

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ БЫСТРЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В МАГНИТНОЙ ЛОВУШКЕ ПРОБКОТРОННОГО ТИПА НА СТЕНДЕ НПМ-01

INVESTIGATION OF FAST ELECTRONS MOTION IN MAGNETIC TRAP OF PROBKOTRON TYPE ON THE BENCH NPM-01

А. Н. Залялов, А. В. Перминов, А. А. Тренькин, Ю. М. Шибитов, А. Е. Широков

A. N. Zalyalov, A. V. Perminov, A. A. Trenkin, Yu. M. Shibitov, A. E. Shirokov

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» г. Саров Нижегородской обл.

Russian Federal Nuclear Center –All-Russia Scientific Research Institute of Experimental Physics

Представлены постановка и результаты исследования на стенде НПМ-01 движения быстрых электронов в магнитной ловушке пробкотронного типа длиной ~5,5 м. Источником электронов является малогабаритный ускоритель, испускающий за 200 нс электроны с энергией 20 кэВ и током пучка 10 А. Зарегистрирована динамика электронов в магнитной ловушке, включающая движение по ларморовским орбитам вдоль магнитных линий, отражение от магнитных пробок, дрейф по азимуту пробкотрона с образованием протяженной электронной оболочки.

Результаты экспериментальных измерений хорошо согласуются с результатами численного моделирования данного явления, проведенного с помощью методики расчета переноса электронов в осесимметричном магнитном поле.

The experiment arrangement and investigation results of the fast electrons motion in the magnetic trap of a probkotron type on the bench NPM-01 inside the chamber of 7 m length and 1 m diameter at the presence of a quasi-stationary axisymmetric magnetic field at the pressure of 10^{-6} Tor are presented. The magnetic field is a magnetic trap with a mirror ratio $B_{\max}/B_{\min} = 8$ and a distance between the «plugs» of 5.5 m. The resource of fast electrons is an electron accelerator with the energy of 20 keV, the beam current of 10 A, and the length of 200 ns. A shunt circuit and radiographic plate are used to define spatial-time characteristics of fast electrons at their motion in the magnetic trap.

The results of the experimental measurements are matched with the results of the numerical simulation of this phenomenon. It was carried out with the use of the calculation method of the electron transport in the axisymmetric magnetic field. It is shown that the magnetic field configuration is a magnetic trap for most of the fast electrons emitted by an accelerator. The fast electrons with different velocities drift along the probkotron azimuth moving on Larmor orbits and reflecting from magnetic plugs. It leads to the electron shell formation.

Введение

Удержание быстрых электронов в магнитных ловушках и влияние на этот процесс различных внешних условий представляет большой научный и практический интерес, в том числе при исследованиях таких крупномасштабных геофизических явлений, как динамика радиационных поясов Земли [1], высотные ядерные взрывы [1, 2, 3], инжекция электронных сгустков в ионосферу и магнитосферу [4, 5].

Ввиду сложности данных явлений целесообразно проведение лабораторного моделирования определяющих их физических процессов [6, 7, 8].

Такое моделирование является основой для тестирования соответствующих физико-математических моделей и повышения достоверности получаемых с их помощью расчетных данных.

В данном докладе представлены постановка и результаты экспериментального и расчетно-теоретического исследования движения быстрых электронов в магнитной ловушке пробкотронного типа на стенде НПМ-01.

Описание стенда НПМ-01

Данные экспериментальные исследования проводились на стенде НПМ-01 [9], созданном

в РФЯЦ-ВНИИЭФ для экспериментального моделирования физических процессов в замагниченной плазме.

Стенд включает в себя: камеру моделирования, систему вакуумирования и газонапуска, систему формирования квазистационарного магнитного поля, средства диагностики и систему автоматизированного управления (рис. 1).

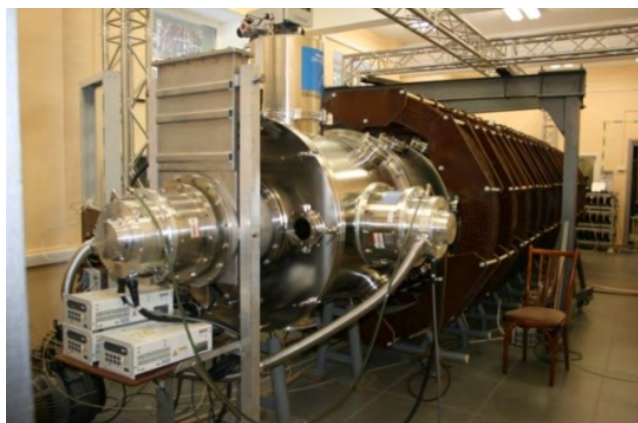


Рис. 1. Стенд НПМ-01: камера моделирования, система вакуумирования и соленоид системы формирования магнитного поля

Камера моделирования представляет собой пятисекционный цилиндр из нержавеющей стали общей длиной 7,5 м и диаметром 1 м.

Система вакуумирования обеспечивает остаточное давление воздуха в камере при постоянной откачке до $4 \cdot 10^{-7}$ Тор, а также напуск и поддержание заданного давления рабочего газа.

Для создания в объеме камеры квазистационарного осесимметричного магнитного поля с индукцией до $B_0 = 3$ кГс используется секционированный соленоид. Камера моделирования находится внутри соленоида соосно с ним. Сегменты соленоида установлены эквидистантно. Ток в соленоидах обеспечивается модульным источником питания, собранным на основе стартерных аккумуляторов. Источник питания генерирует напряжение 0...800 В и ток до 500 А в импульсах секундного диапазона длительности.

Автоматизированная система управления позволяет дистанционно осуществлять: контроль и запуск оборудования, управление системой формирования магнитного поля, управление системами откачки и газонапуска, управление и сбор данных с измерительных приборов.

Для создания электронного пучка в камере был разработан малогабаритный ускоритель моноэнергетических электронов с энергией до 45 кэВ,

длительностью импульса 200 нс и плотностью тока до 10 А/см^2 . Размер ускорителя составляет 3 см.

Предварительные расчеты

При проведении лабораторного моделирования необходимо обеспечить длительное удержание электронов в протяженной открытой магнитной ловушке (~ 5 м) и возможность измерений их потока в различных точках и на временах в несколько раз больших, чем период азимутального дрейфа электронов (несколько мкс). Для этого, в частности, было необходимо, чтобы электроны, испущенные ускорителем, после своего первого отражения при движении вдоль геомагнитной линии не попали обратно на ускоритель.

Для выбора конкретной ловушечной конфигурации квазистационарного магнитного поля в камере НПМ-01 были проведены расчеты стационарных уравнений Максвелла с источниками в виде кольцевых токов. Распределение индукции магнитного поля внутри камеры показано на рис. 2, а.

Для определения расположения источника быстрых электронов в магнитной ловушке (см. рис. 2, а) были проведены оценки максимального локального азимутального смещения электрона l_{vd} с энергией 20 кэВ за время одного колебания (рис. 2, б) и ларморовского радиуса r_L (рис. 2, в). На основе этих данных также получается, что трубка тока электронов в области их отражения будет иметь радиус $\sim 2 \div 3$ см и раширяться до ~ 10 см

в области низкого магнитного поля. За период колебания электронов вдоль магнитной линии, они смещаются по азимуту на угол $\sim 7^\circ$, и за полный разворот по азимуту совершают порядка 50 колебаний. После первого колебания в области расположения ускорителя электронов их смещение по азимуту составляет ~ 2 см, т. е. значительная их часть после первого возвращения в область ускорителя обратно на него не попадает и продолжает удерживаться в магнитной ловушке.

С использованием многопроцессорной методики расчета переноса электронов в осесимметричном магнитном поле было получено детальное пространственно-временное распределение характеристик быстрых электронов в камере.

Источник электронов при этом моделировался цилиндром радиусом 1,5 см и с образующей длиной 3 см. Электроны имеют энергию 20 кэВ и выпускаются диском радиусом 0,75 см на его плоской грани, центр которой находится в точке с координатами $\rho = 20$ см, $z = 170$ см (см. рис. 2).

Пучок электронов является изотропным, угол разлета $\alpha = 28^\circ$, инжекция осуществляется под углом 60° к оси камеры.

Было проведено 4 расчета: один без электронного датчика и три с различными положениями электронного датчика. Точковый датчик в виде плоского диска диаметром 10,5 см располагается в расчетах в осевой плоскости, проходящей через центр ускорителя, как показано на рис. 4. Его нормаль направлена вдоль оси камеры. Модели датчика и электронного ускорителя в расчетах являются поглощающими для попадающих на них быстрых электронов.

Численное моделирование проводилось до момента времени 10 мкс после включения электронного ускорителя. В результате проведенных

расчетов можно сделать следующие выводы.

Электроны после испускания ускорителем движутся по циклическим орбитам вдоль соответствующей линии магнитного поля. Отражаются в области магнитной пробки при $z \approx 500$ см и возвращаются обратно в область ускорителя (см. рис. 3), но за счет азимутального дрейфа большая их часть проходит мимо него. Далее они отражаются обратно в области второй магнитной пробки ($z \approx 100$ см) и продолжают свободно колебаться в магнитной ловушке. За счет разброса скоростей электронов по направлению при их испускании источником они имеют различные периоды азимутального движения, а также периоды колебаний вдоль магнитной линии. Это приводит к образованию криволинейной электронной трубки и после-

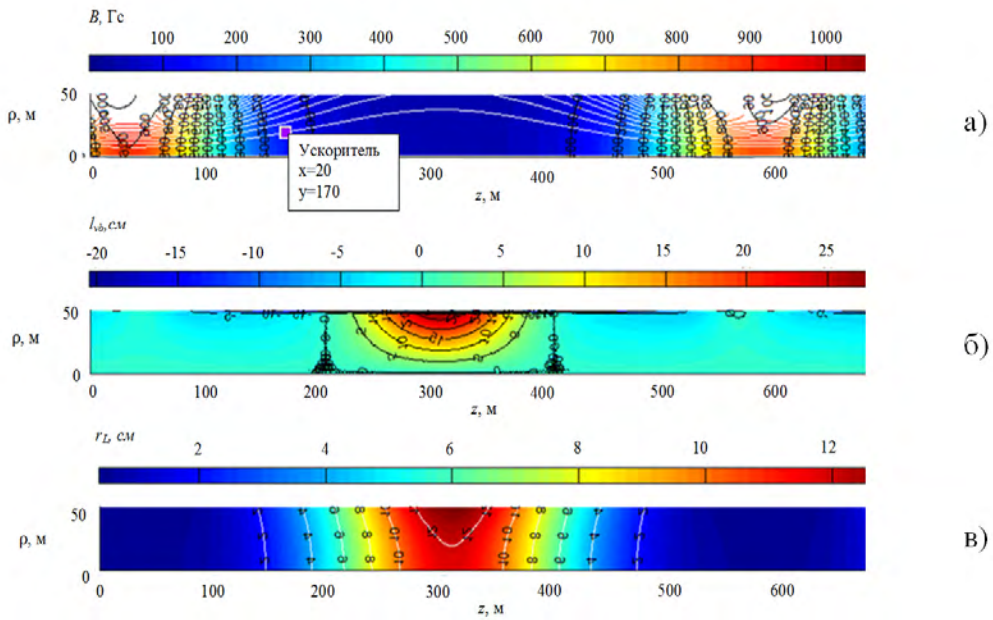


Рис. 2. Результаты расчетов: а – распределение магнитного поля внутри камеры, б – азимутальное смещение l_{φ} за время одного колебания вдоль магнитной линии, в - ларморовский радиус r_L

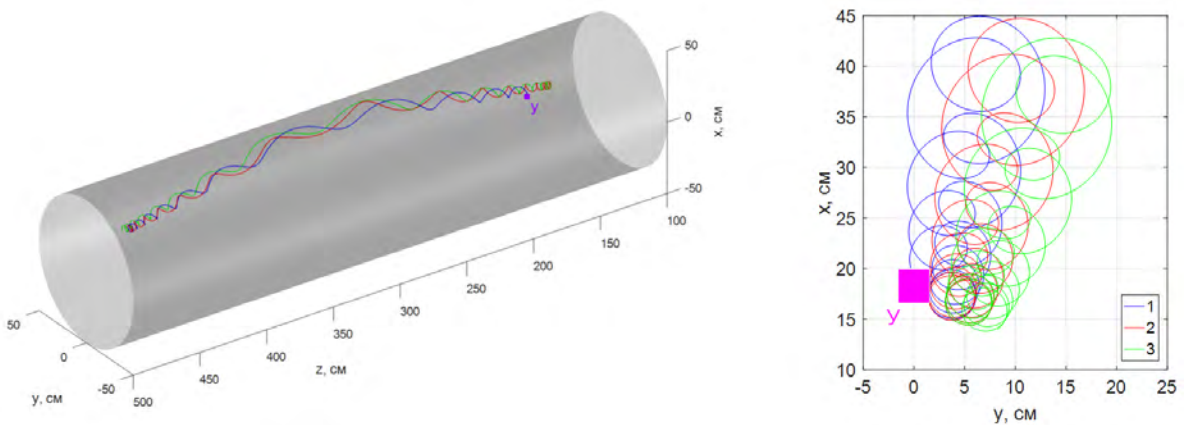


Рис. 3. Типовая траектория движения электрона из ускорителя в камере (1 – первый пролет от ускорителя в направлении вектора магнитного поля, 2 – первый пролет в направлении противоположном вектору магнитного поля, 3 – второй пролет в направлении магнитного поля, У – ускоритель электронов)

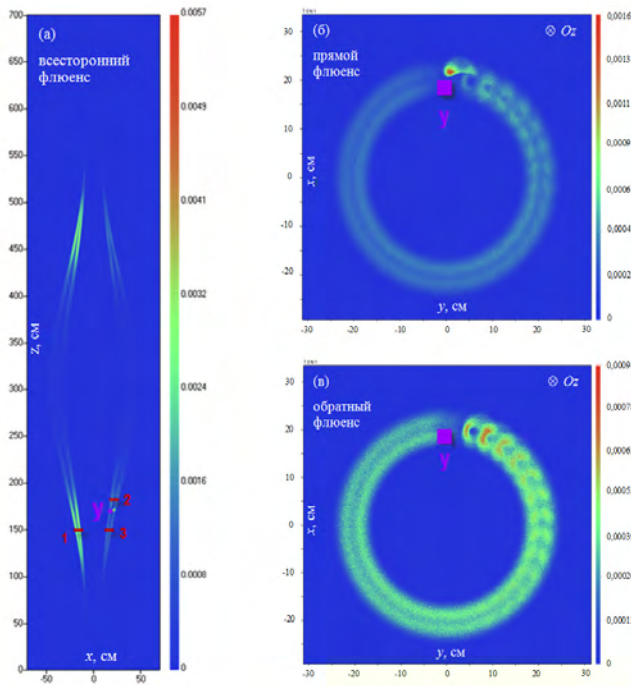


Рис. 4. Распределение флюенса быстрых электронов, деленное на полное количество частиц, в плоскостях, проходящих через: (а) – ускоритель и ось камеры (1, 2, 3 – положения измерительного датчика; У- ускоритель); (б) и (в) – ускоритель и перпендикулярно оси камеры

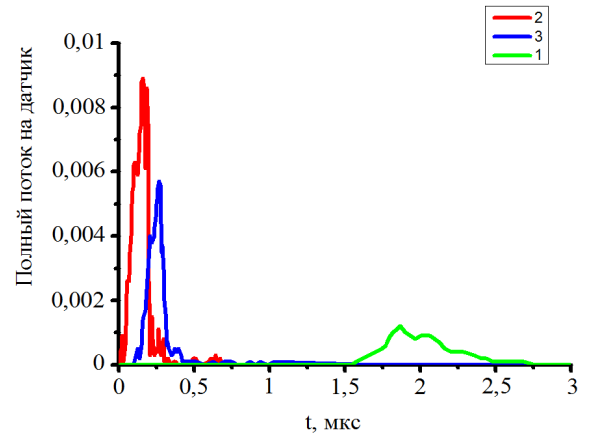


Рис. 5. Нормированный на количество частиц поток электронов, приходящих на электронный датчик в точках 1, 2, 3 (см. рис. 4)

дующему постепенному ее размытию по азимуту (см. рис. 4). В итоге через несколько периодов азимутального дрейфа происходит заполнение дрейфовой электронной оболочки толщиной от 5 до 10 см.

Временные зависимости потока электронов, приходящих на электронный датчик при его различных расположениях в камере, изображены на рис. 5. Видно, что характерное время колебания электронов вдоль магнитной силовой линии составляет ~ 100 нс, а период азимутального дрейфа равен $\sim 3,2$ мкс. За этот период электронная дрейфовая оболочка расплывается на $\sim 140^\circ$, следовательно, за 10 мкс она становится замкнутой.

Постановка экспериментов

Схема размещения оборудования в вакуумной камере при проведении исследования движения быстрых электронов в магнитной ловушке на стенде НПМ-01 показана на рис. 6.

Для формирования в камере магнитного поля с пространственной конфигурацией в виде магнитной ловушки используется четыре сегмента соленоида. Пробоочное отношение в магнитной

ловушке составляет $B_1 / B_0 = 8$, где B_1 – индукция магнитного поля на краях магнитной системы, B_0 – в центре магнитной системы. Рассчитанное распределение индукции магнитного поля на оси камеры стенда НПМ-01 показано на рис. 7.

Для инжектирования быстрых электронов в магнитную ловушку используется ускоритель моноэнергетических электронов с энергией 20 кэВ, током 10 А и длительностью импульса 200 нс [4]. Испускание электронов в экспериментах осуществлялось под углом 60° к оси $0z$ в соответствующей осевой плоскости, при этом ускоритель размещался в точке с координатами $r = 20$ см, $\varphi = 0^\circ$, $z = 170$ см.

Для исключения влияния фоновой газовой среды на движение быстрых электронов эксперименты проводились при давлении 10^{-6} Торр.

Ранее были проведены предварительные эксперименты, показавшие, что угол разлета пучка электронов с ускорителя с энергией 20 кэВ и током 10 А без магнитного поля составляет $\sim 30^\circ$. Изображение пучка электронов, зарегистрированное рентгенографической пластиной на расстоянии 1, 5 и 10 см от ускорителя, показано на рис. 8.

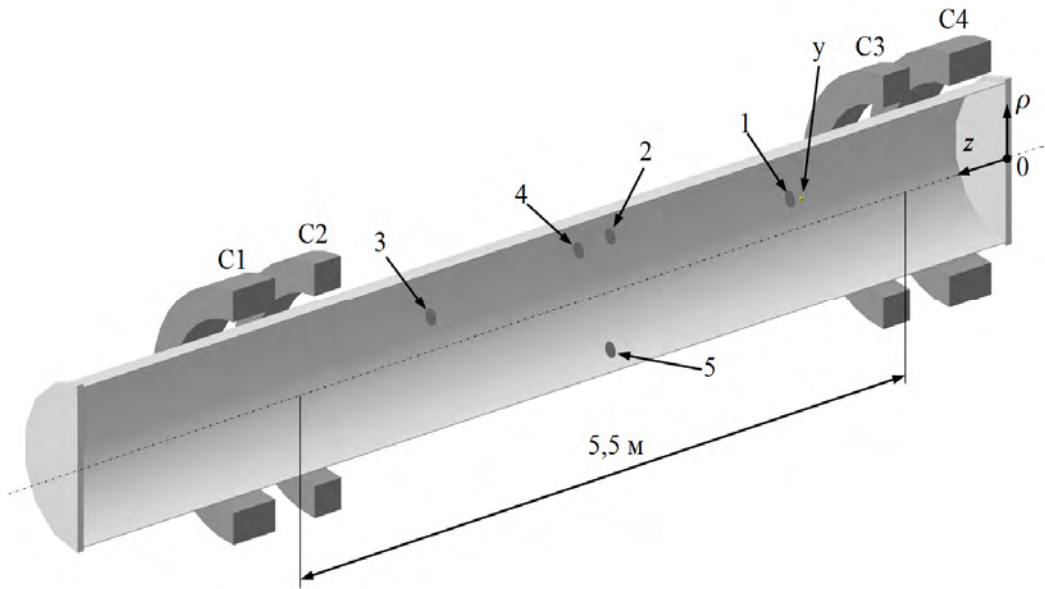


Рис. 6. Схема размещения оборудования ($У$ - ускоритель электронов, 1–5 – точки в которых располагались средства измерения пространственно-временного распределения электронов, C1, C2, C3, C4 – сегменты соленоида)

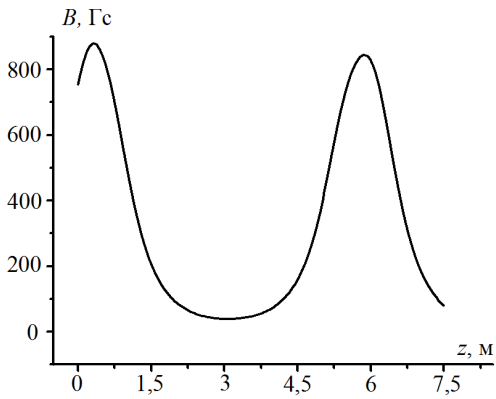


Рис. 7. Распределение индукции магнитного поля на оси камеры НПМ-01

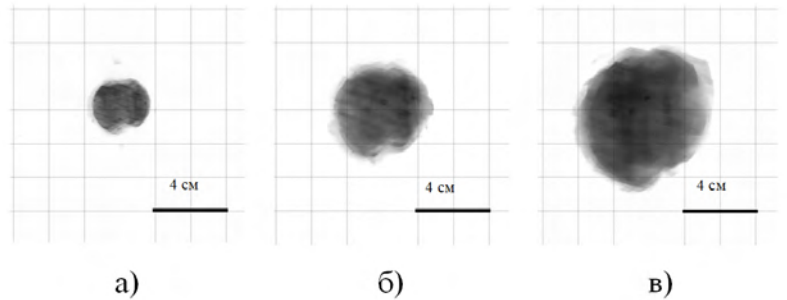


Рис. 8. Изображение пучка электронов (а – на расстоянии 1 см от ускорителя, б – на расстоянии 5 см от ускорителя, в – на расстоянии 10 см от ускорителя)

Результаты экспериментов

Измерение потока электронов в зависимости от времени выполнялось с помощью токового датчика диаметром 10 см, который располагался в различных точках. В результате проведенных экспериментов были получены данные о пространственно-временном распределении электронов в магнитной ловушке. В табл. 1 приведены координаты точек, в которых располагался токовый шунт и значения времени прихода быстрых электронов на токовый датчик после подачи импульса напряжения на ускоряющий промежуток.

Осциллограммы тока пучка электронов в точках 2, 4, 5, 6 показаны на рис. 9.

Таблица 1

№	r , см	φ , град	z , см	t , мкс
1	22	0	220	0,012
2	36	0	330	0,04
3	22	0	430	0,07
4	36	60	330	0,55
5	36	170	330	1,6
6	36	300	330	3,2

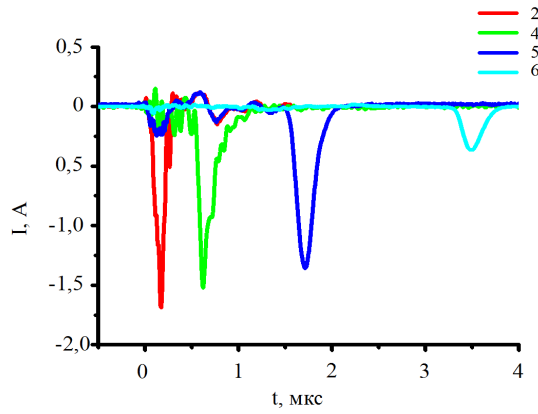


Рис. 9. Ток пучка электронов в точках 2, 4, 5, 6

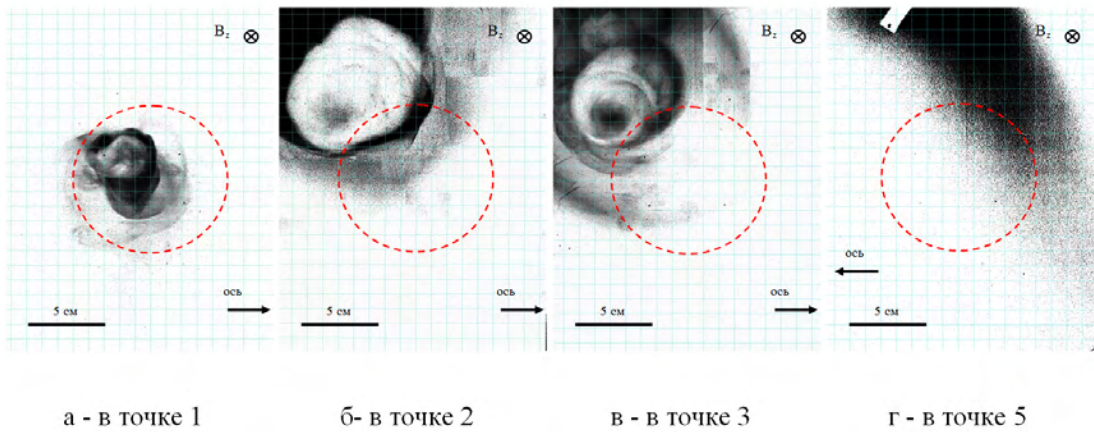


Рис. 10. Изображение пучка электронов (области почернения) в точках 1, 2, 3, 5 (пунктирной линией показано положение токового шунта)

Время, за которое быстрые электроны пролетают от одной магнитной пробки до другой составляет приблизительно 70 нс. Соответственно за 3,2 мкс они совершают примерно 50 пролетов с длиной пробега около 250 м.

Дополнительно регистрировалось изображение профиля пучка электронов при помощи рентгенографической пластины формата 18×24 см² с разрешением 10 пикселей на мм² в точках 1, 2, 3, 5 (см. табл. 1).

Примеры изображения профиля пучка электронов показаны на рис. 10. Из рис. 10, а, 10, б, 10, в видно, что из-за разброса скоростей электронов при их движении по направлению испускания источником они имеют различные величины Ларморовского радиуса. Различные периоды азимутального движения, а также периоды колебаний вдоль магнитной линии приводят к образованию криволинейной электронной трубки и последую-

щему постепенному ее размытию по азимуту рис. 10, г.

Заключение

На стенде НПМ-01 проведена серия экспериментов по исследования движения быстрых электронов с энергией 20 кэВ, длительностью 200 нс и током 10 А в протяженной магнитной ловушке пробкотронного типа с пробочным отношением $B_1 / B_0 = 8$. В результате проведенных работ было получено пространственно-временное распределение электронов в области магнитной ловушки и зарегистрированы изображения пучка.

Показано, что конфигурация магнитного поля для большей части испускаемых ускорителем быстрых электронов является магнитной ловушкой. Двигаясь по ларморовским орбитам вдоль магнитных линий и отражаясь от магнитных пробок быстрые электроны формируют электронную трубку,

которая постепенно расширяется по азимуту ловушки и образует электронную оболочку.

Результаты экспериментальных измерений хорошо согласуются с результатами численного моделирования данного явления, проведенного с использованием методики расчета переноса электронов в осесимметричном магнитном поле.

В дальнейшем работы в данном направлении на стенде НПИМ-01 будут продолжены. Планируются исследования комплексного влияния различных внешних физических факторов на удержание быстрых электронов в магнитной ловушке, таких как: газовая или плазменная фоновая среда, возмущения магнитного поля, электрическое поле, электромагнитные и плазменные волны.

Список литературы

1. Хесс В. Радиационный пояс и магнитосфера // Атомиздат, 1972.
2. Операция «Морская звезда» // Атомиздат, 1960.

3. Физика ядерного взрыва // М. ЦФТИ МО, 2002. Т. 1. Ч. 2.

4. Гранноль Б. Искусственные пучки частиц в космической плазме // «Мир», 1985.

5. Мишин Е. В., Трухан А. А., Хазанов Г. В. Плазменные эффекты сверхтепловых электронов в ионосфере // «Наука», 1990.

6. Amatucci W. E., Tejero E. M. ...Investigating nuclear-enhanced artificial radiation belt dynamics in the laboratory // DRIAC Dispatch, Naval Research Laboratory, 2014.

7. Karavaev A. V. Waves in plasmas generated by a rotating magnetic field and implications to radiation belts // Phd. dissertation, University of Maryland, 2010.

8. Широков А. Е., Залялов А. Н. и др. Удержание высокоэнергичных электронов в магнито-плазменной ловушке // XI Забабахинские научные чтения. Сборник докладов. Снежинск, 2012.

9. Основные достижения РФЯЦ-ВНИИЭФ 2009 // Саров, 2010.