

04
**Исследование поведения разряда в коаксиальном ускорителе
плазменной струи**

© А.В. Воронин,¹ В.К. Гусев,¹ Я.А. Герасименко²

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,
195251 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: voronin.mhd@mail.ioffe.ru

(Поступило в Редакцию 17 мая 2012 г.)

Проведено исследование поведения разряда в коаксиальном ускорителе плазменной струи с импульсной подачей рабочего газа, высвобождаемого электрическим разрядом из порошка гидрида титана. Оптическим методом через узкую щель, вырезанную вдоль наружного электрода, регистрировалось излучение разряда внутри ускорителя в зависимости от времени с помощью стрик-камеры Vifo Company K008. Устойчивая работа источника с наибольшей кинетической энергией чистой водородной плазменной струи была достигнута при относительно однородном свечении разряда вдоль ускорителя в течение всего импульса тока. Напротив, локальное горение разряда на выходе или входе ускорителя значительно загрязняли разряд примесями, а кинетическая энергия плазменной струи уменьшалась на порядок. Наибольшая энергия струи плазмы была получена с полярностью на электродах, аналогичной плазменному фокусу.

Введение

Потоки плотной плазмы с большой кинетической энергией представляют большой интерес для решения прикладных и фундаментальных задач. Ускорители плазмы или плазменные пушки используются в качестве основного источника в этих исследованиях [1]. С использованием источников плотной плазмы успешно проводятся исследования по подпитке топливом установок с магнитным удержанием плазмы, облучению конструкционных материалов первой стенки будущего термоядерного реактора, а также нагреву плазмы при столкновении встречно-направленных потоков [2–4]. В таких источниках (типа пушки Маршалла) плазма создается и ускоряется электрическим разрядом между электродами с коаксиальной геометрией [5]. Теоретическая модель токовой перемычки для описания процесса в импульсном ускорителе была сформулирована в работе [6], а затем подробно рассмотрена в монографии [7]. На практике такая модель не всегда работает, а поведение разряда оказывается более сложным, например при „квасистационарном“ режиме, когда время пролета частиц плазмы через ускоритель меньше длительности тока разряда. Неконтролируемое горение разряда в процессе разгона плазмы может существенно ограничивать энергетические характеристики такого источника. Некоторые экспериментальные результаты движения ионизационного фронта в квазистационарном режиме работы пушки Маршалла были представлены в монографии [8]. Колебания фронта ионизации, снятые высокоскоростной камерой (СФР-граммы) через узкую продольную щель ускорителя, были обнаружены при токе разряда более 40 кА. Природу колебаний автор

объясняет выносом и перестройкой линий тока в ускорителе.

В настоящей работе представлены новые результаты исследований коаксиального ускорителя плотной плазменной струи с оригинальной импульсной подачей рабочего газа, высвобождаемого электрической активацией гранул гидрида титана (разрядом через гранулы) в режиме, когда длительность тока разряда ускорителя ($15 \mu\text{s}$) превышает длительность разгона плазменного потока ускорителем ($1-3 \mu\text{s}$) [9]. Оптическим методом с помощью стрик-камеры изучалось поведение фронта ионизации в ускорителе. Электротехническим методом с помощью светодиодных датчиков тока ранее уже проводилось изучение динамики движения слоя плазмы внутри такого ускорителя [10]. Представленные новые и ранее полученные результаты поведения динамики разряда в коаксиальном ускорителе хорошо дополняют друг друга. В ходе исследований была найдена геометрия электродов, позволяющая увеличить кинетическую энергию водородной плазменной струи без примесей.

1. Методика

Источник струи исследовался на стенде и представлял собой модификацию коаксиального плазменного ускорителя с интенсивным напуском газа, высвобождаемым электрической активацией гранул гидрида титана [9]. Электроды ускорителя длиной 0.3 м были изготовлены из нержавеющей стали. Диаметры наружного и центрального электродов составляли 50 и 10 мм соответственно. Зазор между электродами на входе ускорителя варьировался от 8 до 20 мм. Энергия конденсаторного накопителя составляла 1.5–2.5 кДж. Энергия протонов в струе достигала 300 эВ. Благодаря интенсивному на-

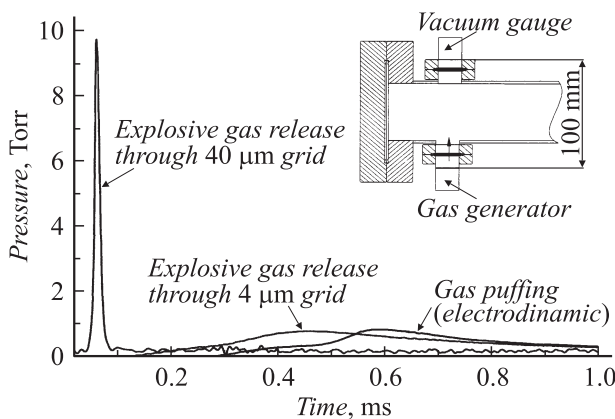


Рис. 1. Эволюция давления водорода в ускорителе после напуска газа импульсным клапаном электродинамической системы и разрядом через гранулы гидрида титана.

пуску газа в ускоритель высвобождаемым разрядом из гранул гидрида титана плотность ионизированной чистой водородной плазмы достигала $4 \cdot 10^{22} \text{ m}^{-3}$.

Для сравнения эффективностей заполнения ускорителя газом в различных условиях были проведены исследования динамики поступления газа от импульсного клапана электродинамической системы и электрической активации гранул гидрида титана. Гранулы отделены от ускорителя сетчатым фильтром. Давление газа в ускорителе измерялось ионизационным датчиком давления ПМИ-10, адаптированным к импульсному режиму работы (рис. 1). На графике видно, что наиболее быстрый напуск газа в ускоритель создавался высвобождением водорода из гранул гидрида титана. Скорость напуска водорода увеличивалась до 10^{19} атомов за $50 \mu\text{s}$ че-

рез фильтр с ячейкой сетки $40 \mu\text{s}$. Сетка с ячейкой более $40 \mu\text{m}$ не применялась из-за увеличения потока примесей в ускоритель из гранул.

С целью получения устойчивой работы источника с максимальной кинетической энергией чистой плазменной струи исследовалась динамика развития разряда в коаксиальном ускорителе с помощью стрик-камеры Vifo Company K008. Через узкую щель, вырезанную вдоль образующей наружного цилиндрического электрода, регистрировалось излучение разряда внутри ускорителя в зависимости от времени (рис. 2, *a*). Длина щели от входа (нижняя часть) до выхода (верхняя часть) ускорителя составляла 300 мм. Зависимость свечения щели во времени отображалась в горизонтальном направлении (рис. 2, *b*). Скорость движения ионизационного фронта плазмы измерялась по отношению длины ускорителя к интервалу времени между началом излучения, возникающего на входе и на выходе ускорителя. Спектральный состав плазмы на выходе ускорителя контролировался обзорным (AvaSpec 3648) спектрометром. Кинетическая энергия потока плазмы измерялась калориметром, выполненным из титановой фольги в виде конуса высотой 370 мм, входным диаметром 184 мм и закрепленными 20 термопарами на его поверхности.

2. Результаты исследований

В ходе исследований было обнаружено, что струя чистой водородной плазмы с наибольшей кинетической энергией генерируется разрядом, в котором наблюдается достаточно однородное свечение вдоль ускорителя на протяжении всего импульса тока. Были определены параметры электродов, обеспечивающие устойчивую ге-

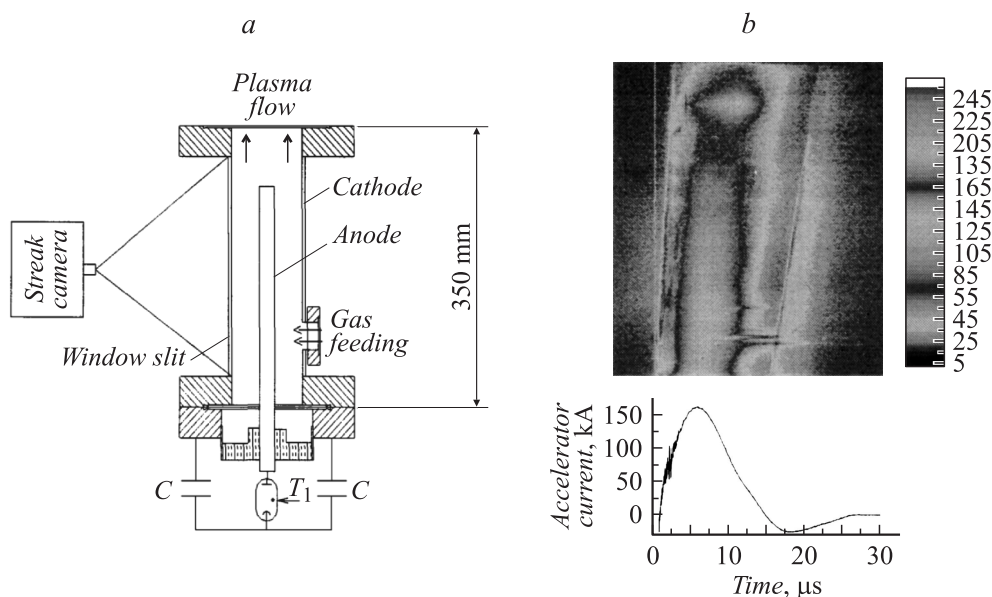


Рис. 2. Схема регистрации излучения в ускорителе (*a*), эволюция свечения и тока разряда (*b*). Энергия конденсаторного накопителя 1620 J. Кинетическая энергия плазменной струи, измеренная калориметром, составляла 178 J (температура калориметра 10°). Скорость переднего фронта разряда 180 km/s. Разряд 1862.

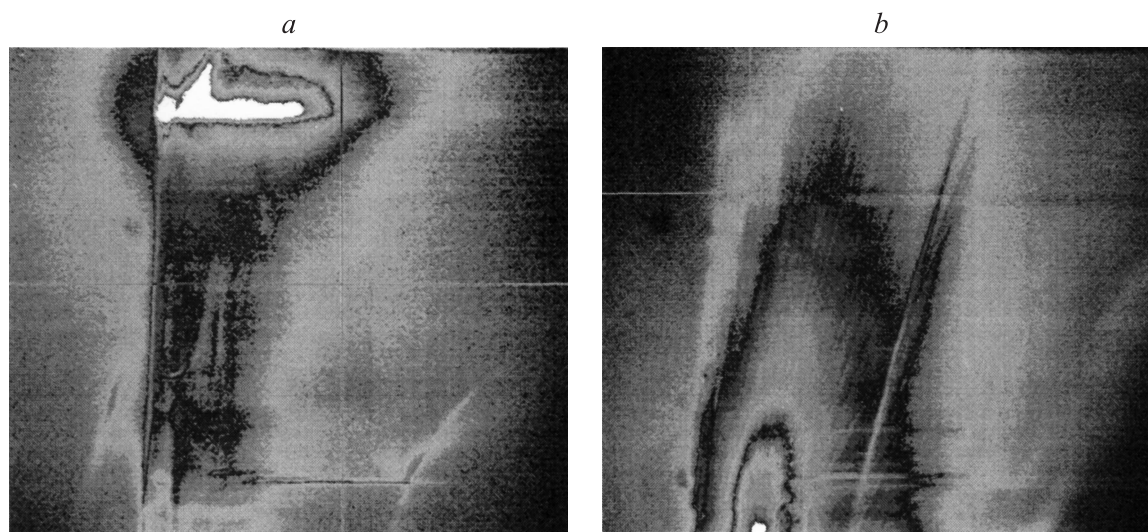


Рис. 3. Эволюция излучения разряда в ускорителе: *a* — ток протекает на выходе ускорителя (разряд 1719, температура калориметра 1° , скорость движения переднего фронта разряда ~ 240 km/s), *b* — ток протекает на входе ускорителя (разряд 1807, температура калориметра 1° , скорость движения плазмы ~ 70 km/s).

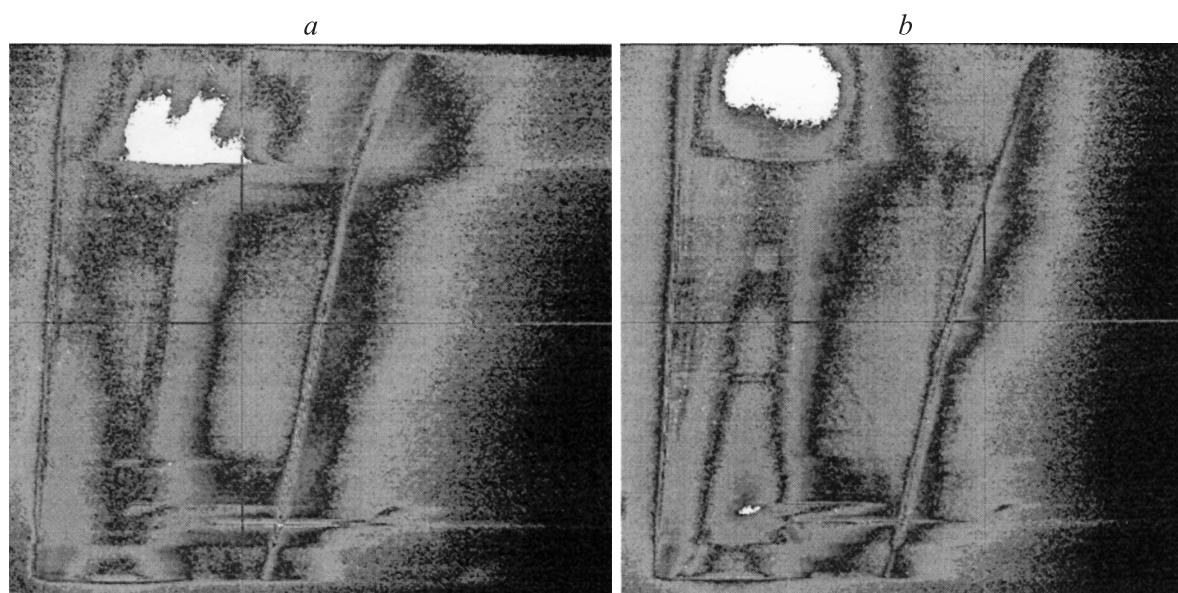


Рис. 4. Эволюция излучения разряда в ускорителе: *a* — полярность электродов, аналогичная плазменному фокусу (разряд 1558, температура калориметра 7° , скорость движения переднего фронта разряда ~ 164 km/s), *b* — полярность электродов, обратная плазменному фокусу (разряд 1562, температура калориметра 6° , скорость движения плазмы 147 km/s).

нерацию такой плазмы. Опытным путем выбирался зазор между наружным и центральным электродами на входе ускорителя из условий наибольшей кинетической энергии струи. Оптимальный зазор на входе в ускоритель оказался примерно в 2 раза меньше, чем на выходе. Эволюция излучения разряда в ускорителе, наблюдаемого через щель в цилиндрическом электроде, при оптимальных параметрах электродов представлена на рис. 2, *b*. Видно достаточно однородное свечение разряда вдоль ускорителя на протяжении всего импульса тока, амплитуда которого могла достигать более 200 kA.

При распределенном (не локальном) горении разряда уменьшался поток примесей с электродов в десятки раз. На выходе из ускорителя уменьшалась интенсивность излучения спектра до уровня порога чувствительности спектрометра, что доказывает полную ионизацию водородной плазмы. Скорость переднего фронта разряда (180 km/s) на разгонном участке оказалась примерно постоянной. Вероятно, масса плазмы увеличивалась по мере движения разряда к выходу ускорителя, при этом калориметр регистрировал наибольшую энергию потока плазменной струи.

Напротив, при произвольном зазоре между электродами наблюдалось локальное горение разряда на выходе или входе ускорителя, что значительно загрязняло разряд примесями, а кинетическая энергия плазменной струи уменьшалась на порядок (рис. 3). При равномерном зазоре между электродами скорость переднего фронта разряда могла увеличиваться до величины более 240 km/s (рис. 3, *a*), а при малом зазоре (менее 8 mm) на входе в ускоритель скорость составляла менее 70 km/s (рис. 3, *b*).

Проведены исследования эволюции разряда с различной полярностью емкостного накопителя (рис. 4). Наибольшая энергия струи плазмы была получена с полярностью на электродах, аналогичной плазменному фокусу (рис. 4, *a*). Интенсивное излучение могло возникать на торце центрального электрода. Меньшие значения скорости плазмы и температуры калориметра были получены с полярностью на электродах, обратной плазменному фокусу. В некоторых случаях излучение разряда в виде шара возникало на некотором удалении от центрального электрода.

В целом наблюдение излучения разряда в ускорителе через боковую щель с помощью стрик-камеры позволило детально изучить процесс формирования потока плазмы и обеспечить работу источника с максимальной кинетической энергией при наилучшей чистоте плазменной струи.

Заключение

Оптическим методом с помощью стрик-камеры Vifo Comrapu K008 проведены исследования динамики развития разряда в коаксиальном ускорителе плазменной струи с импульсной подачей рабочего газа, высвобождаемого электрической активацией гранул гидроксида титана.

В ходе исследований были найдены параметры электродов, обеспечивающие устойчивую генерацию струи чистой водородной плазмы. Оптимальный зазор между наружным и центральным электродами на входе в ускоритель оказался меньше, чем на выходе, и выбирался экспериментально из условий наибольшей кинетической энергии плазменной струи. Наибольшая энергия струи плазмы была получена с полярностью на электродах, аналогичной плазменному фокусу.

Устойчивая работа источника с большой кинетической энергией чистой водородной плазменной струи была достигнута при относительно однородном свечении разряда вдоль ускорителя на протяжении всего импульса тока. Напротив, в случае, когда регистрировалось локальное горение разряда на входе или выходе ускорителя, разряд значительно загрязнялся примесями, а кинетическая энергия плазменной струи уменьшалась на порядок.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ 11-08-00813-а и научного проекта МАГАТЭ Investigations of Materials under High Repetition and Intense Fusion-relevant Pulses F1.30.13, а также при поддержке президиума РАН, Министерства науки и образования, ГК № 16.552.11.7002, 16.518.11.7003, 11G34.31.0041.

Список литературы

- [1] Гришин С.Д., Лесков Л.В., Козлов Н.П. Плазменные ускорители. М.: Машиностроение, 1983. 115 с.
- [2] Raman R., Martin F., Quirion B. et al. // Phys. Rev. Lett. 1994. Vol. 73. P. 3101.
- [3] Safronov V.M., Arkhipov N.I., Klimov N.S. et al. // Problems of atomic science and technology. N 6. Vol. 51. Series: Plasm. Phys. 2010. Vol. 16. P. 51–53.
- [4] Энциклопедия низкотемпературной плазмы: Серия Б „Справочные приложения, базы и банки данных“. Т. IX-3. Радиационная плазмодинамика / Гл. ред. В.Е. Фортов; ред. В.А. Грибков. М.: Янус-К, 2007. 590 с.
- [5] Marshall J. // Phys. Fluids. 1960. Vol. 3. P. 134–135.
- [6] Арцимович Л.А., Лукьянов С.Ю., Подгорный И.М. // ЖЭТФ. 1957. Т. 33. Вып. 1. С. 1–8.
- [7] Колесников П.М. Электродинамическое ускорение плазмы. М.: Атомиздат, 1971. С. 198–284.
- [8] Морозов А.И. Введение в плазмодинамику. М.: Физматлит, 2006. С. 183–186.
- [9] Voronin A.V., Gusev V.K., Petrov Yu.V. et al. // Nukleonika. 2008. Vol. 53. P. 103.
- [10] Воронин А.В., Гусев В.К., Кобяков С.В. // ЖТФ. 2011. Т. 81. Вып. 7. С. 63–67.