

## ВЛИЯНИЕ ТОКА И МЕЖЭЛЕКТРОДНОГО РАССТОЯНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОДОЛЬНО-ПОПЕРЕЧНОГО РАЗРЯДА В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ ВОЗДУХА

© 2023 г. Е. Е. Перевошиков<sup>а</sup>, А. А. Фирсов<sup>а,\*</sup>

<sup>а</sup> Объединенный институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН), Москва, Россия

\*e-mail: af@jiht.org

Поступила в редакцию 11.11.2022 г.

После доработки 04.02.2023 г.

Принята к публикации 15.02.2023 г.

Изучена проблема устойчивой работы продольно-поперечного разряда в сверхзвуковом потоке и его параметры. Рассмотрен продольно-поперечный дуговой разряд в воздушном потоке с параметрами  $M=2$ ,  $V\sim 500$  м/с,  $T_g=170$  К,  $P_{st}=22$  кПа. Для получения данных об изменении длины разряда, тока и напряжения во времени использовались высокоскоростная съемка и запись осциллограмм. Исследована динамика разряда постоянного тока и описаны связи между его геометрическими и электрическими параметрами. Эксперименты были направлены на получение подробных данных о влиянии межэлектродного расстояния и тока на длину разряда и, соответственно, на напряжение и выделяемую мощность, а также на определение типичных частот перепробоя в зависимости от параметров разряда. Также было определено падение напряжения в приэлектродных слоях.

*Ключевые слова:* сверхзвуковой поток, продольно-поперечный разряд, электрический разряд, плазменная аэродинамика

DOI: 10.31857/S0367292123600218, EDN: VFFSDA

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Значительный интерес к электрическим разрядам в высокоскоростных потоках возник достаточно давно в 1950–1960 гг. в связи с поиском методов управления потоками, а также подходов к интенсификации горения. Современное состояние этих областей, а также перспективы их дальнейшего развития были озвучены в работе [1].

Продольно-поперечный разряд [2, 3] – это классический дуговой разряд постоянного тока между двумя электродами, который уносится из межэлектродной области под действием некоторой силы в поперечном направлении. В классической дуге с горизонтальной ориентацией оси между электродами такой силой является тепловая конвекция. Также альтернативным вариантом может быть воздействие внешнего магнитного поля. При определенном соотношении параметров разряда (ток, межэлектродное расстояние и т. д.), с одной стороны, и интенсивности динамического воздействия, с другой стороны, канал разряда простирается вдоль направления воздействия на значительные расстояния, превышающие межэлектродное расстояние более чем на порядок. Однако в наблюдаемых экспериментах существует определенная предельная длина петли канала.

Первые работы по описанию продольно-поперечного разряда постоянного тока в сверхзвуковом потоке были выполнены в 1960-х гг. [4, 5], но из-за практических трудностей в проведении экспериментов и высоких требований к регистрирующей аппаратуре до настоящего времени не все свойства этого явления были описаны подробно. В последующих работах были оценены основные характеристики разряда, такие как температура, концентрация заряженных частиц [2, 6, 7], позднее современные высокоскоростные камеры позволили определить динамику формы разряда [8], также высокоскоростная видеозапись использовалась для изучения влияния скорости потока на ряд параметров [9, 10]. В недавней работе было показано, что в анодной части плазменного контура напряженность продольного электрического поля, а также концентрация и температура электронов превышают соответствующие значения в катодной части контура [11].

Помимо фундаментальных исследований, продольно-поперечный разряд рассматривался в прикладных работах. Например, импульсно-периодический продольно-поперечный разряд использовался для определения скорости сверхзвукового потока, поскольку скорость перемычки разряда близка к скорости потока [12]. Возмож-

ность использования разрядов такого типа для зажигания и стабилизации пламени в сверхзвуковом потоке была показана в ряде работ [3, 13–15]. Была оценена важность генерации продольно-поперечным разрядом атомарного кислорода для снижения времени задержки воспламенения смеси [16]. Установлено положительное влияние продольно-поперечного разряда на смешение топлива, поперечно инжектируемого в высокоскоростной поток [17, 18]; проведены эксперименты по управлению структурой сверхзвукового потока [19–21], в том числе в воздухозаборнике и канале с переменным сечением [22, 23]; а также по управлению силой/моментом для малых тел на поверхности [24–26].

Наряду с экспериментальными исследованиями были предприняты попытки моделирования разряда в потоке. Моделирование позволяет получить параметры разряда, которые трудно получить в экспериментах. Например, в одной из первых работ по моделированию продольно-поперечного разряда в двумерной постановке (плоскость моделирования совпадает с плоскостью разряда) было представлено изменение во времени пространственного распределения плотности тока [27], также в двухмерной постановке (плоскость моделирования поперек токового канала) было проведено моделирование участка разряда, движущегося под действием постоянного магнитного поля [28]. Для получения пространственных распределений характеристик разряда в сверхзвуковом потоке в исследовании [29] задача была сформулирована в осесимметричной постановке для малых токов (такой подход близок к трехмерному), а в [30] разряд в потоке моделировался с использованием трехмерного подхода, где однако модель плазмы была значительно проще. Также заслуживает внимания работа, в которой рассматривалась проблема моделирования повторного пробоя (перепробоя или ПП) разряда [31].

В работах по стабилизации фронта пламени с помощью продольно-поперечного разряда важными параметрами являются его длина, ток, напряжение и температура. Температура разряда в зависимости от тока была определена в эксперименте для более простой продольной конфигурации [32]. Влияние тока на длину разряда и частоту перепробоев разряда показано с помощью моделирования [33]. В данной экспериментальной работе была предпринята попытка связать основные параметры разряда с целью последующего выбора оптимальных параметров для использования в работах по плазменно-стимулированному горению.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Экспериментальное исследование разряда постоянного тока в сверхзвуковом потоке вблизи стенки проводилось в сверхзвуковой аэродинамической трубе ИАДТ-50 ОИВТ РАН. Экспериментальная секция представляет собой прямоугольную трубу с внутренними размерами  $60 \times 72$  мм. Эксперименты проводились в сверхзвуковом потоке со следующими параметрами: число Маха  $M = 2$  (скорость потока  $V \sim 500$  м/с), статическое давление  $P_{st} = 22$  кПа, температура газа  $T_g = 170$  К. В таких условиях на данной установке проводится большинство экспериментов по исследованию разрядов в высокоскоростных потоках, управлению течением с помощью плазмы и плазменно-стимулированному горению. Разряд создавался между двумя медными цилиндрическими электродами диаметром 1 мм, вмонтированными заподлицо в керамическую стенку по линии, перпендикулярной потоку. Межэлектродное расстояние определяется между их центрами (5 или 6 мм). Питание разряда осуществлялось от источника напряжения 5 кВ через балластный резистор, ограничивающий ток разряда. При разрядном промежутке 6 мм средний ток составил 1.7 А при 2 кОм, 2.3 А при 1.5 кОм, 3.6 А при 1 кОм и 5.9 А при 0.5 кОм. Стоит уточнить, что ток в таком разряде в эксперименте меняется во времени незначительно, так как сопротивление плазмы меньше балластного сопротивления. Изменение длины разряда приводит к изменению сопротивления плазмы, изменению общего сопротивления цепи и, как следствие, умеренному изменению тока разряда. Поэтому такой разряд иногда называют квази-DC (quasi-DC) [34]. В ходе экспериментов регистрировалась зависимость тока разряда и напряжения от времени. Также в экспериментах проводилась высокоскоростная видеозапись разряда (экспозиция 1–4 мкс) с помощью камеры Photron S9.

Всего в этой серии экспериментов было проведено 24 опыта с различными конфигурациями. Исследования разряда проводились при различных межэлектродных расстояниях (5 и 6 мм), а также при различных токах разряда.

Процесс развития разряда можно описать следующим образом (рис. 1). Разряд горит, постепенно увеличиваясь в длину, так как перемычка сдувается потоком, при этом расстояние между двумя ветвями токового канала незначительно увеличивается с удалением от электродов. Затем, когда разряд достигает определенной длины, между продольными участками канала тока начинает формироваться новая перемычка (происходит перепробой), в результате чего ток через старый канал падает до нуля, и плазма в нем распадается. При удлинении канала может происходить существенное изменение формы разряда, но

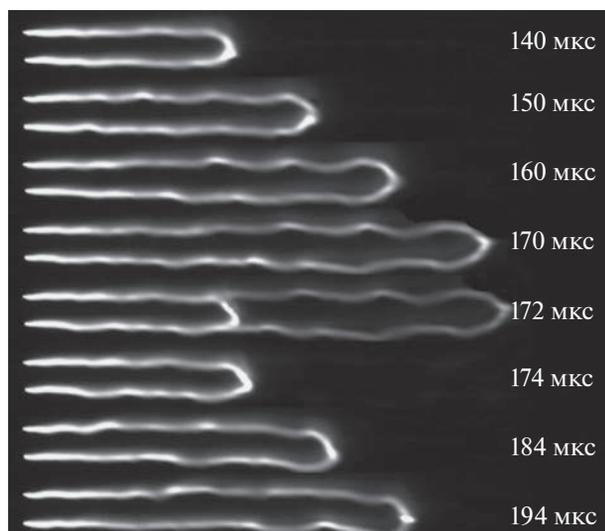


Рис. 1. Эволюция разряда во времени и визуализация повторного разряда.

его разрушение происходит в абсолютном большинстве случаев только при образовании новой перемычки. Однако во время экспериментов, представленных в [17], процесс угасания канала из-за значительного увеличения длины и сопротивления плазмы наблюдался довольно часто; таким образом, баланс между процессом угасания с последующим зажиганием нового разряда и процессом перепробоя разряда зависит от условий и геометрии процесса. Скорость движения перемычки или удлинения разряда в основном зависит от скорости потока воздуха и довольно точно совпадает с самой скоростью потока в соответствующем слое [12]. В нашей работе скорость продольного распространения перемычки была определена экспериментально. Независимо от тока разряда и межэлектродного расстояния (в пределах погрешности) скорость перемычки составила  $415 \pm 5$  м/с. По снимкам разряда на виде сбоку перемычка обычно располагалась на расстоянии 0.5 мм от стенки канала. Как показал PIV-метод, скорость потока в тестовом сечении составила 510 м/с, толщина пограничного слоя не превышает 2 мм, а диапазон скоростей 410–420 м/с точно соответствует расстоянию 0.5–0.6 мм от стенки канала. Таким образом, наши эксперименты подтверждают выводы, сделанные ранее в [12].

Форма разряда также имеет свои особенности. Прежде всего, это увеличение расстояния между двумя ветвями разряда. Можно предположить, что это происходит из-за образования вокруг ветвей тепловых конусов, которые увеличиваются вниз по потоку. Холодный газ, текущий между ветвями, немного вытесняет эти тепловые конусы наружу, т. е. газ приобретает поперечную скорость.

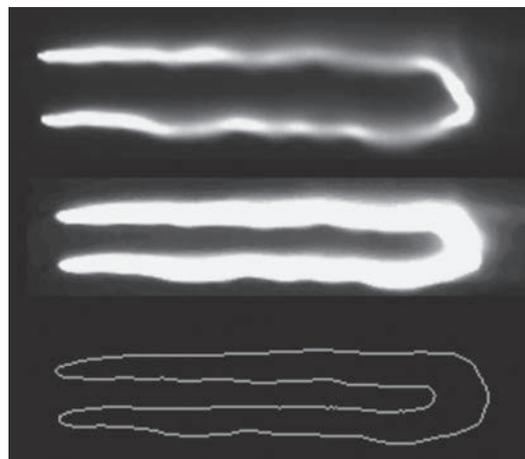


Рис. 2. Сверху вниз: оригинал, обработанный кадр, выделенные контуры.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

#### 3.1. Получение данных о повторных перепробоях

Под длиной разряда в данной работе понимается длина петли вдоль потока; длина канала разряда в два раза больше. Для определения связи между длиной разряда и электрическими характеристиками была определена длина разряда на каждом кадре высокоскоростной съемки и получена зависимость длины разряда от времени. Определение зависимости длины разряда от времени проводилось с помощью программных средств на языке Python, в частности с использованием библиотеки компьютерного зрения OpenCV2. На рис. 2 показан пример обработки одного кадра видео. Сначала к исходному изображению применяется фильтр, повышающий яркость полутонов изображения с целью удаления пробелов белого цвета, затем выполняется обнаружение краев объектов алгоритмом “Canny Edge Detector” (автор John F. Canny). Вычисляются длины контуров, случайные контуры исключаются по критерию  $L < 0.05L_{\max}$ . Методика повторяется для каждого кадра, в результате чего получается зависимость длины разряда от времени.

Синхронизованная с осциллограммами тока и напряжения зависимость длины разряда от времени представлена на рис. 3. Видно, что рост длины разряда сопровождается увеличением напряжения разряда и незначительным уменьшением тока разряда.

#### 3.2. Анализ и обсуждение данных

В данной работе мы проанализировали данные о напряжении пробоя. На рис. 4 представлен массив точек, характеризующих каждый пробой: напряжение до пробоя и напряжение после про-

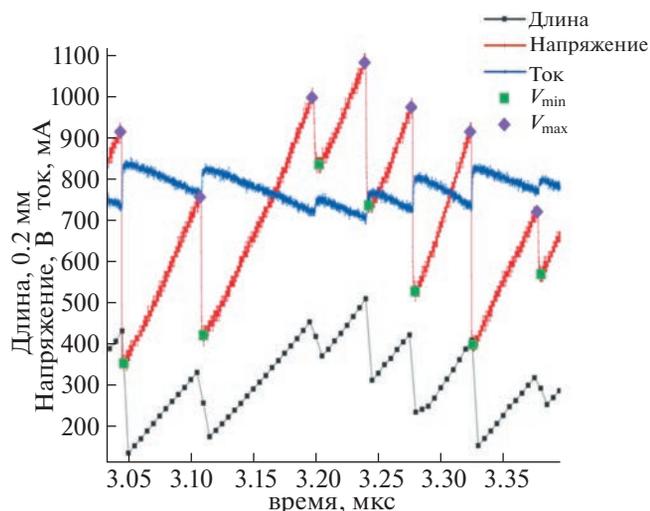


Рис. 3. Синхронизированные осциллограммы напряжения, тока и длины петли разряда.

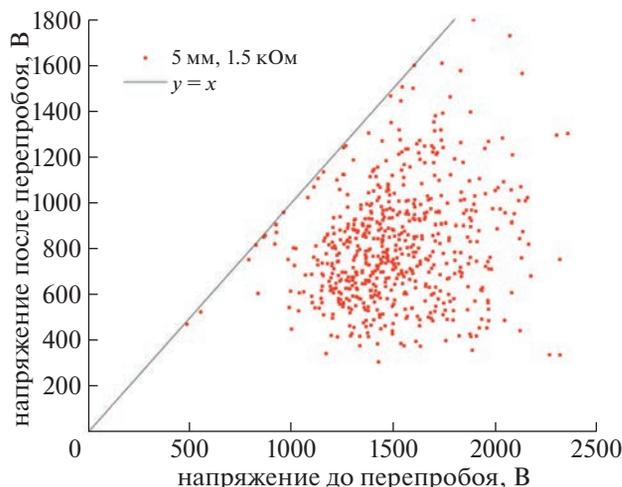


Рис. 4. Пример диаграммы напряжения до и после пробоя.

боя. Видно, что точки образуют некоторое облако, при этом ниже определенного напряжения “после пробоя” ~300 В точек нет, что свидетельствует об отсутствии пробоя разряда непосредственно вдоль линии, соединяющей два электрода. Аналогично выглядят графики для тока и длины разряда.

Из анализа различий в поведении разрядных характеристик путем построения статистических диаграмм, пример которых приведен на рис. 5, можно сделать следующие выводы: при фиксированном токе разряда увеличение межэлектродного расстояния приводит к увеличению характерной длины разряда как до, так и после пробоя (рис. 5а) (эта тенденция согласуется с ранее пред-

ставленным результатом для близкой конфигурации, опубликованным в [35]) и, следовательно, к увеличению напряжения. Это очевидный результат, связанный с тем, что расстояние между частями канала тока увеличилось, и теперь для повторного пробоя требуется большее напряжение, т.е. разряд должен растянуться на большую длину. При фиксированном межэлектродном расстоянии увеличение тока разряда приводит к увеличению длины разряда (рис. 5б) (это согласуется с ранее полученным результатом для близкой конфигурации, опубликованным в [35]), но напряжение значительно уменьшается (см. рис. 6), поскольку разряд имеет падающую вольт-амперную характеристику: как показано в [36], при из-

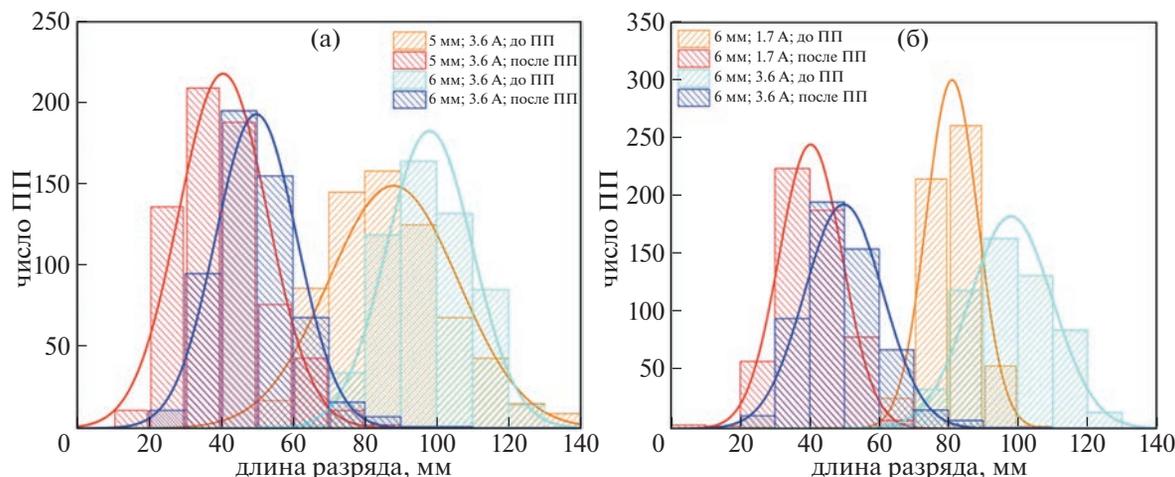


Рис. 5. Статистика длины петли разряда до и после пробоя от межэлектродного расстояния (а) и тока (б). ПП здесь и ниже — перепробой.

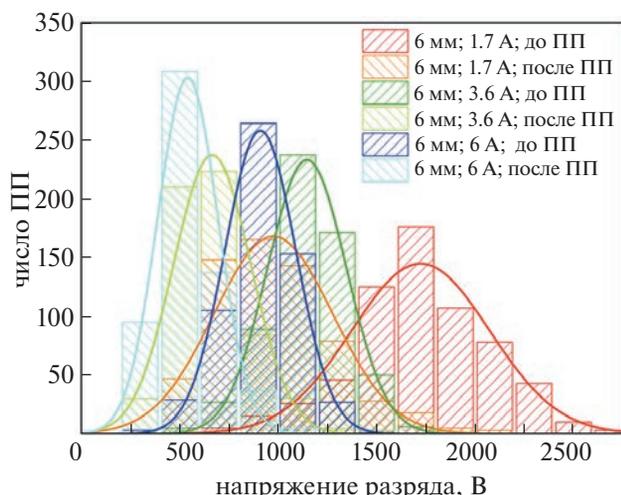


Рис. 6. Статистика разрядного напряжения до и после пробоя тока.

менении тока разряда от 1 до 6 ампер напряжение на единицу длины падает в два раза.

При рассмотрении зависимости напряжения разряда от его длины (рис. 7) можно сделать следующие выводы: при увеличении тока разряда на единицу длины разряда приходится меньшее напряжение, а при рассмотренных токах длина разряда и напряжение связаны линейной зависимостью. Однако хорошо видно, что во всех рассмотренных случаях она не проходит через точку с координатами (0, 0), и нулевая длина разряда соответствует потенциалу 100–150 В, это значение можно считать суммарной оценкой катодного и анодного падений напряжения.

Последним важным параметром, рассмотренным в данной работе, является частота пробоя разряда. Была оценена частота пробоя и ее зависимость от параметров разряда – тока и межэлектродного расстояния. Осциллограммы напряжения анализировались с помощью преобразования Фурье, из результатов этого анализа можно сделать вывод, что моменты пробоя не имеют какой-то выделенной частоты или полосы частот – частотный спектр распределен равномерно. Первоначальная гипотеза о том, что появление нового канала тока имеет некоторую ярко выраженную периодичность, не подтвердилась, в отличие от работы [9], где авторы приводят зависимость частоты пульсаций разряда от тока.

При статистическом анализе временных характеристик разряда было обнаружено (рис. 8), что типичное время между повторными пробоями имеет статистический максимум и изменяется в зависимости от тока разряда и расстояния между электродами. При расстоянии между электродами 6 мм типичное время составляет ~65 мкс для 1.7 А (15.4 кГц), ~78 мкс для 3.6 А (12.8 кГц) и

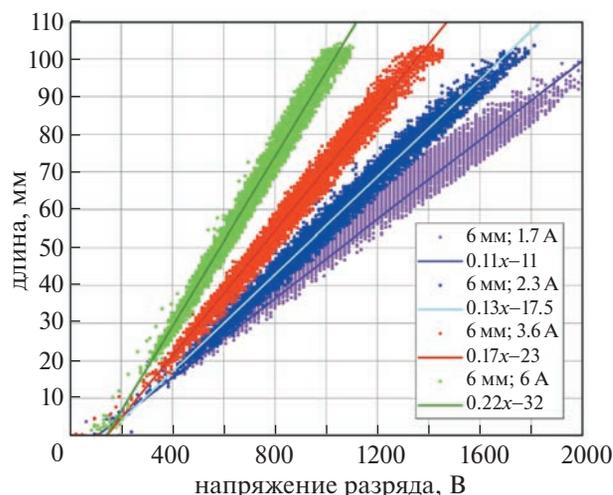


Рис. 7. Зависимость длины петли разряда от его напряжения при различных токах.

~86 мкс для 6 А (11.6 кГц), а при расстоянии между электродами 5 мм – 58 мкс для 3.6 А (17.2 кГц). Увеличение тока при фиксированном межэлектродном расстоянии приводит к снижению частоты повторного пробоя разряда – скорость перемычки в первую очередь связана со скоростью потока, увеличение тока приводит к снижению удельного напряжения, т. е. для достижения напряжения повторного пробоя требуется большая длина разряда; время перемещения перемычки увеличивается, а частота снижается. Увеличение межэлектродного расстояния при фиксированном токе означает, что для повторного пробоя требуется большее напряжение, а значит, и большая длина. Таким образом, перемычка будет двигаться дольше, а частота будет ниже.

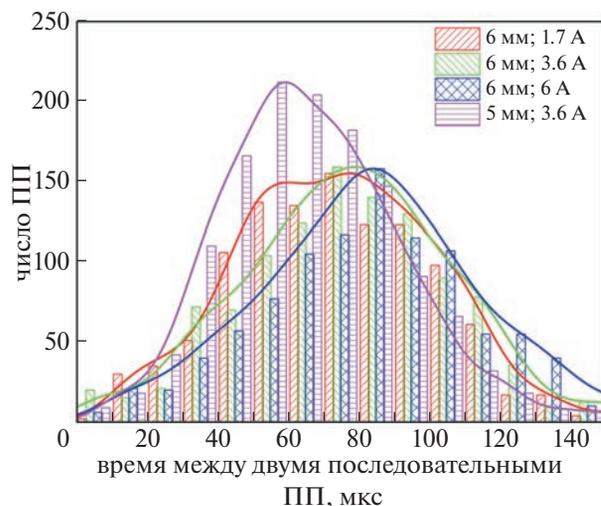


Рис. 8. Среднее время между перепробоями.

## 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе было исследовано влияние конфигурации электродов и тока разряда на его длину и напряжение, а также на динамические параметры возникновения нового токового канала. Было показано, что расстояние между электродами и ток разряда существенно влияют на параметры разряда.

Так, при фиксированном токе разряда  $\sim 3.6$  А увеличение межэлектродного расстояния с 5 до 6 мм приводит к увеличению максимальной длины разряда на 15–20 мм, длины разряда сразу после повторного пробоя на 10 мм (т. е. повторный пробой смещается вниз от электродов) и напряжения на  $\sim 250$  В и, соответственно, уменьшению частоты повторного пробоя с 17.2 кГц до 12.8 кГц.

При фиксированном межэлектродном расстоянии, например, 6 мм, увеличение тока разряда с 1.7 до 3.6 А приводит к уменьшению частоты повторного пробоя с 15.4 до 12.8 кГц, увеличению длины разряда на  $\sim 20$  мм, но из-за падающей вольт-амперной характеристики максимальное напряжение на разряде уменьшается на  $\sim 500$  В. Падение напряжения на приэлектродных слоях разряда (катодное плюс анодное падение напряжения) в рассматриваемых условиях составило 100–150 В.

Эти результаты могут быть использованы для выбора разряда с оптимальными параметрами в задачах плазменной аэродинамики и плазменно-стимулированного горения. Так, исходя из выводов работы [36] для плазменно-стимулированного горения в сверхзвуковом потоке с параметрами  $M = 2$ ,  $P_{st} = 22$  кПа,  $T_0 = 300$  К, оптимальным должен быть рассмотренный в данной работе продольно-поперечный разряд с током около 3 А; такой ток обеспечивает оптимальное соотношение между вводимой энергией и концентрацией атомарного кислорода. Однако разряд должен быть достаточно длинным, чтобы вложить необходимую мощность и обеспечить более длительное взаимодействие разряда с элементарным объемом топливной смеси [14]. Таким образом, поскольку существует оптимальный ток (т. е. ток фиксирован), требуемая длина и мощность могут быть достигнуты путем увеличения межэлектродного расстояния.

Финансирование: Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 21-79-10408.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Poggie J., McLaughlin T., Leonov S. // *Aerospace-Lab J.* 2015. № 10. P. AL10-01. <https://doi.org/10.12762/2015.AL10-01>
2. Ershov A.P., Surkont O.S., Timofeev I.B., Shibkov V.M., Chernikov V.A. // *High Temperature.* 2004. V. 42.

3. Firsov A., Savelkin K.V., Yarantsev D.A., Leonov S.B. // *Philos. Trans. R. Soc. A.* 2015. V. 373. P. 2048. <https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0337>
4. Alferov V.I., Bushmin A.S. // *Soviet Phys. JETP.* 1963. V. 17. P. 1190.
5. Alferov V.I., Bushmin A.S., Kalachev B.V. // *Soviet Phys. JETP.* 1967. V. 24. P. 859.
6. Ershov A.P., Kalinin A.V., Surkont O.S., Timofeev I.B., Shibkov V.M., Chernikov V.A. // *High Temperature.* 2004. V. 42. P. 865. <https://doi.org/10.1007/S10740-005-0029-0>
7. Bychkov V.L., Grachev L.P., Esakov I.I., Ravaev A.A., Khodataev K.V. // *Technical Phys.* 2004. V. 49. P. 833. <https://doi.org/10.1134/1.1778855>
8. Шибков В.М., Шибкова Л.В., Логунов А.А. // *Физика плазмы.* 2017. Т. 43. № 3. С. 314. Shibkov V.M., Shibkova L.V., Logunov A.A. // *Plasma Phys. Rep.* 2017. V. 43. P. 373. <https://doi.org/10.1134/S1063780X17030114>
9. Шибков В.М., Шибкова Л.В., Логунов А.А. // *Физика плазмы.* 2018. Т. 44. № 8. С. 661. Shibkov V.M., Shibkova L.V., Logunov A.A. // *Plasma Phys. Rep.* 2018. V. 44. P. 754. <https://doi.org/10.1134/S1063780X18080056>
10. Шибков В.М., Корнев К.Н., Логунов А.А., Нестеренко Ю.К. // *Физика плазмы.* 2022. Т. 48. С. 657–663. = Shibkov V.M., Kornev K.N., Logunov A.A., Nesterenko Yu.K. // *Plasma Phys. Rep.* 2022. V. 48. P. 806–811. <https://doi.org/10.1134/S1063780X22700258>
11. Shibkova L.V., Shibkov V.M., Logunov A.A., Dolbnya D.S., Kornev K.N. // *High Temperature.* 2020. V. 58. № 6. P. 754. <https://doi.org/10.1134/S0018151X2006019X>
12. Ershov A.P., Kamenshchikov S.A., Kolesnikov E.B., Logunov A.A., Firsov A.A., Chernikov V.A. // *Fluid Dynamics.* 2008. V. 43. P. 605. <https://doi.org/10.1134/S0015462808040133>
13. Leonov S.B., Savelkin K.V., Firsov A.A., Yarantsev D.A. // *High Temperature.* 2010. V. 48. P. 896. <https://doi.org/10.1134/S0018151X10060179>
14. Firsov A.A., Kolosov N.S. // *J. Phys. Conf. Ser.* 2021. V. 2100. P. 012017. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2100/1/012017>
15. Leonov S.B., Elliott S., Carter C., Haupt A., Lax P., Ombrrello T. // *Exp. Therm. Fluid Sci.* 2021. V. 124. P. 110355. <https://doi.org/10.1016/J.EXPTHERMFLUSCI.2021.110355>
16. Битюрин В.А., Добровольская А.С., Бочаров А.Н., Фирсов А.А. // *Физика плазмы.* 2023. Т. 49. № 5. = Bityurin V.A., Dobrovolskaya A.S., Bocharov A.N., Firsov A.A. // *Plasma Phys. Rep.* 2023. V. 49. № 5. <https://doi.org/10.31857/S0367292123600267>
17. Efimov A.V., Firsov A.A., Kolosov N.S., Leonov S.B. // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2020. V. 29. P. 07LT01. <https://doi.org/10.1088/1361-6595/AB9C94>
18. Firsov A.A., Efimov A.V., Kolosov N.S., Moralev I.A., Leonov S.B. // *J. Phys. Conf. Ser.* 2021. V. 2100. P. 012007. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2100/1/012007>

19. *Tang M., Wu Y., Wang H.* // *Acta Astronaut.* 2022. V. 198. P. 577.  
<https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2022.07.010>
20. *Ma X., Fan J., Wu Y., Liu X., Xue R.* // *Phys. Fluids.* 2022. V. 34. P. 086102.  
<https://doi.org/10.1063/5.0095487>
21. *Andrews P., Lax P., Leonov S.* // *Energies (Basel).* 2022. V. 15. P. 7104.  
<https://doi.org/10.3390/EN15197104>
22. *Falempin F., Firsov A.A., Yarantsev D.A., Goldfeld M.A., Timofeev K., Leonov S.B.* // *Exper. Fluids.* 2015. V. 56. P. 54.  
<https://doi.org/10.1007/S00348-015-1928-4>
23. *Ferrero A.* // *Aerospace.* 2020. V. 7. P. 32.  
<https://doi.org/10.3390/aerospace7030032>
24. *Watanabe Y., Elliott S., Firsov A., Haupt A., Leonov S.* // *J. Phys. D Appl. Phys.* 2019. V. 52. P. 444003.  
<https://doi.org/10.1088/1361-6463/AB352F>
25. *Hongyu W., Feng X., Jie L., Cheng Y., Yanguang Y.* // *Acta Astronaut.* 2021. V. 187. P. 325.  
<https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2021.06.049>
26. *Gong G., Li Y., Wang Y., Kuang P.* // *AIP Adv.* 2020. V. 10. P. 055212.  
<https://doi.org/10.1063/1.5145235>
27. *Dvinin S.A., Ershov A.P., Timofeev I.B., Chernikov V.A., Shibkov V.M.* // *High Temperature.* 2004. V. 42. P. 171.  
<https://doi.org/10.1023/B:HITE.0000026147.82949.36>
28. *Moralev I., Kazanskii P., Bityurin V., Bocharov A., Firsov A., Dolgov E., Leonov S.* // *J. Phys. D Appl. Phys.* 2020. V. 53. P. 425203.  
<https://doi.org/10.1088/1361-6463/AB9D5A>
29. *Bityurin V.A., Bocharov A.N., Kuznetsova T.N.* // *J. Phys. Conf. Ser.* 2020. V. 1698. P. 012027.  
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1698/1/012027>
30. *Tarasov D.A., Firsov A.A.* // *J. Phys. Conf. Ser.* 2021. V. 2100. P. 012015.  
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/2100/1/012015>
31. *Bourlet A., Labaune J., Tholin F., Pechereau F., Vincent-Randonnier A., Laux C.O.* // *AIAA Sci. Technol. Forum Exposition, AIAA SciTech Forum 2022.* P. 2022-0831.  
<https://doi.org/10.2514/6.2022-0831>
32. *Трошкин П.С., Фирсов А.А.* // *Физика плазмы.* 2023. Т. 49. № 5. = *Troshkin R.S., Firsov A.A.* // *Plasma Phys. Rep.* 2023. V. 49. № 5.  
<https://doi.org/10.31857/S036729212360022X>
33. *Битюрин В.А., Бочаров А.Н., Добровольская А.С., Попов Н.А., Фирсов А.А.* // *Физика плазмы.* 2023. Т. 49. № 5. *Bityurin V.A., Bocharov A.N., Dobrovolskaya A.S., Popov N.A., Firsov A.A.* // *Plasma Phys. Rep.* 2023. V. 49. № 5.  
<https://doi.org/10.31857/S0367292123600255>
34. *Haupt A., Hedlund B., Leonov S., Ombrello T., Carter C.* // *Exp. Fluids.* 2017. V. 58. P. 25.  
<https://doi.org/10.1007/S00348-016-2295-5>
35. *Logunov A.A., Kornev K.N., Shibkova L.V., Shibkov V.M.* // *High Temperature.* 2021. V. 59. P. 19.  
<https://doi.org/10.1134/S0018151X21010119>
36. *Firsov A., Bityurin V., Tarasov D., Dobrovolskaya A., Troshkin R., Bocharov A.* // *Energies (Basel).* 2022. V. 15. P. 7015.  
<https://doi.org/10.3390/en15197015>