

УДК 533.9.082; 533.592

## ИССЛЕДОВАНИЕ АКСИАЛЬНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ В УСТАНОВКЕ ТИПА ПЛАЗМЕННЫЙ ФОКУС ПФ-4

А. Н. Майоров<sup>1</sup>, В. Я. Никулин<sup>2,3</sup>, А. В. Огинов<sup>2</sup>, А. М. Жукешов<sup>4</sup>

*В статье представлены результаты исследования аксиальных плазменных потоков, генерируемых в установке типа плазменный фокус. Исследования проведены с помощью лазерного зондирования и методик диагностирования плазмы средствами электронно-оптического преобразователя. Установлена зависимость параметров аксиальных плазменных потоков от формы электродов, давления газа в разрядной камере и сорта газа. Определен оптимальный режим работы установки.*

**Ключевые слова:** плазменный фокус, плазменные потоки, материаловедение.

Одним из основных свойств электроразрядной установки типа плазменный фокус является образование аксиальных плазменных потоков (струй), направленных от анода вдоль оси установки. В последнее время на плазмофокусной установке ПФ-4 “Тюльпан” (ФИАН) был выполнен цикл работ по модификации конструкционных материалов с целью придания им новых свойств, в том числе для получения нанопокровов с помощью плазменных потоков, улучшения токопроводящих свойств высокотемпературных сверхпроводников [1–6]. Также рассматривается возможность использования установок ПФ для моделирования астрофизических объектов типа струй, испускаемых черными дырами [7]. В связи с этим исследования процессов генерации кумулятивных плазменных потоков представляются весьма актуальными.

Кумулятивные плазменные потоки исследовались скоростными фоторегистраторами, световыми зондами, методами оптической спектроскопии в работах [8–12]. Было

<sup>1</sup> ОАО “НПП “Дельта”; e-mail: atlon2006@gmail.com.

<sup>2</sup> ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: vnik@sci.lebedev.ru.

<sup>3</sup> Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, 115409 Россия, Москва, Каширское ш., 31.

<sup>4</sup> Казахский национальный университет им. аль-Фараби.

показано, что скорость направленного вдоль оси разряда движения плазмы на порядок превышает скорость ее теплового расширения, что позволяет транспортировать потоки на значительные расстояния (порядка 1 м).

Получение плазменных потоков с заданными параметрами для прикладных задач невозможно без понимания процесса их формирования в ПФ и влияния, которое на этот процесс оказывают образцы, располагаемые вблизи вершины анода.

В данной работе проведены исследования плазменных потоков применительно к их применению в технологиях. В связи с этим изучалась зависимость параметров плазменных потоков от геометрии электродов, давления и сорта газа.

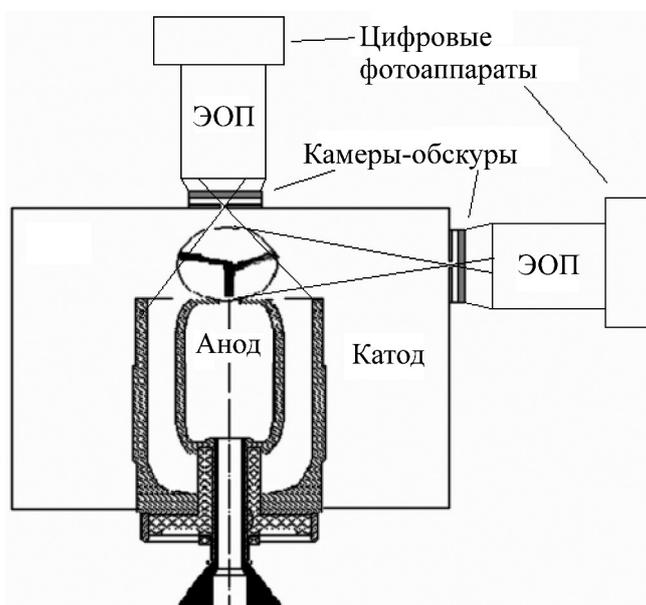


Рис. 1: Диагностика ПФ с использованием ЭОП.

*Установка ПФ-4 и диагностическая аппаратура.* Исследования процессов формирования плазменных потоков проводились на установке ПФ-4 [11, 12], имеющей геометрию электродов мейзеровского типа. Основные характеристики следующие:

- катод цилиндрической формы с диаметром 50 мм и высотой 60 мм;
  - суммарная емкость 4-х конденсаторных батарей 48 мкФ, максимальное напряжение зарядки 25 кВ;
  - запасенная энергия, при которой производился эксперимент 3–4 кДж;
  - индуктивность батарей 10 нГн, добавочная индуктивность 30–40 нГн;
  - характерное время нарастания тока до максимального значения 2.5 мкс.
- Максимальный нейтронный выход  $2 \cdot 10^8$  в полный телесный угол за импульс.

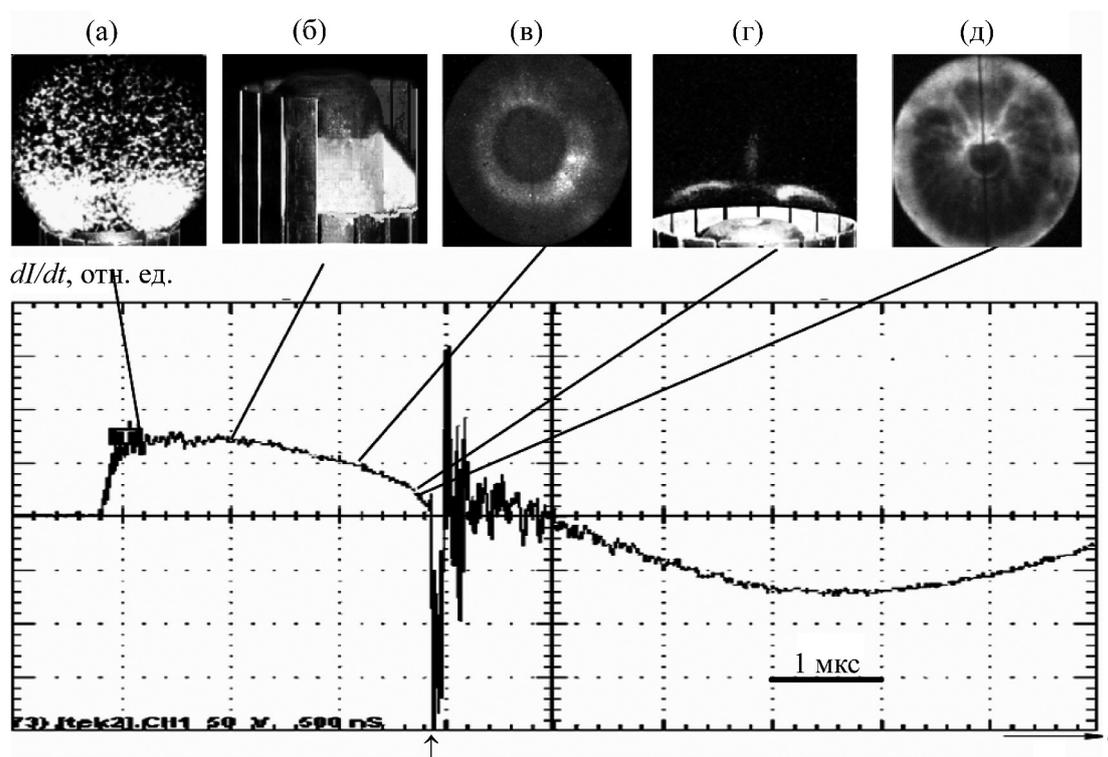


Рис. 2: Фотографии ПФ в видимом свете (самосвечение), снятые с помощью ЭОП (экспозиция 3 нс) и осциллограмма производной тока. Стрелка – момент максимального сжатия пинча.



Рис. 3: Фотография предпинча, полученная через 1 мкс после подачи напряжения на анод ПФ.

Для диагностики плазмы применялось следующее оборудование:

- электронно-оптический преобразователь (ЭОП), позволяющий получать двухмерные изображения плазмы в видимом и рентгеновском диапазонах длин волн с временным разрешением 3 нс. С помощью ЭОП проводилось наблюдение токовой оболочки в режиме кадровой съемки (время экспозиции от 3 нс до 20 нс) с шагом 10–100 нс в двух направлениях: перпендикулярно к оси разряда и вдоль нее со стороны анода (рис. 1).
- стробируемая видеокамера Videoscan-415-2001 на основе управляемой ПЗС матрицы с цифровым вводом в компьютер.
- интерферометр Маха–Цендера и YаG-лазер;
- интегральная рентгеновская камера обскура;
- датчики для измерения производной тока и общего тока с помощью пояса Роговского.

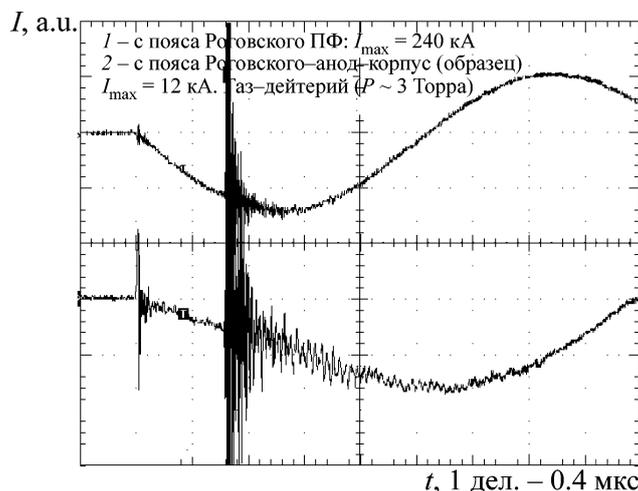


Рис. 4: Осциллограмма полного тока ПФ (верхняя кривая, 1) и тока между анодом и корпусом (диск) (нижняя кривая, 2).

*Результаты исследований.* Типичные фотографии разряда, полученные с помощью ЭОП на установке ПФ-4, показаны на рис. 2. В течение 200 нс после подачи высокого напряжения на анод ПФ наблюдается свечение во всем объеме разрядной камеры (рис. 2(а)), затем спустя 300–400 нс свечение концентрируется вблизи поверхности цилиндрического изолятора (рис. 2(б), (в)) и на оси установки ПФ. Свечение на оси установки (рис. 2(г)), по-видимому, объясняется формированием в данном месте токового канала, приводящего к формированию предпинча высотой до 2–2.5 см от вершины анода. Свечение около изолятора связано с образованием здесь токово-плазменной оболочки,

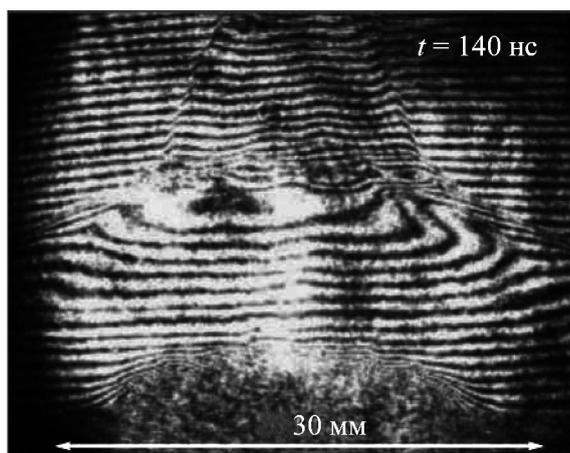


Рис. 5: Интерферограмма, полученная с помощью интерферометра Маха–Цендера в момент времени  $t = 140 \text{ нс}$  после момента максимального сжатия пинча.

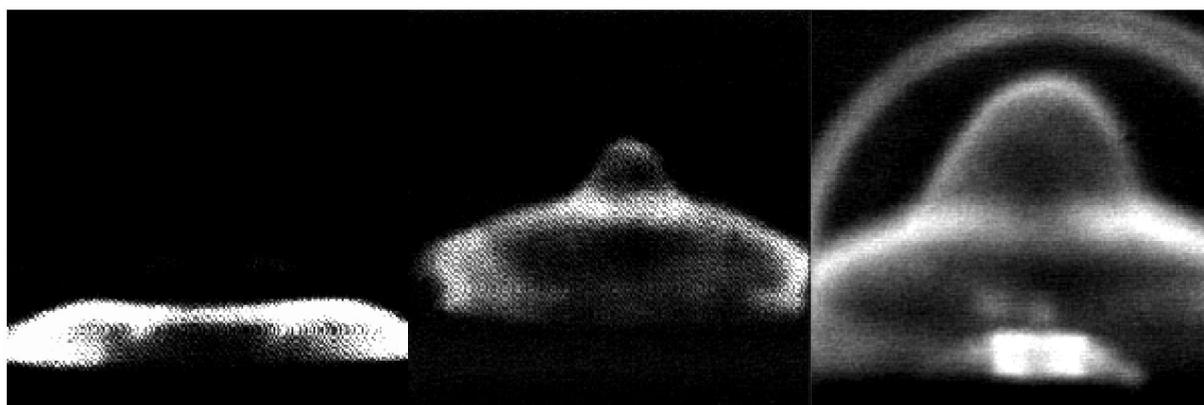


Рис. 6: Фотографии плазменных потоков ПФ, снятые с помощью ЭОП в видимом свете.

которая под действием пондеромоторной силы отрывается от изолятора и, ускоряясь до скоростей порядка  $10^7 \text{ см/с}$ , движется, сгребая плазму, к оси  $Z$  камеры ПФ. При этом форма оболочки становится воронкообразной, что приводит к частичному выбросу плазмы вдоль оси, создавая плазменный поток, достигающий скоростей в диапазоне от  $10^7$  до  $10^8 \text{ см/с}$ .

Подтверждением образования предпинча за счет электрического поля между корпусом камеры и анодом ПФ служит значительное увеличение яркости предпинча при приближении корпуса камеры к аноду, что увеличивает напряженность электрического поля между анодом и корпусом камеры. Для проверки этого факта было внесено изме-

нение в конструкцию установки ПФ: установлен диск из нержавеющей стали над анодом ПФ на расстоянии 18 мм (расстояние между корпусом камеры и анодом 120 мм), электрически соединенный с корпусом камеры. Разряд в этом эксперименте осуществлялся в дейтерии при давлении 2 Торра. На рис. 3 схематически показано расположение диска и реальная фотография плазмы (предпинча), полученная с помощью ЭОП спустя 1 мкс после подачи напряжения на анод ПФ. Токово-плазменная оболочка еще не вышла на торец анода из межэлектродного пространства, а уже наблюдается ток между анодом и диском.

На рис. 4 представлены диаграммы полного тока при разряде конденсаторов и тока, идущего через промежуток анод – диск (далее по тексту “второй контур”). Суммарный ток ПФ достигает в максимуме 260 кА через 2.5 мкс, а ток во втором контуре достигает в максимуме 12 кА через 4.5 мкс после подачи напряжения на ПФ. С помощью пояса Роговского измерены максимальные значения полного тока 230–280 кА при запасенной в конденсаторах энергии 3.6 кДж и тока предпинча 7–12 кА. Ток предпинча составляет, оценочно, около 5% от полного тока ПФ.

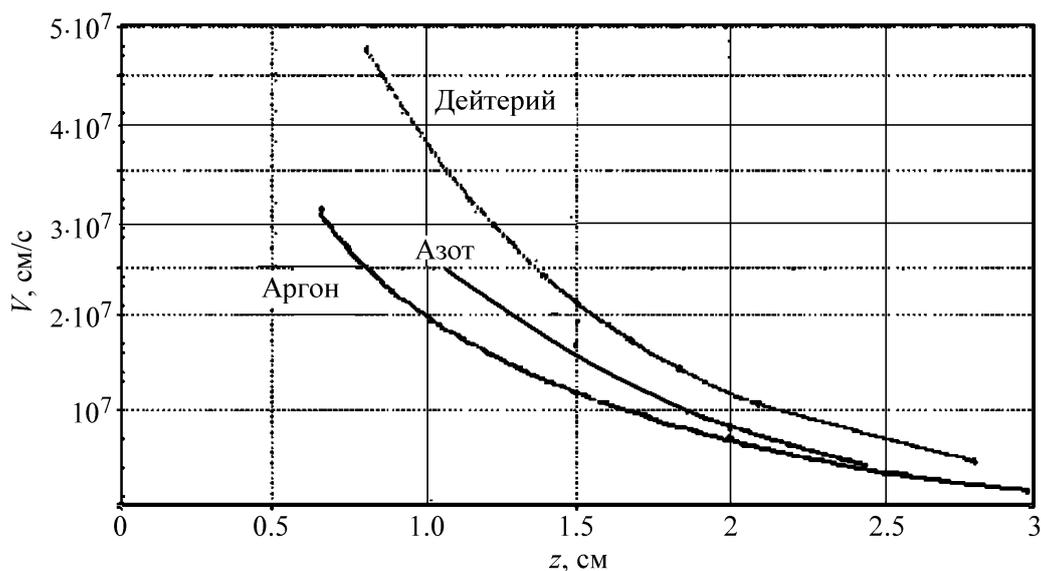


Рис. 7: Зависимость скорости аксиальных плазменных потоков от расстояния от анода (ПФ-4).

Тем не менее, предпинч и магнитное поле, образующееся при протекании тока по нему, могут оказать влияние на динамику и свойства токово-плазменной оболочки (ТПО) и плазменных потоков в заключительной стадии. Ток в предпинче увеличивается с уменьшением расстояния между анодом и катодом ПФ. Интерферометрические

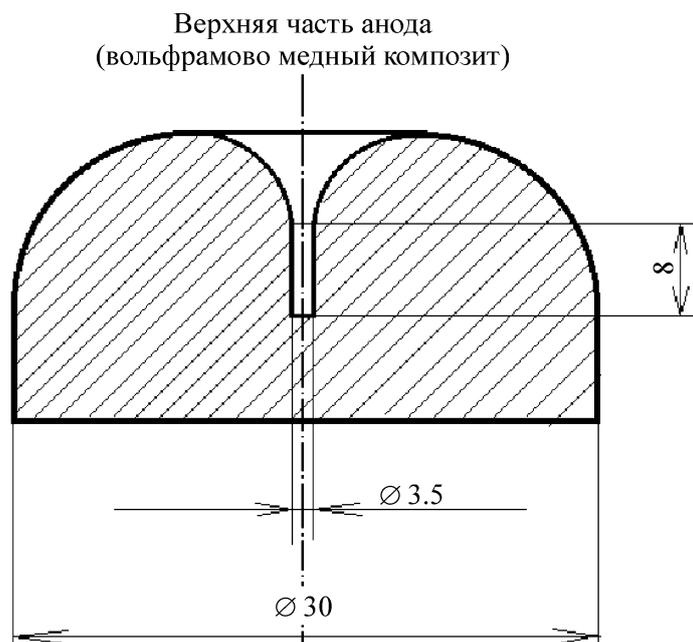


Рис. 8: Форма анодной вставки.



Рис. 9: Кумулятивный поток, получаемый с анодной вставкой, показанной на рис. 8.

измерения плотности плазмы в пинче дают величину  $(3 - 5) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Из проведенных исследований установлено, что плотность плазмы в потоке  $> 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , и скорость его движения  $(2 - 5) \cdot 10^7 \text{ см/с}$  (рис. 7). Типичная интерферограмма плазменной струи показана на рис. 5.

Динамика плазменных потоков изучалась с помощью ЭОП. Типичные фотографии аксиальных плазменных потоков показаны на рис. 6.

Из анализа данных фотографий определена зависимость скорости аксиальных плазменных потоков от расстояния от анода в установке ПФ-4 (рис. 7).

Исходя из совокупности интерферометрических измерений и данных, полученных с помощью ЭОП, была сделана оценка полной энергии плазменного импульса, которая составила величину порядка 100 Дж. Длительность плазменного импульса порядка 10 нс.

В работе изучалось также влияние формы анода, ее центральной части на формирование кумулятивных потоков. В результате проведенных исследований показано, что в случае использования анода с выемкой в центре (рис. 8) формируется кумулятивная струя с острой направленностью (рис. 9).

Исследования кумулятивной плазменной струи проводились также с помощью стробируемой видеокамеры Videoscan-415-2001 на основе управляемой ПЗС матрицы с цифровым вводом в компьютер. Усиление ПЗС-камеры выбрано таким, чтобы обеспечить максимальный динамический диапазон чувствительности пары ПЗС-матрица+АЦП (отношение максимального сигнала к шуму чтения = 853) при сохранении линейности свет-сигнальной характеристики. Регистрировалось свечение плазмы в видимом диапазоне  $530 \pm 20$  нм.

В серии экспериментов на аргоне в диапазоне давлений 1–6 Торр (области работы плазменного фокуса) и напряжении зарядки 12 кВ получены снимки формы струи на расстоянии 2.5 см от торцевой части анода. При работе плазменного фокуса на аргоне с давлением 1 Торр (рис. 10) формируется относительно слабосветящаяся, широкая струя. Время формирования струи достаточно продолжительно.

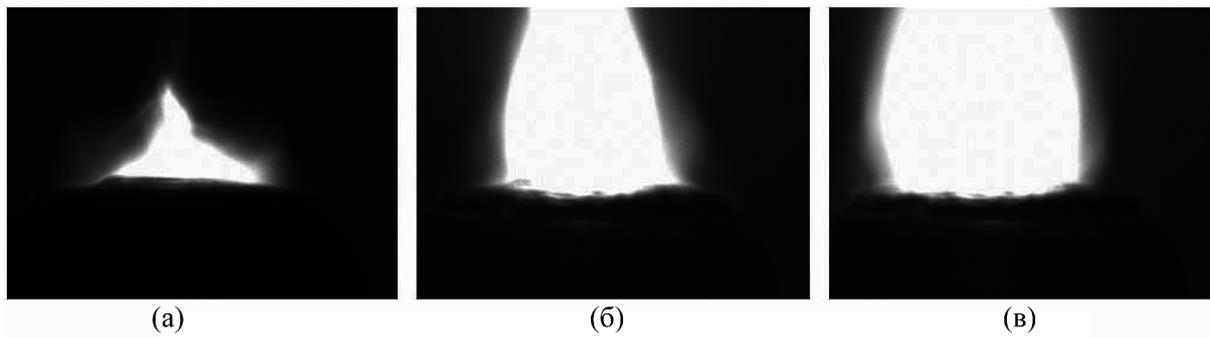


Рис. 10: Аргон 1 Торр. (а) – начальная фаза формирования струи, ((б), (в)) – сформированная струя.

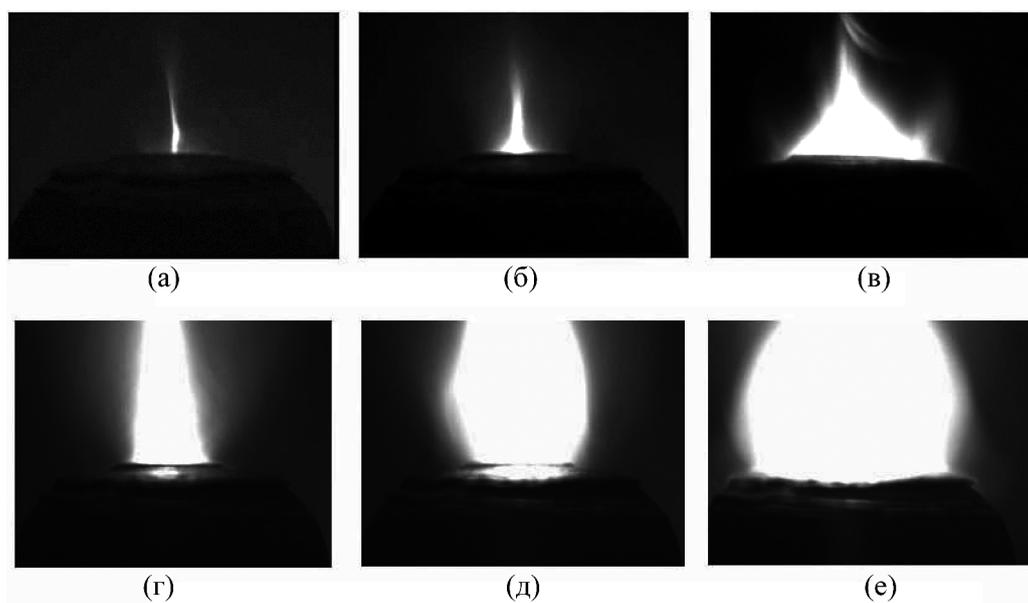


Рис. 11: Аргон 2 Торра. ((a), (б)) – предпинч, (в) – начальная фаза формирования струи, ((г)–(е)) – сформированная струя.

При работе ПФ на аргоне с давлением 2 Торра (рис. 11) выявлено существование предвестника (предпинча) задолго до формирования кумулятивной плазменной струи. Отношение высоты конуса к его основанию в начальной фазе формирования струи оказывается выше, чем при работе с газом в 1 Торр, что говорит о лучшей кумуляции и лучшей конверсии радиальной скорости ТПО в направленное аксиальное движение с большей скоростью. Время формирования струи также уменьшается. При работе ПФ на аргоне с давлением 3.5 Торра (рис. 12) существенных изменений в динамике не наблюдается, однако возросло интегральное свечение плазменной струи, отмечено небольшое уменьшение ширины струи в финальной стадии её формирования. Произошло дальнейшее сокращение времени формирования струи.

При работе ПФ на аргоне с давлением 6 Торр (рис. 13) динамика формирования струи существенно изменилась. Произошло резкое сокращение ширины сформированной струи ( $\sim 2 - 3$  мм) со слабой зависимостью её от расстояния до поверхности анода. Резко возросло интегральное свечение плазменной струи. Время формирования струи стало минимальным, аксиальная скорость достигла максимума. Данный режим можно считать оптимальным, в данной геометрии электродов и типе газа, для формирования остронаправленных кумулятивных плазменных струй. Использование данного режима работы ПФ может быть успешно использовано в экспериментах по воздействию на

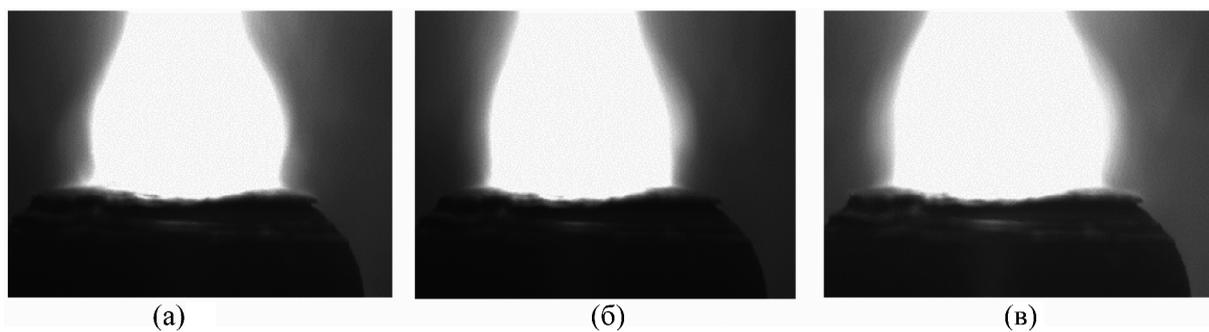


Рис. 12: Аргон 3.5 Торра. ((a)–(c)) сформированная струя.

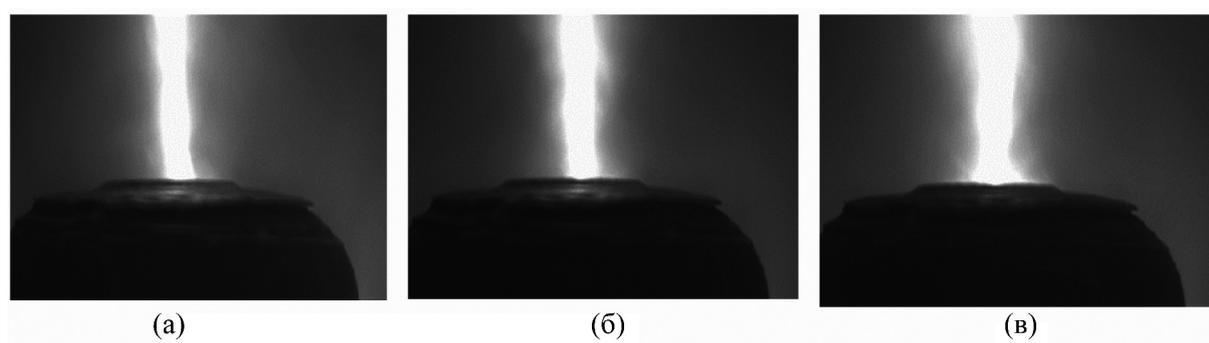


Рис. 13: Аргон 6 Торр. ((a)–(c)) сформированная слабо расходящаяся кумулятивная струя.

материалы высокоэнергетичными потоками плазмы, локальной модификации поверхностных слоев, импульсной закалке, упрочнении и других материаловедческих задачах. Найденный режим имеет преимущества в более высокой поверхностной плотности энергии воздействия на образец, большей направленности и локальности, большей интегральной энергии воздействия, чем ранее применявшийся режим работы ПФ, что позволяет расширить рамки доступных пределов измерений и сократить время выполнения эксперимента за счет сокращения количества выстрелов на один образец.

*Выводы.* В работе показано, что параметры аксиальных плазменных потоков зависят от формы электрода. При наличии в центре анода конической выемки плазменная струя имеет остронаправленную форму. Выявлена зависимость скорости плазменной струи от расстояния от анода. Выявлена зависимость от давления рабочего газа. Показано, что на параметры плазменного потока оказывает влияние расположение мишени. Определена энергия плазменного импульса.

Работа выполнена при поддержке Гранта Президента РФ “Ведущие научные школы” НШ-1424.2014.2 и гранта 3207/ГФ4 МОН Республики Казахстан.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] Л. И. Иванов, О. Н. Крохин, А. И. Дедюрин и др., Перспективные материалы, № 3, 31 (2004); Л. И. Иванов, А. И. Дедюрин, И. В. Боровицкая и др., Перспективные материалы, № 5, 74 (2006).
- [2] О. Н. Крохин, В. Я. Никулин, А. А. Тихомиров и др., Нанотехника, № 13, 52 (2008).
- [3] Л. И. Иванов, И. В. Боровицкая, Г. Г. Бондаренко и др., Перспективные материалы, № 3, 77 (2009).
- [4] А. Ю. Дидык, Л. И. Иванов, О. Н. Крохин и др., ДАН **442**(3), 42 (2012).
- [5] В. П. Михайлов, Л. И. Иванов, И. В. Боровицкая и др., ДАН **442**(5), 56 (2012).
- [6] G. Mikhailova, L. Antonova, I. Borovitskaya, et al., Phys. Status Solidi C **10**(4), 689 (2013).
- [7] V. Krauz, V. Myalton, V. Vinogradov, et al., Phys. Scr. **161**, 1 (2014).
- [8] N. V. Filippov, T. I. Filippova, A. N. Filippov, et al., Nucleonika **46**(1), 35 (2001).
- [9] N. V. Filippov, T. I. Filippova, A. N. Filippov, et al., Czech. J. Phys. **50**, Suppl. 3, 127 (2000).
- [10] O. N. Krokhin, A. E. Gurei, V. Ya. Nikulin, et al., Proc. of Int. Symp. “Plasma-2001” (Institute of Plasms Physics and Laser Microfusion, Warsaw (PL), 2001), p. 72.
- [11] V. A. Evitkhin, I. E. Lyublinsky, A. V. Vertkov, et al., Nukleonika **46**, Suppl. 1, S113 (2001).
- [12] Е. О. Баронова, О. А. Башутин, В. В. Вихрев, Физика плазмы **38**(9), 815 (2012).

Поступила в редакцию 19 сентября 2014 г.