УДК 533.9.08

ИССЛЕДОВАНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ, СОЗДАВАЕМЫХ В НЕЦИЛИНДРИЧЕСКИХ Z-ПИНЧЕВЫХ СИСТЕМАХ, ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

С.С. Ананьев, С.А. Данько, В.В. Мылтон, Ю.Г. Калинин, В.И. Крауз, В.П. Виноградов, Ю.В. Виноградова

НИЦ «Курчатовский институт», Россия, Москва

В последнее время наблюдается значительный рост интереса к генерируемым в Z-пинчевых системах плазменным потокам. Это связано как с пониманием роли процессов, приводящих к генерации потоков, в общей физике формирования и динамики пинча, так и с все возрастающим практическим использованием этих потоков. В работе описана система щелевого электронно-оптического фотографирования в видимом диапазоне, созданная для исследования динамики импульсных плазменных потоков, вызванных сжатием Z-пинча. Эксперименты проведены на установке ПФ-3, крупнейшей в мире среди представителей одной из разновидностей Z-пинчевых систем — плазменный фокус. Приведены первые результаты измерений скорости плазменных потоков при использовании различных рабочих газов (водород, неон, аргон). Показана структурированность плазменного потока. Обнаружено отсутствие существенной зависимости скорости потока от сорта рабочего газа.

Ключевые слова: диагностика плазмы, электронно-оптическая регистрация, щелевая развёртка, плазменный фокус, Z-пинчи, мощный импульсный генератор тока.

INVESTIGATION OF THE PULSED PLASMA FLOW, GENERATED IN NON-CYLINDRICAL Z-PINCH SYSTEMS, BY ELECTRON-OPTICAL METHODS

S.S. Ananyev, S.A. Dan'ko, V.V. Mylton, Yu.G. Kalinin, V.I. Krauz, V.P. Vinogradov, Yu.V. Vinogradova

NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

Recently there has been a significant growth of interest to the plasma flows generated in the Z-pinch systems. This is connected with understanding of the important role of the processes leading to generate flows, in general physics of formation and dynamics of the pinch, and increasing the applications of these flows. The paper describes a system of slit electronic-optical photography in visible range, designed for monitoring the spread of pulsed plasma flows caused by compression of a Z-pinch. Experiments were carried out on PF-3 facility, the largest in the world among representatives of one of the varieties of Z-pinch systems—the plasma focus. The first results of measurements of the plasma flows velocities using different working gases (hydrogen, neon, argon) are presented. The structuredness of the plasma flows is shown. No significant dependence of the flow velocity on the sort of the working gas was revealed.

Key words: plasma diagnostic, electron-optical photography, streak camera, plasma focus, Z-pinch, high current generator.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что в Z-пинчах создаётся плотная горячая плазма, являющаяся интенсивным источником широкого спектра излучений: нейтронного, электромагнитного во всём диапазоне от СВЧ до жёсткого рентгена, пучков ионов и электронов. Одной из интересных особенностей этих систем также является генерация интенсивных плазменных потоков. Однако основные усилия исследователей, как правило, были сосредоточены на изучении самого плотного пинча, являющегося источником мощного ионизирующего излучения. Тем не менее в последнее время наблюдается значительный рост интереса к генерируемым в подобных системах плазменным потокам. Это связано как с пониманием значительной роли процессов, приводящих к генерации потоков, в общей физике формирования и динамики пинча, так и с всё возрастающим практическим использованием этих потоков. В частности, в последнее время плазменные потоки достаточно интенсивно исследовались на быстрых Z-пинчах: установки Z (Сандия, США), MAGPIE (Imperial College, Лондон), Ангара 5-1 (ТРИНИТИ, Троицк), SPHINX (CEA Gramat, Франция), С-300 (НИЦ «Курчатовский институт») и др. [1—7].

Наиболее ярко эффект генерации плазменных потоков проявляется в нецилиндрическом Z-пинче, или «плазменном фокусе» (ПФ). Еще в ранних работах по ПФ [8] было установлено, что при радиальном сжатии токонесущей плазменной оболочки (ТПО) к оси имеет место образование мощных плазменных потоков, движущихся в осевом направлении. Было показано, что эти плазменные потоки в значительной степени определяют физику процессов в ПФ и могут оказать существенное влияние как на

динамику пинчевания, так и на итоговые эмиссионные характеристики. В частности, выброс плазмы из пинча приводит к уменьшению погонной плотности и стимулирует развитие как магнитогидродинамических ($m = 0$), так и кинетических неустойчивостей [9]. Кроме того, при этом формируется плотная плазменная мишень, которая может играть существенную роль в генерации нейтронного излучения [10]. Более того, в цикле работ, выполненных Н.В. Филипповым [11], было показано, что путём изменения профиля сходящейся к оси токовой оболочки можно оптимизировать режимы работы установки относительно различных видов излучения. В частности, в работе [12] утверждается, что образование кумулятивных плазменных потоков, направленных вдоль оси системы, является прямым следствием нецилиндричности ТПО.

Несмотря на то, что сейчас активно растёт практическое применение этих потоков, в частности, в области радиационного материаловедения для исследования взаимодействия плазмы с поверхностью, модификации её структуры и свойств, в том числе для получения нанопокровов, моделирования астрофизических процессов и др. [13—20], их параметры и, главное, механизмы генерации изучены недостаточно, что затрудняет оптимизацию как самих плазменных потоков, так и динамики пинчевания.

С точки зрения практического применения большое значение имеет также возможность транспортировки потоков в фоновой плазме на значительные расстояния без существенного изменения их параметров. Настоящая работа посвящена исследованию параметров плазменных потоков с помощью скоростных фоторегистраторов СФЭР-6.

СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперименты выполнены на установке ПФ-3 [21, 22], представляющей собой плазменный фокус с плоской геометрией электродов (тип Филиппова). Полная ёмкость источника питания составляет 9,2 мФ, максимальное зарядное напряжение 25 кВ, максимальная запасаемая энергия 2,8 МДж. В описываемых далее экспериментах начальное зарядное напряжение было 8—10 кВ, что соответствовало энергозапасу конденсаторной батареи 280—450 кДж. Анод представляет собой секционированный медный диск диаметром 920 и толщиной 25 мм. В центральной части анода имеется сменная вставка, позволяющая значительно увеличить ресурс анода, а также управлять профилем сжимающейся ТПО путём изменения формы этой вставки. В описываемых экспериментах используется воронкоподобная вставка диаметром в верхней части воронки 100 и глубиной 70 мм. Катодом служит вакуумная камера установки диаметром 260 и высотой 45 см. Такие размеры катода фактически определяют свободное поведение ТПО при развитии разряда. Для управления формой плазменной оболочки внутри камеры установлен дополнительный катод в виде штыревого обратного токопровода («беличье колесо») с верхним фланцем. Расстояние от плоскости анода до верхнего фланца 100 мм.

Для исследования распространения потоков в окружающей фоновой плазме и изучения характера изменения основных параметров установка снабжена диагностической пролётной камерой, установленной на верхнем фланце основной разрядной камеры установки. Камера состоит из трёх секций длиной 300 и диаметром 210 мм. В каждой секции пролётной камеры имеется набор диагностических патрубков, расположенных равномерно по диаметру в центральной плоскости. При этом центр областей наблюдения располагается на расстояниях 35, 65 и 95 см относительно плоскости анода. Таким образом, с учётом штатных диагностических окон разрядной камеры установки обеспечивается возможность исследования параметров плазменного потока на расстоянии до 100 см от плоскости анода, т.е. от области генерации потока. В настоящей работе параметры плазменного потока исследовались с помощью оптических скоростных регистраторов в первой диагностической плоскости на расстоянии 35 см от плоскости анода.

В связи с особенностями работы экспериментальной установки для передачи изображения плазмы из пролётной камеры нами были использованы волоконно-оптические жгуты с регулярным расположением волокон. Это позволило удобно расположить регистрирующую аппаратуру, а также избавиться от вибраций, передаваемых от вакуумной камеры установки во время электрического разряда, и от необходимости регулярной юстировки, связанной с деформацией крышки вакуумной камеры, на которой размещается оборудование, при вакуумной откачке.

Для решения задач наблюдения за динамикой распространения и измерения скоростей импульсных плазменных потоков была создана оптическая схема, включающая два электронно-оптических хронографа. Для первого из них была реализована «классическая» схема, в которой направление движения плазменного потока было спроектировано на времяанализирующую щель, параллельную оси камеры ($\parallel$). По наклону фронта на щелевой развертке можно определить скорость распространения потока в аксиальном направлении, а также длину плазменных сгустков (если считать, что движение поступательное и ламинарное).

Для наблюдения за формой фронта плазменной струи и особенностями на периферии три поперечных ($\perp$) сечения камеры проецировались на три световода, изображения которых сводились на три различных участка времяанализирующей щели второго хронографа. Световоды располагались на разной высоте по оси: на 4 см ниже центра диагностического окна, по центру и на 4 см выше, проецируя на времяанализирующую щель три диаметральных сечения. Благодаря такой геометрии по этой развёртке, помимо скорости распространения потока (по взаимному расположению фронта свечения в различных сечениях по оси на разных световодах), возможно определить форму фронта летящего сгустка и его геометрические размеры.

Общая схема регистрации представлена на рис. 1. Объектив 2 строит изображение участка плазмы 1, распространяющейся вдоль пролётной камеры, на торец прямоугольного световода 3 с регулярным рас-

Рис. 1. Схема регистрации полутоновых изображений движущегося излучающего плазменного объекта с помощью щелевых электронно-оптических камер с времяанализирующими щелями, расположенными во взаимно перпендикулярных направлениях: 1 — излучающий объект; 2, 4 — объектив; 3 — световоды с регулярным расположением волокон (на выходном торце оптический контакт с времяанализирующей щелью); 5 — электронно-оптический регистратор; 6 — цифровая фотоприставка

положением волокон. С противоположного конца световода, имеющего оптический контакт с времяанализирующей щелью, изображение переносится объективом 4 на фотокатод электронно-оптического регистратора 5 с временной развёрткой. Полутоновое изображение с экрана регистратора считывается с помощью цифровой фотоприставки, описанной в работе [23].

В качестве регистраторов использованы СФЭР-6 производства НИИИТ. В связи с тем, что электронно-оптические регистраторы подвержены воздействию электромагнитных полей и наводок, они помещены в экранированные корпуса и снабжены блоками бесперебойного питания. Как описано в [23], цифровые фотоприставки также имеют экранировку и дистанционное управление.

Запуск регистраторов и синхронизация осуществлялись из экранированной кабины. Там же расположены осциллографы и блоки дистанционного запуска фоторегистраторов. Нами регистрировались сигналы запуска обоих регистраторов относительно производной разрядного тока. Также регистрировался сигнал светового зонда, расположенного в той же плоскости, что и диагностические окна описанных электронно-оптических диагностик. Световой зонд представляет собой коллима-

тор, собирающий световое излучение вдоль диаметра камеры, которое затем по световоду подаётся на фотокатод ФЭУ. Коллимирование позволяет регистрировать световое излучение из относительно небольшого плазменного объёма (диаметр области, попадающей в поле зрения коллиматора, не превышает 5 мм в центре камеры взаимодействия). Это позволяет с достаточно высокой точностью регистрировать момент прихода плазменного потока в область наблюдения. Таким образом, была возможность наглядно наблюдать корреляцию между исследуемым процессом, видимым излучением и синхронизацией регистраторов. Фотоприставки включались подачей напряжения с источника на обмотки электромагнитов, приводящих в движение диэлектрический толкатель на экранированном корпусе фотоприставки, который, в свою очередь, замыкал цепь дистанционного управления фотокамерой через разъём на её корпусе.

Характерные результаты оптических изменений показаны на рис. 2. Описанные схемы позволяют получать изображения плазменного образования с пространственным разрешением по объекту не хуже 0,1 мм. Учитывая характер исследуемых процессов, регистрация проводилась на длинах развёртки от 2,5 до 75 мкс. Для ширины времяанализирующей щели 0,2 мм получаемое временное разрешение на этих длинах развёртки составляло от 20 нс до 0,6 мкс.

Рис. 2. Характерные полутонные изображения развёртки щели, расположенной в аксиальном и радиальном направлениях, в эксперименте по генерации плазменных потоков при сжатии газового Z-пинча на установке ПФ-3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В процессе проведения экспериментов была исследована динамика плазменных сгустков в разрядах с различными рабочими газами: аргоном, неоном и водородом.

Эксперименты на водороде. В серии экспериментов с водородом наблюдалось несколько излучающих объектов, приводящих к модуляции интенсивности на щелевых развёртках. Форма серии сгустков плазмы водорода более однородна, чем в экспериментах с аргоном и неоном. Поперечный размер достигает 10 см, приосевая часть более яркая. На рис. 3 и 4 показаны хронограммы $\parallel$ и $\perp$ с развёрткой длительностью 75 и 40 мкс соответственно.

Рис. 3. Рабочий газ — водород, 2,9 торр, щелевая развёртка свечения плазмы, времяанализирующая щель расположена параллельно оси (продольная щель), длительность развёртки 75 мкс, время — слева направо, поле зрения (высота щели) 7 см по объекту, распространение потока снизу вверх: $V_1 = 4,5 \cdot 10^6$ (—); $V_2 = 4,4 \cdot 10^6$ (—); $V_3 = -1 \cdot 10^6$ см/с (—)

Рис. 4. Рабочий газ — водород, 2,9 торр, три щелевых развёртки свечения плазмы в трёх диаметральных сечениях пролётной камеры на 4 см ниже центра диагностического окна, по центру и на 4 см выше (нижняя, средняя и верхняя развёртка соответственно), длительность развёртки 40 мкс, время — слева направо, поле зрения 10 см по объекту: $V_1 = 5 \cdot 10^6$ (—); $V_2 = 3 \cdot 10^6$ (—); $V_3 = 2,6 \cdot 10^6$ (—); $V_4 = 4,6 \cdot 10^6$ (—); $V_5 = -0,94 \cdot 10^6$ см/с (—)

Среднюю скорость лидирующих сгустков на дистанции от плазменного фокуса до окна можно оценить, отсчитывая время пролёта сгустка от особенности на производной тока. Эта особенность соответствует сжатию токовой оболочки на оси системы и формированию пинча, являющегося источником интенсивного рентгеновского излучения. Это излучение вызывает ионизацию фонового газа в пролётной камере, что даёт на хронограммах крутой фронт почернения. Время задержки от вспышки газа до появления лидирующего сгустка в данном эксперименте составляет 2,6 мкс. Следовательно, $V_{cp} = 1,4 \cdot 10^7$ см/с. Значения мгновенных скоростей в месте наблюдения, определённые по передним фронтам для обеих развёрток, близки: $V_{||} = 4,5 \cdot 10^6$ см/с, $V_{\perp} = 5 \cdot 10^6$ см/с.

На рис. 3 и 4 видно, что приблизительно через 30 мкс после появления фронта почернения, соответствующего распространению плазменного потока от Z-пинча, наблюдается фронт с обратным наклоном. Он объясняется движением плазмы в обратном направлении. По всей видимости, эти плазменные потоки связаны с отражением части плазмы от переходных фланцев между секциями пролётной камеры, имеющими проходной диаметр на несколько сантиметров меньше диаметра самой камеры. Значения скоростей, рассчитанные исходя их геометрии пролётной камеры и измеренной мгновенной скорости лидирующих сгустков с учётом их дальнейшего торможения, близки к величинам мгновенной скорости, измеренной по фронтам с обратным наклоном на развёртках: $V_{||2} = -1 \cdot 10^6$ см/с, $V_{\perp 2} = -0,94 \cdot 10^6$ см/с.

При более коротких развёртках становится хорошо видно, что фронт распространяющегося потока может быть сильно не осесимметричен. На рис. 5 и 6 приведены развёртки длительностью 2 и 14,5 мкс соответственно. Обе щели дают близкое значение продольной (осевой) скорости движения сгустков: $V_{\perp} = 5,7 \cdot 10^6$ см/с и $V_{||} = 6 \cdot 10^6$ см/с. Протяжённость лидирующего сгустка вдоль оси ~ 5 см.

Рис. 5. Рабочий газ — водород, 2,9 торр, развёртка свечения плазмы, продольная щель, длительность 2 мкс, поле зрения (высота щели) 7 см по объекту: $V_1 = 6 \cdot 10^6$ (—); $V_2 = 4,5 \cdot 10^6$ см/с (—)

Рис. 6. Рабочий газ — водород, 2,9 торр, три поперечные щели, развёртка свечения плазмы, длительность 14,5 мкс, поле зрения 10 см по объекту: $V_1 = 5,7 \cdot 10^6$ см/с (—)

Эксперименты с неоном. В эксперименте с неоном наблюдалось формирование большого количества излучающих объектов, приводящее к модуляции интенсивности на щелевых развёртках. Их количество — несколько десятков. На рис. 7 и 8 показаны развёртки длительностью 14 и 60 мкс соответственно.

Рис. 7. Рабочий газ — неон, 1,8 торр, развёртка свечения плазмы, продольная щель, длительность 14 мкс, поле зрения (высота щели) 7 см по объекту: $V_1 = 6 \cdot 10^6$ (—); $V_2 = 4,5 \cdot 10^6$ см/с (—)

Рис. 8. Рабочий газ — неон, 1,8 торр, три поперечные щели, развёртка свечения плазмы, длительность 60 мкс, поле зрения 10 см по объекту: $V_1 = 3,6 \cdot 10^6$ (—); $V_2 = 2,3 \cdot 10^6$ (—); $V_3 = 2,6 \cdot 10^6$ (—); $V_4 = 0,85 \cdot 10^6$ см/с (—)

венно. Средняя скорость лидирующих сгустков, определённая по тому же методу, что и в случае водорода, составила $V_{\text{ср}} = 10^7$ см/с. Мгновенная скорость первого сгустка составила $V_{\parallel} = 3,6 \cdot 10^6$ см/с, количество сгустков в первой серии ~ 10 шт., скорость последнего $V_{\parallel} = 1,9 \cdot 10^6$ см/с. На рис. 8 видно, что скорость первого сгустка также $V_{\perp} = 3,6 \cdot 10^6$ см/с. Вторая серия начинается через 28 мкс сгустком формой полусферы с поперечным размером 6—7 см и продольным размером ~ 5 см, $V_{\perp} = 2,3 \cdot 10^6$ см/с. Эта серия связана с повторным пинчеванием на более поздних стадиях разряда. Дальнейшая модуляция интенсивности может свидетельствовать о появлении ещё более поздних серий (появляющихся через ~ 6 мкс), которые движутся примерно с такой же мгновенной скоростью.

При больших длительностях $\parallel$ -развёртки становится видно, что от начала серии до её окончания скорость сгустков в серии заметно уменьшается от $V_{\parallel 1} = 3,6 \cdot 10^6$ см/с до $V_{\parallel 2} = 1,2 \cdot 10^6$ см/с. Протяжённость последующей серии увеличивается с 6 до 11 см.

При рассмотрении более коротких развёрток становится хорошо видно, что поток состоит из мелких компактных сгустков. На рис. 9 и 10 показаны развёртки длительностью 2 и 2,5 мкс соответственно: $V_{\parallel} = (1,6—3,5) \cdot 10^6$ см/с, $V_{\perp} = 6 \cdot 10^6$ см/с.

Рис. 9. Рабочий газ — неон, 3 торр, развёртка свечения плазмы, продольная щель, длительность 2 мкс, поле зрения (высота щели) 7 см по объекту: $V_1 = 2,35 \cdot 10^6$ (—); $V_2 = 2 \cdot 10^6$ (—); $V_3 = 3,45 \cdot 10^6$ (—); $V_4 = 1,6 \cdot 10^6$ см/с (—)

Рис. 10. Рабочий газ — неон, 3 торр, три поперечные щели, развёртка свечения плазмы, длительность 2,5 мкс, поле зрения 10 см по объекту: $V_1 = 5,7 \cdot 10^6$ см/с (—)

Эксперименты с аргоном. В экспериментах с аргоном на длинной развёртке также видны две серии плазменных сгустков, следующие через промежуток времени ~ 28 мкс. На рис. 11 и 12 показаны развёртки длительностью 66 и 60 мкс соответственно. Серии сгустков имеют протяжённость по 15—20 см. Во второй серии видно столкновение прямого и отражённого потоков плазмы. Заметно сильное отличие в скорости движения плазмы первой серии сгустков, определяемого по развёрткам с продольной и поперечными щелями $V_{\parallel} = 2,6 \cdot 10^6$ см/с, $V_{\perp} = 1,4 \cdot 10^7$ см/с. В этом разряде струя неоднородна в продольном и поперечном направлении. С наблюдаемой неоднородностью, по-видимому, и связано отличие в скоростях, определяемых по разным развёрткам.

Рис. 11. Рабочий газ — аргон, 1,6 торр, развёртка свечения плазмы, продольная щель, длительность развёртки 66 мкс, поле зрения (высота щели) 7 см по объекту: $V_1 = 2,6 \cdot 10^6$ (—); $V_2 = 1,4 \cdot 10^6$ (—); $V_3 = -1,07 \cdot 10^6$ (—); $V_4 = 1,46 \cdot 10^6$ (—); $V_5 = 1 \cdot 10^6$ (—); $V_6 = -0,16 \cdot 10^6$ (—); $V_7 = -0,3 \cdot 10^6$ (—); $V_8 = 0,4 \cdot 10^6$ (—); $V_9 = 0,15 \cdot 10^6$ (—); $V_{10} = -0,1 \cdot 10^6$ см/с (—)

Рис. 12. Рабочий газ — аргон, 1,6 торр, три поперечные щели, развёртка свечения плазмы, длительность развёртки 60 мкс, поле зрения 10 см по объекту: $V_1 = 1,4 \cdot 10^6$ (—); $V_2 = 3,2 \cdot 10^6$ см/с (—)

На рис. 13 и 14 показаны развёртки длительностью 6 и 14 мкс соответственно. На более коротких развёртках видно, что сгустки в потоке имеют разные скорости — $V_{\parallel} = (3\text{—}5)10^6$ см/с, максимальная скорость, определённая по развёртке с поперечными щелями, составляет $V_{\perp} = 7,8 \cdot 10^6$ см/с. Длина и поперечный размер сгустков 0,5—1,5 см. Чётко выраженного вращательного движения сгустков не наблюдается, однако в большинстве экспериментов регистрируется поперечное смещение со скоростью $V_{\text{поп}} \sim 10^6$ см/с.

Рис. 13. Рабочий газ — аргон, 1,6 торр, развёртка свечения плазмы, продольная щель, длительность 6 мкс, поле зрения (высота щели) 7 см по объекту: $V_1 = 4,7 \cdot 10^6$ (—); $V_2 = 3,5 \cdot 10^6$ (—); $V_3 = 5,2 \cdot 10^6$ см/с (—)

Рис. 14. Рабочий газ — аргон, 1,6 торр, три поперечные щели, развёртка свечения плазмы, длительность 14 мкс, поле зрения 10 см по объекту: $V_1 = 7,8 \cdot 10^6$ см/с (—)

ВЫВОДЫ

Первые эксперименты проявили следующие свойства генерируемых плазменных сгустков. В экспериментах с неоном, аргоном и водородом:

- присутствует многопотоковость, связанная с особенностями генерации сгустков плазмы в плазменном фокусе;
- наличие наряду с продольным движением вдоль оси поперечного движения, наиболее вероятно — вращения плазменных сгустков.

Структура плазменных сгустков у тяжёлых газов Ne и Ar более раздробленная по сравнению с H_2 , характерные размеры светящихся сгустков водородной плазмы составляют 2—7 см, что в 3—5 раз превосходит сгустки в тяжёлых газах.

Средняя скорость преодоления сгустками дистанции от анода в 2—3 раза выше, чем измеренная мгновенная скорость ($V_{\text{ср}} \sim 10^7$ см/с). Такой разброс вызван торможением в газе пролётной камеры.

В ряде случаев скорости, определённые по «поперечной» развёртке, превосходят значения для тех же объектов, определённые по «продольной» развёртке. Этот факт, по-видимому, связан с двумя явлениями. Во-первых, в поле зрения вертикальной щели не попадают периферийные сгустки, скорость которых может превосходить скорость сгустка на оси. Во-вторых, наблюдаемые потоки неоднородны и поперечное перемещение отдельных сгустков (вращение) может приводить к ошибкам измерения скорости по взаимному расположению фронта свечения в различных сечениях по оси — на разных световодах (развёртке поперёк оси).

Существенной зависимости скорости продольного движения лидирующих сгустков плазмы в зависимости от сорта газа выявлено не было. Для всех трёх газов (H_2 , Ne и Ar) она составляет $V = (0,3\text{—}1,4)10^7$ см/с. В серии экспериментов, проводимых с каждым газом, наблюдалась эволюция параметров в каждом новом разряде. Это может быть вызвано тем, что рабочий газ загрязняется дегазирующимися после разрядов примесями. Особенно хорошо этот эффект виден в экспериментах с водородом: к легкому газу примешиваются более тяжёлые примеси, адсорбированные поверхностью вакуумной камеры ранее и высвобождающиеся под действием электрического разряда. Структура плазмы с каждым разрядом всё больше схожа со структурой, наблюдаемой в экспериментах с тяжёлыми газами.

Разработанные электронно-оптические диагностики показали свою эффективность. В дальнейших экспериментах в сочетании с другими методами исследований можно будет получить более детальную

информацию о конфигурации и других динамических характеристиках плазменных струй, например, связать динамику плазмы в пролётной камере с особенностями разряда и изменениями интенсивности излучения непосредственно в области самого плазменного фокуса.

Работа выполнена при поддержке проектов РФФИ 12-02-12078-офи_м и РФФИ 11-02-00492.

REFERENCES

1. **Ryutov D.D., Derzon M.S., Matzen M.K.** The physics of fast Z-pinch. — *Reviews of Modern Physics*, 2000, vol. 72, pp. 167—223.
2. **Suzuki-Vidal F., Lebedev S.V., Ciardi A. et al.** — *Astrophysics and Space Science Proceedings*, 2009, Part 3, pp. 195—204.
3. **Ampleford D.** Experimental study of plasma jets produced by conical wire array Z-pinch. — In: PhD Thesis, Imperial College, London, 2005.
4. **Aleksandrov V.V., Grabovskiy E.V., Zukakishvili G.G. et al.** — *Fizika plazmy (Plasma Physics)*, 2008, vol. 34, № 10, pp. 901—907 (in Russian).
5. **Aleksandrov V.V., Frolov I.N., Grabovskii E.V. et al.** — In: *Proc. of 15th Intern. Conf. BEAMS'2004*. St. Petersburg, 2005, pp. 834—837.
6. **Calamy H. et al.** — In: *8th Intern. Conf. on Dense Z-Pinch (DZP-2011)*. Biarritz, France, 5—9 June 2011.
7. **Anan'ev S.S., Bakshaev Yu.L., Blinov P.I. et al.** — *Fizika plazmy (Plasma Physics)*, 2009, vol. 35, № 5, pp. 1—13 (in Russian).
8. **Petrov D.P., Filippov N.V., Filippova T.I., Khrabrov V.A.** — In coll.: *Plasma Physics and problems of controlled thermonuclear reactions*. Edited by of M.A. Leontovich. — M.: Pub.house of USSR AS, 1958, vol. 4, pp. 170 (in Russian).
9. **Vikhrev V.V.** — *Fizika plazmy (Plasma Physics)*, 1977, vol. 3, p. 981 (in Russian).
10. **Krauz V.I., Salukvadze R.G., Khautiev E.Yu.** — *Fizika plazmy (Plasma Physics)*, 1985, vol. 11, issue 3, pp. 281—287 (in Russian).
11. **Filippov N.V.** — *Fizika plazmy (Plasma Physics)*, 1983, vol. 9, p. 25 (in Russian).
12. **Filippov N.V., Каракин М.А., Krauz V.I. et al.** — *Prikladnaya fizika (Applied physics)*, 1999, № 5, p. 43 (in Russian).
13. **Borowiecki M., De Chiara P., Dubrovsky A. et al.** — *Nucleonika*, 2001, 46 (Suppl. 1), p. S117.
14. **Demina E.V., Pimenov E.V., Maslyayev S.A. et al.** — *Fizika i khimiya obrabotki materialov (Physics and chemistry of materials treatment)*, 2010, № 3, p. 51 (in Russian).
15. **Ivanov L.I., Krokhin O.N., Dedyurin A.I. et al.** — *Perspektivnye materialy (Perspective materials)*, 2004, № 3, p. 31 (in Russian).
16. **Ivanov L.I., Dedyurin A.I., Borovitskaya I.V. et al.** — *Perspektivnye materialy (Perspective materials)*, 2006, № 5, p. 74 (in Russian).
17. **Krokhin O.N., Nikulin V.Ya., Tikhomirov A.A. et al.** — *Nanotekhnika (Nanotechnology)*, 2008, № 13, p. 52 (in Russian).
18. **Ivanov L.I., Borovitskaya I.V., Bondarenko G.G. et al.** — *Perspektivnye materialy (Perspective materials)*, 2009, № 3, p. 77 (in Russian).
19. **Didyk A.Yu., Ivanov L.I., Krokhin O.N. et al.** — *Reports of the Academy of Sciences*, 2012, vol. 442, № 3 (in Russian).
20. **Mikhaylov B.P., Ivanov L.I., Borovitskaya I.V. et al.** — *Reports of the Academy of Sciences*, 2012, vol. 442, № 5 (in Russian).
21. **Filippov N.V., Filippova T.I., Khutoretskaia I.V. et al.** — *Physics Letters A*, 1996, vol. 211, I. 3, p. 168.
22. **Krauz V.I., Mitrofanov K.N., Myalton V.V. et al.** — *Fizika plazmy (Plasma Physics)*, 2010, vol. 36, № 11, p. 997 (in Russian).
23. **Anan'ev S.S.** Gray-scale images registration on the pulsed high-current installations in the conditions of strong electromagnetic fields: Preprint IAE-6440/7. M., 2006 (in Russian).

AUTHORS

Ananyev S.S. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; ananyev_ss@nrcki.ru

Dan'ko S.A. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; danko_sa@nrcki.ru

Mylton V.V. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia

Kalinin Yu.G. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; Kalinin_yg@nrcki.ru

Krauz V.I. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia

Vinogradov V.P. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia;
vpvinogradov@yandex.ru

Vinogradova Yu.V. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia

Received 2 October 2013

Problems of Atomic Science and Technology

Ser. Termoyadernyi sintez, 2013, vol. 36, issue 4, pp.102—110