

04;12

## Исследование динамики токовой перемычки в коаксиальном ускорителе плазмы

© А.В. Воронин, В.К. Гусев, С.В. Кобяков

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН  
194021 Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: voronin.mhd@mail.ioffe.ru

(Поступило в Редакцию 26 октября 2010 г.)

Впервые проведено исследование поведения токовой перемычки в коаксиальном ускорителе с импульсной подачей рабочего газа, высвобождаемого электрическим разрядом из порошка гидрида титана. Предложен новый метод регистрации движения токовой перемычки, основанный на использовании светодиодов. Экспериментально исследовано поведение токовой перемычки в ускорителях с аксиальным и радиальным напуском газа. Для стабильной работы ускорителя, генерирующего чистую плазменную струю с большой кинетической энергией, оптимизированы его параметры: размеры и полярность электродов, направление потока газа, временная задержка между началом подачи газа в ускоритель и его ионизацией. Исследована возможность применимости электродинамической модели к описанию ускорителей данного типа. Получено удовлетворительное соответствие экспериментальных и расчетных данных для скорости разгоняемой плазмы.

### Введение

Потоки плотной и чистой плазмы с большой кинетической энергией представляют большой интерес для решения прикладных и фундаментальных задач. В мировой практике устройства ускорения плазмы широко используются для заполнения плазменных устройств, облучения конструкционных, полупроводниковых, биологических материалов, а также двигателей космических объектов и т.п. Ускорители плазмы или плазменные пушки используются в качестве основного источника в экспериментах с плазмой и ее приложениях [1]. В таких пушках плазма создается и ускоряется электрическим разрядом между электродами с коаксиальной геометрией. Плазменный кластер с плотностью  $10^{20} \text{ m}^{-3}$  разгоняется до скорости более 100 km/s. Однако растекание токового пласта перемычки вдоль электродов в процессе разгона плазмы существенно ограничивает энергетические характеристики такого источника.

Впервые теоретическая модель для описания процесса в импульсном ускорителе была сформулирована в работе [2], а затем подробно описана в монографии [3]. Рассматривалась электродинамическая модель ускорения, в которой плазма представлялась в виде токопроводящей перемычки с сосредоточенной массой, ускоряющейся под действием электродинамической силы. Однако такая модель не всегда реализуется на практике. Как правило, после начальной фазы разряда токовая перемычка расслаивается, локализуется на входе и на выходе ускорителя, что препятствует эффективному ускорению плазмы. При этом генерируется большое количество примесей из распыляемых электродов.

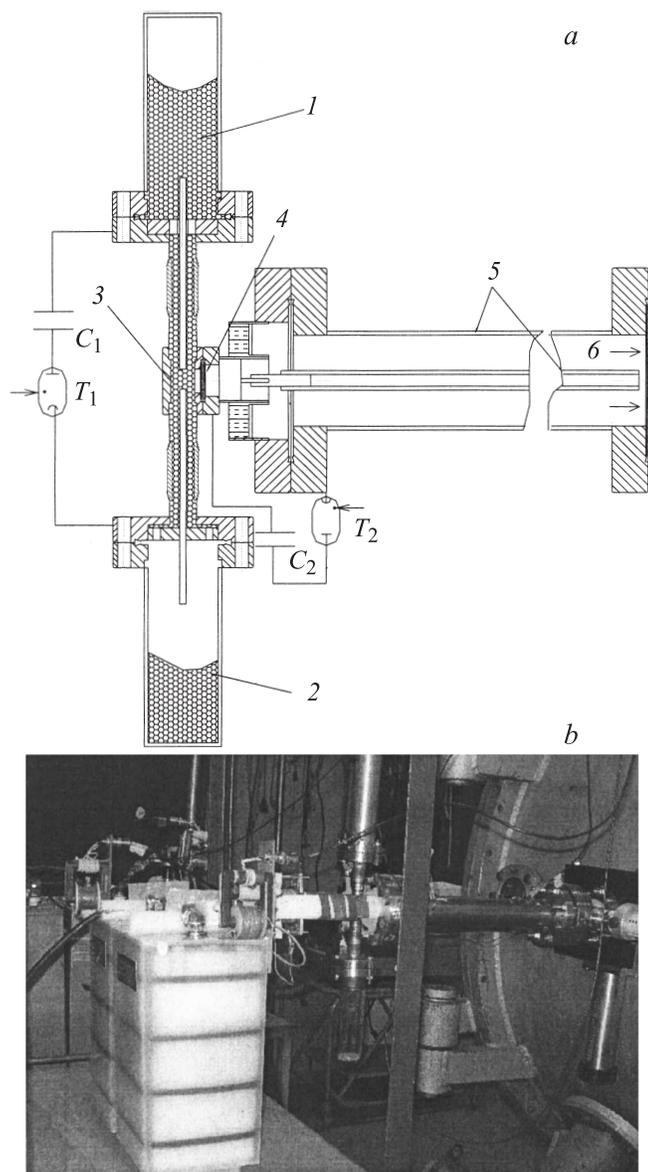
Экспериментальное изучение ускорения плазмы при различных режимах работы коаксиального ускорителя с импульсным напуском газа рассмотрено в работах [4,5]. В этих исследованиях для регистрации движения то-

кового слоя использовались магнитные зонды. Было замечено, что после достижения токовой перемычкой торца ускорителя наблюдаются образование замкнутой токовой петли на выходе ускорителя и медленный распад этой петли. Исследование распределения тока в импульсном ускорителе плазмы с эрозией диэлектрика было проведено в работе [6]. Токовая перемычка регистрировалась с помощью поясов Роговского. В основном ток протекал по поверхности диэлектрика на входе в ускоритель в течение всего разряда.

В настоящей работе изучалось распределение тока по длине ускорителя и особенности ускорения плазмы в коаксиальном ускорителе с взрывным способом подачи газа. Независимая подача и большая начальная плотность газа являлись существенными отличиями настоящего источника от известных ускорителей с эрозией диэлектрика и импульсным напуском газа. Динамика движения слоя плазмы внутри ускорителя впервые исследовалась с помощью светодиодных датчиков тока. Этот способ оказался простым, надежным и не влиял на протекание разрядного тока по электродам. В результате исследований были оптимизированы параметры пушки, позволяющие генерировать поток чистой высокоэнергетичной плазмы.

### Методика

В разрабатываемой плазменной пушке использовался взрывной способ подачи газа в коаксиальный ускоритель (рис. 1, а) [7]. Газогенерирующая ступень такой пушки содержит гранулы титана, насыщенные водородом. Ступень состоит из двух контейнеров для свежих и использованных гранул. В узком канале между контейнерами интенсивным разрядом через гранулы высвобождается рабочий газ. Плотное водородное облако проходит через



**Рис. 1.** *a* — схема плазменной пушки с взрывным способом подачи рабочего газа в ускоритель: 1 — свежие гранулы; 2 — отработанные гранулы; 3 — канал между двумя электродами, заполненный гранулами; 4 — фильтр; 5 — электроды коаксиального ускорителя; 6 — направление потока плазмы, *b* — общий вид пушки на стенде с малоиндуктивным источником из двух конденсаторов  $C_1$ ,  $C_2$ , коммутаторов тока  $T_1$ ,  $T_2$  и шинпровода.

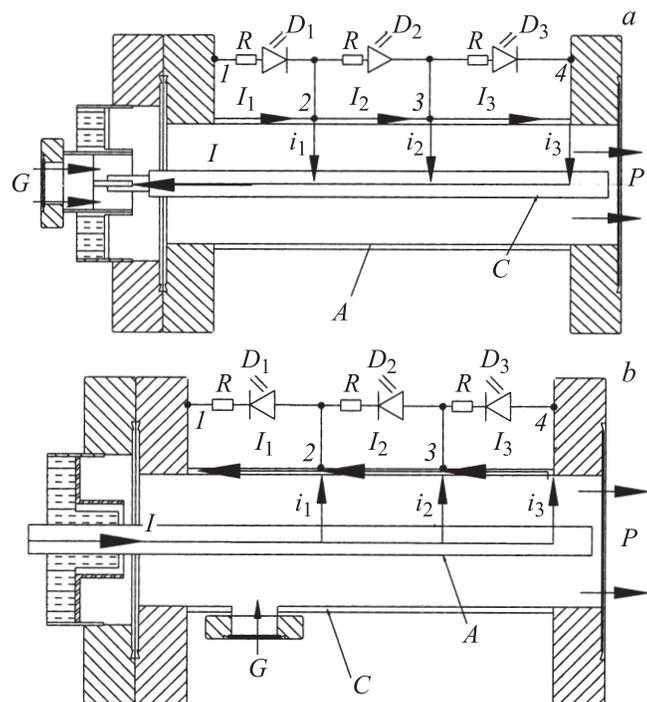
сетчатый фильтр и заполняет область между электродами плазмогенерирующей ступени коаксиального ускорителя. Газ ионизуется и ускоряется в соответствии с классическим „сценарием работы пушки Маршалла“ [8]. Источник питания коаксиального ускорителя оснащен двумя малоиндуктивными конденсаторными накопителями (КПИМ1-7-80), шинпроводами и малогабаритным коммутатором тока (РУ-86) (рис. 1, *b*). Принципы, примененные в конструкции источника, позволяли получать

в течение  $20 \mu\text{s}$  плотную (более  $10^{22} \text{ m}^{-3}$ ) высокоионизованную свободную от примесей струю плазмы, движущуюся со скоростью несколько сотен километров в секунду с полным количеством частиц  $10^{19}$  и более, что соответствует разгоняемой массе токовой переключки  $\sim 17 \mu\text{g}$ .

Экспериментальные исследования проводились на стенде. Вакуумная камера объемом  $2.5 \text{ m}^3$  была оснащена плазменной пушкой и диагностикой. Пушка применялась для облучения материалов и подачи топлива в токамак [9–11]. Плотность плазменной струи измерялась трехзеркальным He–Ne лазерным интерферометром. Спектральный состав струи регистрировался обзорным (AvaSpec 3648) спектрометром. Структура и скорость потока исследовались по ее свечению с помощью высокоскоростной стрик камеры (Bifo Company K008 streak & uniframe camera). Камера регистрировала свечение плазменной струи через щель, расположенную вдоль распространения потока с частотой кадров  $\sim 1 \text{ MHz}$ . Синхронизация камеры с импульсом плазмы осуществлялась током ускорителя. Для этого была разработана оригинальная схема с использованием светодiodeного оптоволоконного преобразователя. Полная энергия потока измерялась калориметром, выполненным в виде конуса из металлической фольги с установленными на нем термодарами.

Проводились исследования ускорителей с радиальным и аксиальным напуском рабочего газа. Схемы ускорителей с расположенными на них датчиками тока представлены на рис. 2. Для изучения поведения токовой переключки на внешний электрод ускорителя присоединялись три независимых светодиода (TL WR9600). Токи  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ , протекающие через наружный электрод ускорителя, создавали падение напряжения вдоль электрода и вызывали изменение интенсивности свечения светодиодов  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$  в зависимости от амплитуды и времени прохождения токовых переключек  $i_1$ ,  $i_2$ ,  $i_3$  через три исследуемые области. Излучение светодиодов через оптоволоконно передавалось на интегрированные фотоприемники, расположенные вдали от источника электромагнитных наводок. Фотоприемники преобразовывали световые сигналы в электрические, которые с помощью аналого-цифрового преобразователя передавались в компьютер. Временное разрешение системы составляло  $\sim 100 \text{ ns}$ . Линейная зависимость интенсивности свечения от тока ускорителя обеспечивалась с помощью ограничивающих сопротивлений  $R \sim 100 \Omega$ , величина которых превышала внутреннее сопротивление светодиодов в рабочем состоянии. Относительная калибровка системы регистрации проводилась с помощью импульса тока, одновременно измеряемого всеми светодиодами. Для этого контакты 2 и 3 отрывались от внешнего электрода. Измерения амплитуды и формы полного тока с помощью пояса Роговского позволили выполнить абсолютную калибровку системы.

Светодиод  $D_1$  измерял полный ток  $I_1 = i_1 + i_2 + i_3$ , протекающий через все три исследуемые области. Све-



**Рис. 2.** Коаксиальный ускоритель с расположенными на наружном электроде светодиодными датчиками тока с: *a* — аксиальным, *b* — радиальным напуском газа; *A* — анод; *C* — катод; *P* — направление потока плазмы; *G* — направление подачи газа.

одиод  $D_2$  регистрировал ток  $I_2 = i_2 + i_3$  разряда, горящий в центральной и концевой областях ускорителя. Светодиод  $D_3$  измерял ток разряда  $I_3 = i_3$ , горящий на выходе ускорителя. Из разности токов  $I_1$  и  $I_2$  вычислялась доля тока  $i_1$  разряда, горящего в начале ствола. Аналогично из разности токов  $I_2$ ,  $I_3$  определялась доля тока  $i_2$  разряда, горящего в середине ствола ускорителя.

Характеристики токовой перемычки в исследуемом ускорителе рассчитывались с помощью системы уравнений электродинамической модели [3]. Модель позволяет проводить анализ основных интегральных характеристик ускорителя вместе с параметрами разрядной цепи. Она описывает ускорение сосредоточенной массы  $M$  под действием электродинамической силы. Омическое сопротивление электродов и плазмы, а также другие механизмы потерь энергии в ускорителе не учитывались

$$M \frac{d^2z}{dt^2} = \frac{1}{2} I^2 \frac{dL}{dz}, \quad (1)$$

$$I = -C_0 \frac{dU}{dt}, \quad (2)$$

$$U = \frac{d(LI)}{dt}, \quad (3)$$

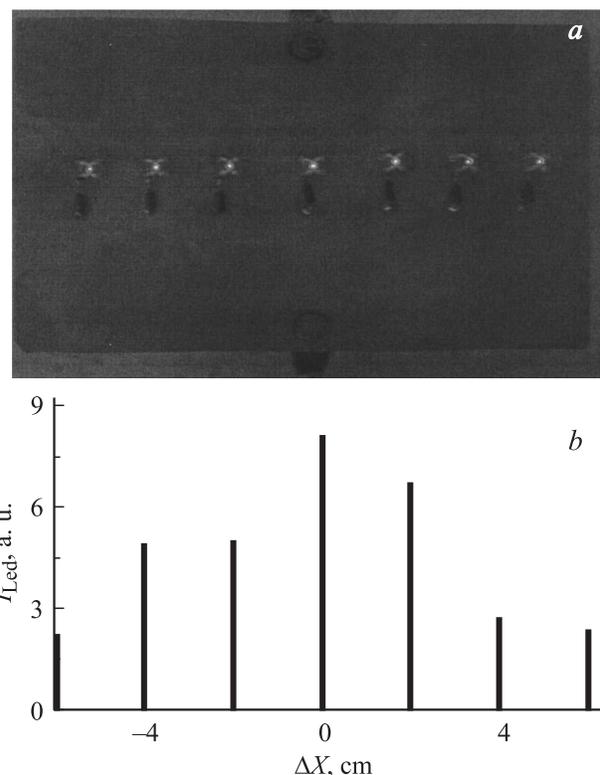
$$L = L_0 + bz, \quad (4)$$

где  $t$  — время,  $I$  — ток в цепи,  $C_0$  — емкость конденсаторного накопителя,  $U$  — напряжение между

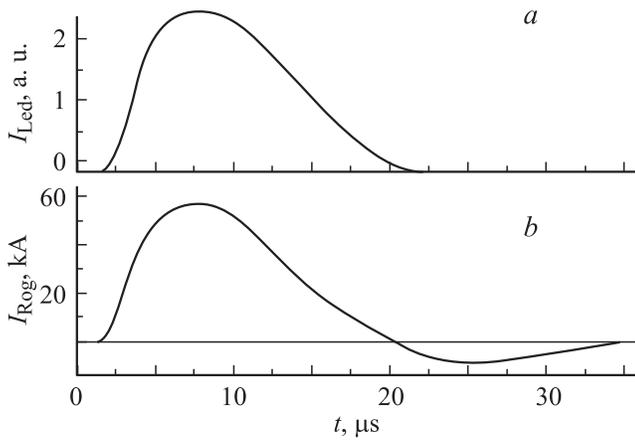
электродами,  $L_0$  — начальная индуктивность цепи,  $b$  — рассредоточенная индуктивность коаксиальной системы электродов. (1) — уравнение движения; (2), (3) — уравнения Кирхгофа для электрической цепи; (4) — полная индуктивность цепи. Система уравнений (1)–(4) является нелинейной и для конкретных случаев решалась численным методом Рунге–Кутты, с автоматическим выбором шага, встроенной процедурой языка MatLab.

## Результаты исследований

Предварительно метод регистрации токов с помощью светодиодов был апробирован в эксперименте по визуализации растекания тока в металлической пластине. На рис. 3, *a* приведена фотография стальной пластины толщиной 0.2 mm и размерами 170 × 130 mm с установленными на ней светодиодами. С помощью токоподводов импульсный источник тока ( $\sim 1$  kA) подключался к средним точкам длинных сторон пластины. Видно, что при протекании тока через пластину значения интенсивности излучения светодиодов различаются. На рис. 3, *b* представлена зависимость интегральной интенсивности излучения светодиодов от расстояния до оси токоподводов. Видно, что интенсивность излучения наибольшая на оси токоподводов и уменьшается при удалении от оси к



**Рис. 3.** Визуализация процесса растекания тока в металлической пластине; *a* — стальная пластина с токоподводами и установленными на ней излучающими светодиодами, *b* — зависимость интегральной интенсивности излучения светодиодов  $I_{Led}$  от расстояния до оси токоподводов  $\Delta X$ .

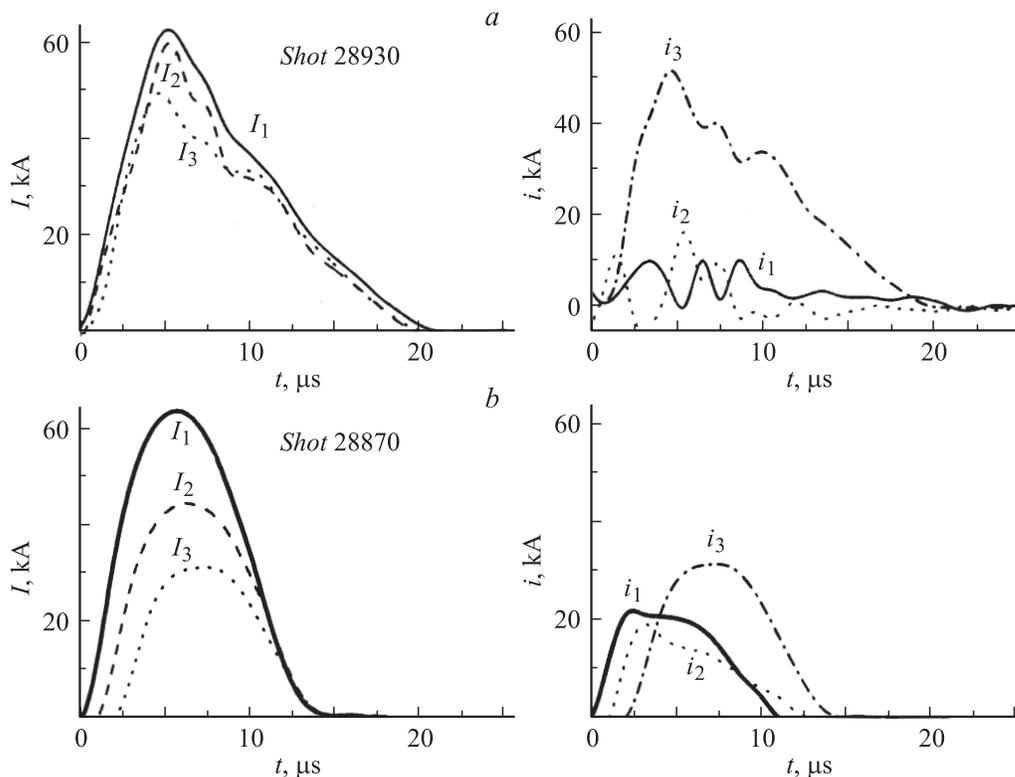


**Рис. 4.** Зависимость полного тока ускорителя от времени  $t$ , измеренная с помощью:  $a$  — светодиода  $I_{\text{Led}}$ ;  $b$  — пояса Роговского  $I_{\text{Rog}}$ .

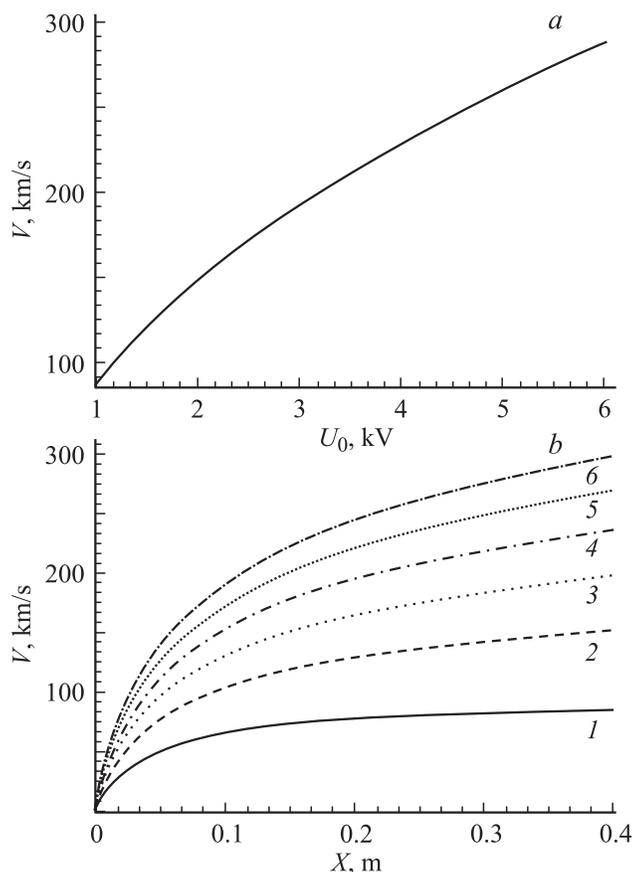
краям пластины. Ассиметрия распределения, вероятно, вызвана отсутствием калибровки светодиодов. Проведенный эксперимент показал преимущества светодиодов для измерения токов и напряжений большой величины в условиях сильных электромагнитных наводок по сравнению с общеизвестными методами. Для калибровки системы одновременное измерение полного тока в ускорителе проводилось с помощью светодиода и пояса Роговского.

На рис. 4 представлены результаты измерений тока двумя методами. Видно хорошее совпадение формы тока в течение первой полуволны. Обратная полуволна тока светодиодом не регистрировалась из-за его однополярной проводимости.

Исследование поведения токовой перемычки в ускорителе проводилось с различными направлениями подачи рабочего газа, полярностью электродов, а также задержкой между началом напуска газа в ускоритель и его ионизацией  $\Delta t_p$  [12]. Результаты исследований поведения токовой перемычки в различных условиях работы ускорителя представлены на рис. 5. Как правило, при аксиальном способе напуска газа, любой полярности электродов и задержке  $\Delta t_p$ , основной ток протекал либо в начале, либо в конце ствола (рис. 5,  $a$ ). Калориметр регистрировал незначительный поток энергии плазмы. Спектральный состав плазмы на выходе ускорителя был насыщен примесями материала электродов. При радиальном напуске газа, полярности электродов, аналогичной режиму плазменного фокуса и задержке  $\Delta t_p \sim 250\text{--}350\ \mu\text{s}$  значительная часть тока перемещалась вдоль электродов ускорителя (рис. 5,  $b$ ). Кинетическая энергия потока плазмы, измеренная калориметром, увеличивалась в десятки раз. На выходе из ускорителя спектрометр практически не регистрировал какого-либо излучения. Это свидетельствует о полной ионизации потока чистой водородной плазмы. Интерферометр регистрировал на выходе наибольшую плотность плазмы. Скорость потока достигала  $200\text{--}250\ \text{km/s}$ .



**Рис. 5.** Зависимости токов, протекающих через участки наружного электрода ( $I_1, I_2, I_3$ ) и в зазоре между электродами ( $i_1, i_2, i_3$ ) от времени  $t$  при аксиальном ( $a$ ) и радиальном ( $b$ ) напуске газа.



**Рис. 6.** Зависимость скорости движения токовой перемычки  $V$  от:  $a$  — напряжения емкостного накопителя  $U_0$  (для  $X = 0.35$  м);  $b$  — положения  $X$  в стволе ускорителя в процессе разгона для различных напряжений накопителя (1, 2, 3, 4, 5, 6 — для  $U_0 = 1, 2, 3, 4, 5, 6$  кВ соответственно);  $L_0 = 31$  нН,  $M = 17$  мкг,  $b = 4.6 \cdot 10^7$  Н/м,  $C_0 = 160$  мкФ.

В некоторых экспериментах на выходе из ускорителя было обнаружено формирование токовой петли. В этих экспериментах светодиоды подключались к различным участкам центрального электрода изнутри с помощью проводов, проходящих по внутренней трубе электрода.

С помощью системы уравнений упрощенной электродинамической модели были проведены расчеты динамики движения токовой перемычки в исследуемом ускорителе. На рис. 6,  $a$ , представлена зависимость скорости движения токовой перемычки от напряжения емкостного накопителя. Параметры для расчета взяты из эксперимента:  $L_0 = 31$  нН,  $M = 17$  мкг,  $b = 4.6 \cdot 10^7$  Н/м,  $C_0 = 160$  мкФ,  $X = 0.35$  м. Видно, что скорость возрастает, но замедляет свой рост с увеличением напряжения. В перспективе применение конденсаторных накопителей с большим напряжением, вероятно, позволит увеличить кинетическую энергию потока плазмы. На рис. 6,  $b$  представлены зависимости скорости движения  $V$  токовой перемычки от её положения  $X$  в стволе ускорителя в процессе разгона для различных начальных напряжений конденсаторного накопителя. Видно, что при всех рабо-

чих напряжениях на длине ствола исследуемого ускорителя токовый слой успевает разогнаться практически до стационарных значений. Величина расчетной скорости примерно совпадала с измеренной в эксперименте с помощью стрик-камеры. Увеличение длины ускорителя больше 0.5 м не позволило увеличить скорость потока плазмы. Токовая перемычка не регистрировалась светодиодами датчиками в конце длинного ствола ускорителя.

В ходе эксперимента диаметры наружного и центрального электродов были также оптимизированы на основании получения наибольших значений скорости и плотности потока плазмы. Диаметр наружного электрода выбирался минимальным с целью уменьшения растекания рабочего газа и увеличения плотности генерируемой плазмы. Увеличение диаметра наружного электрода приводило к снижению энергии струи. Диаметр центрального электрода также выбирался малым с целью увеличения ускоряющего магнитного поля в коаксиальном ускорителе. Однако уменьшение диаметров приводило к загрязнению потока плазмы примесями материала электродов. Минимальные размеры оптимизировались по наименьшему загрязнению струи примесями.

## Заключение

Проведено исследование поведения токовой перемычки в коаксиальном ускорителе с взрывным способом подачи газа. Предложен и испытан новый способ исследования движения токовой перемычки в ускорителях с аксиальным и радиальным напуском газа. Впервые исследована динамика движения слоя плазмы внутри ускорителя с помощью светодиодных датчиков тока. При радиальном напуске газа, оптимальных полярности, размерах электродов, а также задержке между началом напуска газа в ускоритель и его ионизацией часть тока перемещалась вдоль электродов ускорителя. Это позволило получить скорость потока плазмы, близкую к расчетной, с помощью электродинамической модели, избежать эрозии материала электродов ускорителя, обеспечить высокий коэффициент ионизации и крайне малое содержание вредных примесей в инжектируемой плазме.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ, Программы президиума РАН, гранта РФФИ № 11-08-00813-а, а также Научного Соглашения МАГАТЭ 14720.

## Список литературы

- [1] Гришин С.Д., Лесков Л.В., Козлов Н.П. Плазменные ускорители. М: Машиностроение, 1983.
- [2] Арцимович Л.А., Лукьянов С.Ю., Подгорный И.М. // ЖЭТФ. 1957.Т. 33. Вып. 1. С. 1–8.
- [3] Колесников П.М. Электродинамическое ускорение плазмы. М.: Атомиздат, 1971. С. 198–284.

- [4] Физика и применение плазменных ускорителей / Под ред. А.И. Морозова. Минск: Наука и техника, 1974. С. 61–63.
- [5] *Калмыков А.А., Тимофеев А.Д., Шевчук Б.А.* // ЖТФ. 1970. Т. 40. Вып. 12. С. 2553–2562.
- [6] *Калыгин А.Г., Козлов Н.П., Лесков Л.В., Саенко В.Б.* // ЖТФ. 1970. Т. 40. Вып. 3. С. 462–465.
- [7] *Voronin A.V., Gusev V.K., Petrov Yu.V.* et al. // *Nukleonika*. 2008. Vol. 52. P. 103.
- [8] *Marshall J.* // *Phys. Fluids*. 1960. Vol. 3. P. 134–135.
- [9] *Абрамова К.Б., Воронин А.В., Гусев В.К.* // *Физика плазмы*. 2005. Т. 31. Вып. 9. С. 1–9.
- [10] *Voronin A.V., Gusev V.K., Petrov Yu.V.* et al. // *Nuclear Fusion*. 2005. Vol. 45. P. 1039.
- [11] *Voronin A.V., Gusev V.K., Petrov Yu.V.* et al. // *Nukleonika*. 2006. Vol. 51. P. 85.
- [12] *Voronin A.V., Gusev V.K., Dyomina E.V.* et al. // 37<sup>th</sup> EPS Conf. on Plasma Physics, Ireland, 2010. P. 192.