. Казань, КАИ, 2023. 592 с.
36. Kolesnichenko Y., Khmara D., Afanas'ev S. Optimization of Laser-Pulse-Controlled MW Energy Deposition // 45<sup>th</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, Nevada: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2007. DOI: 10.2514/6.2007-1228
37. Добров Ю. В., Лашков В. А., Машек И. Ч., Прокшин А. М., Ренев М. Е., Хоронжук Р. С. Лазерная безыскровая инициация подкритического СВЧ разряда // *Инженерно-физический журнал.* Т. 97, № 4. С. 1068–1081.
38. Месяц Г. А. Законы подобия в импульсных газовых разрядах // *Успехи физических наук.* 2006. Т. 176, № 10. С. 1069–1091.

## References

1. Bletzinger P., Ganguly B. N., Wie D. W., Garscadden A., Plasmas in high speed aerodynamics, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2005, vol. 38, no. 4, pp. R33–R57. DOI: 10.1088/0022-3727/38/4/R01
2. Fomin V. M., Tretyakov P. K., Taran J.-P., Flow control using various plasma and aerodynamic approaches (Short review), *Aerospace Science and Technology*, 2004, vol. 8, no. 5, pp. 411–421. DOI: 10.1016/j.ast.2004.01.005
3. Knight D., Survey of Aerodynamic Drag Reduction at High Speed by Energy Deposition, *Journal of Propulsion and Power*, 2008, vol. 24, no. 6, pp. 1153–1167. DOI: 10.2514/1.24595
4. Russell A., Zare-Behtash H., Kontis K., Joule heating flow control methods for high-speed flows, *Journal of Electrostatics*, 2016, vol. 80, pp. 34–68. DOI: 10.1016/j.elstat.2016.01.004
5. Starikovskiy A. Y., Aleksandrov N. L., Gasdynamic Flow Control by Ultrafast Local Heating in a Strongly Nonequilibrium Pulsed Plasma, *Plasma Physics Reports*, 2021, vol. 47, no. 2, pp. 148–209. DOI: 10.1134/S1063780X21020069
6. Knight D., Kianvashrad N., Review of Energy Deposition for High-Speed Flow Control, *Energies*, 2022, vol. 15, no. 24, pp. 9645. DOI: 10.3390/en15249645
7. Azarova O. A., Kravchenko O. V., The Use of Spatially Multi-Component Plasma Structures and Combined Energy Deposition for High-Speed Flow Control: A Selective Review, *Energies*, 2024, vol. 17, no. 7, pp. 1632. DOI: 10.3390/en17071632
8. Thiyagarajan M., Scharer J. E., Experimental Investigation of 193-nm Laser Breakdown in Air, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2008, vol. 36, no. 5, pp. 2512–2521. DOI: 10.1109/TPS.2008.2004259
9. Adelgren R., Elliot G., Knight D., Zheltovodov A., Beunter T., Energy deposition in supersonic flows, AIAA Paper 2001-0885. DOI: 10.2514/6.2001-885
10. Elias P.-Q., Severac N., Luysen J. M., Andre Y.-B., Doubet I., Improving supersonic flights with femtosecond laser filamentation, *Sci. Adv.*, 2018, vol. 4, no. 11, p. eaau5239. DOI: 10.1126/sciadv.aau5239
11. Zudov V. N., Tretjakov P. K., Tupikin A. V., Some features of pulse-periodic energy supply in supersonic flow, *Vestnik NSU. Series: Physics*, 2010, vol. 5, no. 2, pp. 43–54 [in Russian]. DOI: 10.54362/1818-7919-2010-5-2-43-54
12. Kolesnichenko Y., Azarova O., Brovkin V., Khmara D., Lashkov V., Mashek I., Ryvkin M. Basics in Beamed MW Energy Deposition for Flow/Flight Control, AIAA Paper 2004-669. DOI: 10.2514/6.2004-669

13. Lashkov V., Mashek I., Anisimov Y., Ivanov V., Kolesnichenko Y., Azarova O. Method of Vortex Flow Intensification under MW Filament Interaction with Shock Layer on Supersonic Body, *AIAA Paper* 2006-404. DOI: 10.2514/6.2006-404
14. Brovkin V. G., Venedin P. V., Kolesnichenko Yu. F., Microwave discharge in free space: physics and applications, *Low-temperature plasma in the processes of deposition of functional coatings*, 2019, vol. 1, no. 10, pp. 65–69 [in Russian].
15. Knight D., Kolesnichenko Y. F., Brovkin V., Khmara D., Lashkov V. A., Mashek I., Interaction of Microwave-Generated Plasma with a Hemisphere Cylinder at Mach 2.1, *AIAA Journal*, 2009, vol. 47, no. 12, pp. 2996–3010. DOI: 10.2514/1.43657
16. Afanas'ev S. A., Brovkin V. G., Kolesnichenko Y. F., Mashek I. Ch., Effect of gasdynamic processes on structure and threshold of laser spark initiated microwave discharge, *Tech. Phys. Lett.*, 2011, vol. 37, no. 8, pp. 710–713. DOI: 10.1134/S1063785011080025
17. Afanas'ev S. A., Brovkin V. G., Kolesnichenko Yu. F., Laser spark initiated microwave discharge, *Tech. Phys. Lett.*, 2010, vol. 36, no. 7, pp. 672–674. DOI: 10.1134/S1063785010070266
18. Khoronzhuk R. S., Karpenko A. G., Mashek I. C., Lashkov V. A., Potapenko D. P., Microwave discharge initiated by double laser spark in a supersonic airflow, *J. Plasma Phys.*, 2015, vol. 81, no. 3, pp. 905810307. DOI: 10.1017/S0022377814001299
19. Lashkov V. A., Karpenko A. G., Khoronzhuk R. S., Mashek I. Ch., Effect of Mach number on the efficiency of microwave energy deposition in supersonic flow, *Phys. Plasmas*, 2016, vol. 23, pp. 052305. DOI: 10.1063/1.4949524
20. Kolesnichenko Yu. F., Brovkin V. G., Azarova O. A., Grudnitsky V. G., Lashkov V. A., Mashek I. Ch., Microwave energy release regimes for drag reduction in supersonic flows, *AIAA Paper* 2002-353. DOI: 10.2514/6.2002-353
21. Azarova O. A., Generation of Richtmyer–Meshkov and secondary instabilities during the interaction of an energy release with a cylinder shock layer, *Aerospace Science and Technology*, 2015, vol. 42, pp. 376–383. DOI: 10.1016/j.ast.2015.01.027
22. Dobrov Y. V., Lashkov V. A., Mashek I. Ch., Khoronzhuk R. S., Investigation of heat flux on aerodynamic body in supersonic gas flow with local energy deposition. *THE EIGHTH POLYAKHOV'S READING: Proceedings of the International Scientific Conference on Mechanics*, Saint Petersburg, Russia, 2018. P. 050009. DOI: 10.1063/1.5034637
23. Dobrov Y. V., Renev M. E., Lashkov V. A., Mashek I. Ch., Khoronzhuk R. S., Heat flux on streamlined body surface after local energy input, *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2021, vol. 1959, no. 1, pp. 012016. DOI: 10.1088/1742-6596/1959/1/012016
24. Anderson K., Knight D. D., Interaction of heated filaments with a blunt cylinder in supersonic flow, *Shock Waves*, 2011, vol. 21, no. 2, pp. 149–161. DOI: 10.1007/s00193-011-0306-2
25. Azarova O. A., Gvozdeva L. G., Control of triple-shock configurations in high-speed flows over a cylindrically blunted plate in gases for different Mach numbers, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 2018, pp. 1–9.
26. Azarova O. A., Grudnitskii V. G., Kolesnichenko Yu. F., Stationary streamlining bodies by supersonic flow with an infinite thin low density channel, *Mat. Model.*, 2006, vol. 18, no. 1, pp. 79–87 [in Russian].
27. Azarova O. A., Supersonic Flow Control Using Combined Energy Deposition, *Aerospace*, 2015, vol. 2, no. 1, pp. 118–134. DOI: 10.3390/aerospace2010118
28. Knight D., Azarova O. A., Kolesnichenko Yu. F., Drag force control via asymmetrical microwave filament location in a supersonic flow, *Sixth European Symposium on Aerothermodynamics for Space Vehicles: Versailles, France Volume: European Space Agency*, 2008, 1–8, vol. 50, no. 100, p. 150.
29. Kourtzanidis K., Raja L. L., Courmar S., Lago V., Numerical simulation of DC glow discharges for shock wave modification, *AIAA Paper* 2016-2157. DOI: 10.2514/6.2016-2157



30. Azarova O. A., Erofeev A. V., Lapushkina T. A., A comparison of plasma and thermal effects upon supersonic flow past aerodynamic bodies, *Tech. Phys. Lett.*, 2017, vol. 43, no. 4, pp. 405–408. DOI: 10.1134/S1063785017040150
31. Phuoc T. X., Laser-induced spark ignition fundamental and applications, *Optics and Lasers in Engineering*, 2006, vol. 44, no. 5, pp. 351–397. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2005.03.008
32. Raizer Yu. P., *Gas Discharge physics*, Berlin: Springer, 1997, 449 p.
33. Usoskin I. G., Desorgher L., Velinov P., Storini M., Fluckiger E. O., Butikofer R., Kovaltsov G. A., Ionization of the earth's atmosphere by solar and galactic cosmic rays, *Acta Geophys.*, 2009, vol. 57, no. 1, pp. 88–101. DOI: 10.2478/s11600-008-0019-9
34. Fedorov V. Yu., Kandidov V. P., A nonlinear optical model of an air medium in the problem of filamentation of femtosecond laser pulses of different wavelengths, *Optics and spectroscopy*, 2008, vol. 105, no. 2, pp. 306–313. DOI:10.1134/S0030400X08080183
35. Saifutdinov A. I., *Fluid and hybrid models of electric discharge in gases and their applications*, Ph. Doctor's thesis, Kazan, KAI, 2023. 592 p.
36. Kolesnichenko Yu. F., Khmara D., Afanas'ev S. Optimization of Laser-Pulse-Controlled MW Energy Deposition, AIAA Paper 2007-1228. DOI: 10.2514/6.2007-1228
37. Dobrov Yu. V., Lashkov V. A., Mashek I. Ch., Prokshin A. M., RENEV M. E., KHORONJUK R. S., Laser spark-free initiation of a subcritical microwave discharge, *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, vol. 97, no. 4, pp. 1068–1081.
38. Mesyats G. A., Similarity laws for pulsed gas discharges, *Physics-Uspekhi*, 2006, vol. 49, issue 10, pp. 1045–1065. <https://doi.org/10.1070/PU2006v049n10ABEH006118>

Статья поступила в редакцию 27 декабря 2024 г.