

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА ВЧ ИНЖЕКТОРА УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ БЕТА-8

RESEACH OF DYNAMIC CHARACTERISTICS OF ELECTRON RF INJECTOR FOR RESONANCE ACCELERATOR BETA-8

А. Н. Шеин, А. Н. Беляев, И. В. Жуков, В. В. Кузнецов, Н. Н. Курапов, И. А. Машин, А. М. Опекунов, Л. Е. Поляков, Г. П. Поспелов, С. А. Путевской, М. Л. Сметанин, А. В. Тельнов, И. В. Шориков, И. А. Юрьев

A. N. Shein, A. N. Belyaev, I. V. Zhukov, V. V. Kuznetsov, N. N. Kurapov, I. A. Mashin, A. M. Opekunov, L. E. Polyakov, G. P. Pospelov, S. A. Putevskoj, M. L. Smetanin, A. V. Telnov, I. V. Shorikov, I. A. Yuriev

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

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

Представлены результаты расчетных и экспериментальных исследований динамических параметров электронного пучка ВЧ инжектора резонансного ускорителя БЕТА-8.

Цель экспериментальных исследований заключалась в определении динамических параметров ускоренного пучка электронов в зависимости от фазы их эмиссии с катода инжектора, что позволило уточнить режимы работы ВЧ инжектора электронов.

В результате проведенных испытаний экспериментально подтверждены результаты численного моделирования процессов ускорения и транспортировки пучка электронов с энергией 100 кэВ.

The results of calculation and experimental research of electron beam dynamic parameters of RF injector for resonance accelerator BETA-8 are presented in this paper.

The goal of experimental research consisted in measuring dynamic parameters of the accelerated electron beam depending on the phase of their emission from the injector cathode for obtain the RF electron injector operation modes.

Results of numeric simulation of acceleration and transportation processes of the 100 keV electron beam were experimentally proved.

Введение

Резонансный ускоритель электронов БЕТА-8 позволяет получать пучки электронов с перестраиваемой дискретной энергией. Конструкция и принцип действия такого ускорителя подробно описаны в ранее опубликованных работах [1–3].

Из-за высокого среднего тока электронного пучка под действием пространственного заряда в процессе его дрейфа происходит увеличение поперечных размеров электронных сгустков, что может привести к рассеиванию электронов и, как следствие, уменьшению среднего тока электронного пучка. По этой причине проведены расчеты динамических параметров электронного пучка на этапах его формирования и ускорения в ВЧ инжекторе, а также последующей транспортировки на заданное расстояние, чтобы подобрать приемлемые параметры системы магнитной фоку-

сировки канала инжекции и исключить потери тока электронов на начальных этапах.

Для определения динамических параметров ускоренного пучка электронов в зависимости от фазы их эмиссии с катода ВЧ инжектора электронов и определения оптимальных режимов работы ВЧ инжектора проведены испытания на экспериментальном стенде. В результате испытаний определены режимы работы ВЧ инжектора электронов и подтверждены результаты численного моделирования процессов ускорения и транспортировки пучка электронов с энергией 100 кэВ.

Экспериментальный стенд для определения режимов работы ВЧ инжектора

Исследования проводились на экспериментальном стенде для диагностики электронного пучка ВЧ инжектора электронов, конструктивная схема которого представлен на рис. 1.

Инжектором электронов ускорителя БЭТА-8 (рис. 1, поз. 2) является сеточно-управляемая термокатодевая ВЧ пушка на основе высокочастотного четвертьволнового коаксиального резонатора с рабочей резонансной частотой 100 МГц [4].

Фокусирующие соленоиды (рис. 1, поз. 3) выполняют функцию магнитных линз при дрейфе электронного пучка в канале транспортировки, а также фокусируют его на оконечном устройстве (рис. 1, поз. 8).

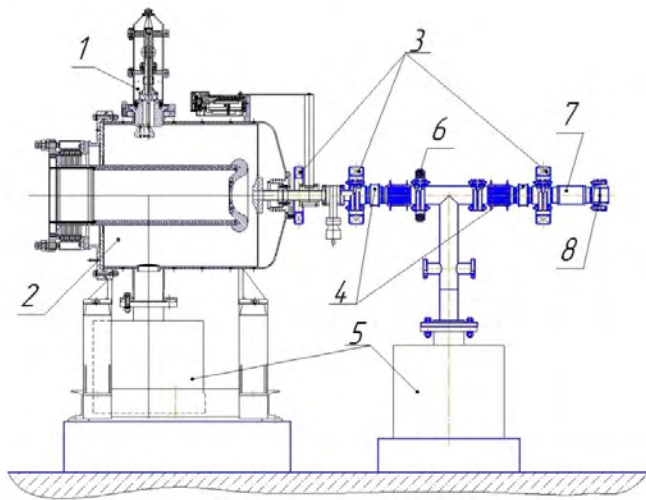


Рис. 1. Конструктивная схема экспериментального стенда для диагностики электронного пучка: 1 – узел ввода ВЧ мощности, 2 – ВЧ инжектор электронов, 3 – фокусирующие соленоиды, 4 – резистивные датчики импульсного тока, 5 – магниторазрядные насосы, 6 – магнитный корректор положения электронного пучка, 7 – монитор положения электронного пучка, 8 – вакуум-атмосферное окно

Магнитный корректор положения электронного пучка представляет собой электромагнит с замкнутым магнитопроводом квадратной формы [5] (рис. 1, поз. 6). Путем регулировки тока через катушки электронный пучок можно отклонять на заданный угол относительно первоначальной траектории.

С помощью пары резистивных датчиков импульсного тока (рис. 1, поз. 4) определяются длительность и пиковый ток электронных сгустков. Датчики пространственно разделены друг от друга, что позволяет по измерению времени задержки между импульсами тока с первого и второго датчиков определять энергию электронов в сгустке.

Для определения положения пучка в канале транспортировки используется монитор положения пучка [6] (рис. 1, поз. 7) на основе емкостных датчиков, который представляет собой цилиндрическую камеру и четыре емкостных датчика в виде

дисков, установленных диаметрально противоположно и электрически изолированных от стенок камеры.

Для оценки поперечных размеров электронных сгустков на конечном участке канала магнитной транспортировки экспериментального стенда установлена вакуум-атмосферная развязка на основе титановой фольги (рис. 1, поз. 8). Оценка профиля электронных сгустков проводилась путем регистрации тормозного излучения, генерируемого при взаимодействии электронного пучка с титановой фольгой.

Численное моделирование электронного пучка ВЧ инжектора

Расчет динамики электронных сгустков на этапах их формирования, ускорения и транспортировки проводился с использованием программы трехмерного моделирования динамики заряженных частиц ASTRA (A Space Charge Tracking Algorithm) [7].

Согласно проведенным расчетам [8] при фазе эмиссии электронных сгустков с катодно-сеточного узла $\sim 55^\circ$ ускоренный электронный пучок имеет наибольшее значение энергии в 100 кэВ по сравнению с другими фазами эмиссии. При фазах эмиссии выше этого режима электронные сгустки получают меньшее ускорение и удлиняются на всем протяжении дальнейшего дрейфа. При значении фазы эмиссии электронов равной 30° энергия электронов в сгустке уменьшается незначительно, в то время как среднеквадратичные (rms) продольные размеры электронных сгустков уменьшаются примерно в 1,4 раза на выходе из ВЧ инжектора (рис. 2, а). При фазах эмиссии электронов с катодно-сеточного узла, меньших 30° , начинает проявляться эффект ограничения заряда в сгустках из-за того, что головные частицы электронного сгустка эмитируются в отрицательной фазе и не могут вылететь за управляющую сетку.

Расчетные поперечные размеры электронных сгустков на выходе из ВЧ инжектора в зависимости от режима ускорения электронов представлены на рис. 2, б. Можно заметить, что добившись группировки электронных сгустков в продольном направлении при меньшей фазе эмиссии электронов, поперечные размеры, напротив, несколько возрастают, однако в допустимых пределах (не превышают апертуру выходного канала ВЧ инжектора).

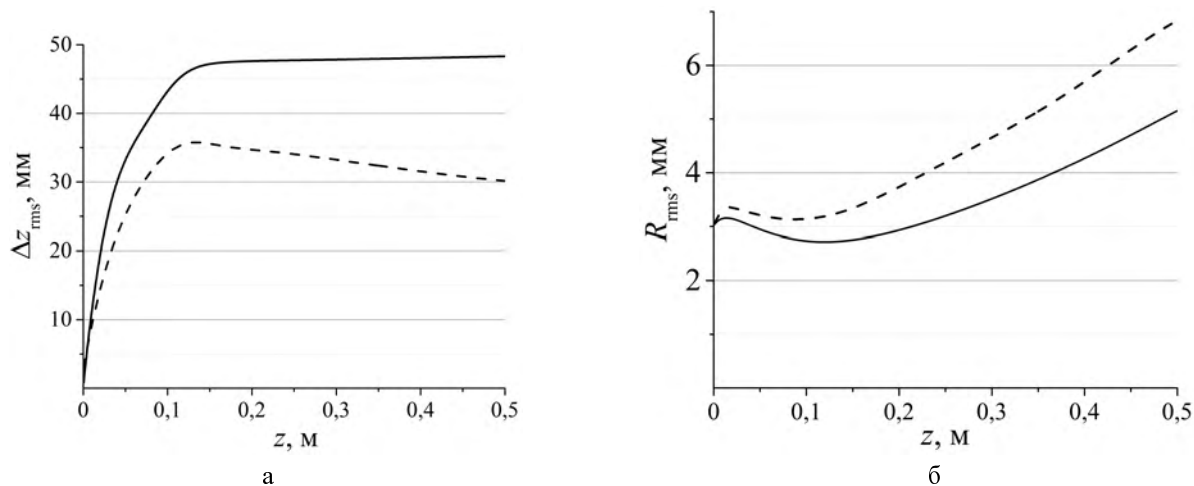


Рис. 2. Размеры электронных сгустков на выходе из ВЧ инжектора: а – эволюция продольных размеров; б – эволюция поперечных размеров. Пунктирная линия – фаза эмиссии 30°; сплошная – фаза эмиссии 55°

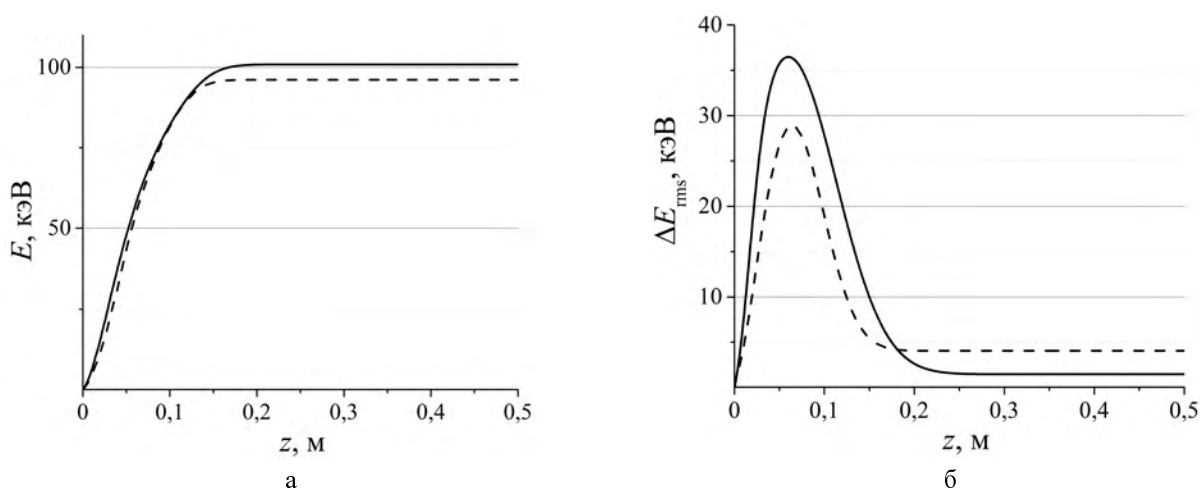


Рис. 3. Расчетные энергетические параметры электронов в сгустке на выходе из ВЧ инжектора; а – процесс набора энергии; б – эволюция энергетического разброса электронов. Пунктирная линия – фаза эмиссии 30°; сплошная – фаза эмиссии 55°

На рис. 3, а представлено изменение энергии электронов в процессе формирования сгустка в зависимости от режима ускорения, а также значение энергии электронов сразу на выходе из ВЧ инжектора. Действительно, при фазе эмиссии электронов 55° энергия электронов в сгустке выше по сравнению с фазой эмиссии 30°, что обозначено ранее. Видно, что на начальном этапе ускорения при меньшей фазе эмиссии имеет место меньший энергетический разброс, однако уже на выходе из ВЧ инжектора меньший разброс наблюдается при большей фазе эмиссии.

На рис. 3, б представлена эволюция энергетического разброса электронов в процессе формирования сгустка в зависимости от режима ускорения, полученная расчетным путем.

Расчетные параметры электронных сгустков на выходе из ВЧ инжектора в зависимости от фазы

эмиссии электронов с катодно-сеточного узла представлены в таблице.

Расчетные параметры электронных сгустков на выходе из ВЧ инжектора электронов

Параметр	Значения	
	55°	30°
Фаза эмиссии электронов	55°	30°
Средняя энергия электронов в сгустке, кэВ	100	96
Энергетический разброс (rms), кэВ	1.7	4.2
Продольные размеры электронных сгустков (rms), мм / нс	47,6 / 1,1	34,6 / 0,9
Радиальные размеры электронных сгустков (rms), мм	6	7.6
Эмиттанс (rms), п·мм·мрад	11	10

Экспериментальное определение параметров электронного пучка ВЧ инжектора

С помощью двух пространственно-разделенных резистивных датчиков импульсного тока (рис. 1, поз. 4) измерены энергия электронов в сгустке, импульсный ток электронных сгустков и произведена оценка длительности импульсов.

Форма импульсов с резистивных датчиков тока меняется в зависимости от фазы эмиссии электронов с катодно-сеточного узла ВЧ инжектора. Импульсы одинаковой амплитуды соответствуют режиму работы ВЧ инжектора с максимумом ускорения электронов (фаза эмиссии электронов $\approx 55^\circ$, рис. 4).

При фазах меньше 55° проявляется эффект продольной группировки электронных сгустков. В этом случае второй импульс становится больше по амплитуде и короче первого (рис. 5).

Согласно рис. 4 (фаза эмиссии $\approx 55^\circ$) длительность импульсов на полувысоте составляет ~ 1 нс, а согласно рис. 5 (фаза эмиссии $\approx 30^\circ$) длительность импульсов на полувысоте $\sim 0,8$ нс.

Заряд в электронном сгустке с учетом ослабления сигнала определялся следующим образом:

$$q = I_{\text{имп}} \cdot t_{\text{имп}} = \frac{V_{\text{имп}}}{R} t_{\text{имп}} \quad (1)$$

где $I_{\text{имп}}$ – импульсный ток электронов, $t_{\text{имп}}$ – длительность импульсов, $V_{\text{имп}}$ – падение напряжения на резистивном датчике тока, R – омическое сопротивление резистивных датчиков тока (3 Ом).

Согласно полученным осциллограммам импульсов с резистивных датчиков тока, изображенным на рис. 4–5, заряд в электронном сгустке равный 0,42 нКл и 0,4 нКл при фазах эмиссии электронов $\approx 55^\circ$ и $\approx 30^\circ$ соответственно.

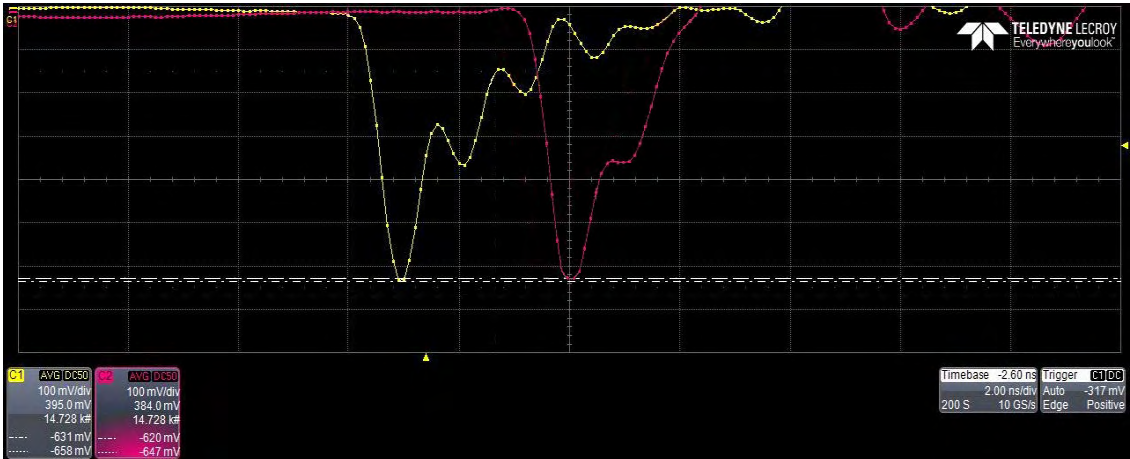


Рис. 4. Осциллограмма импульсов с резистивных датчиков тока для фазы эмиссии электронов $\approx 55^\circ$ (разрешение по горизонтальной оси 2 нс/клетку)

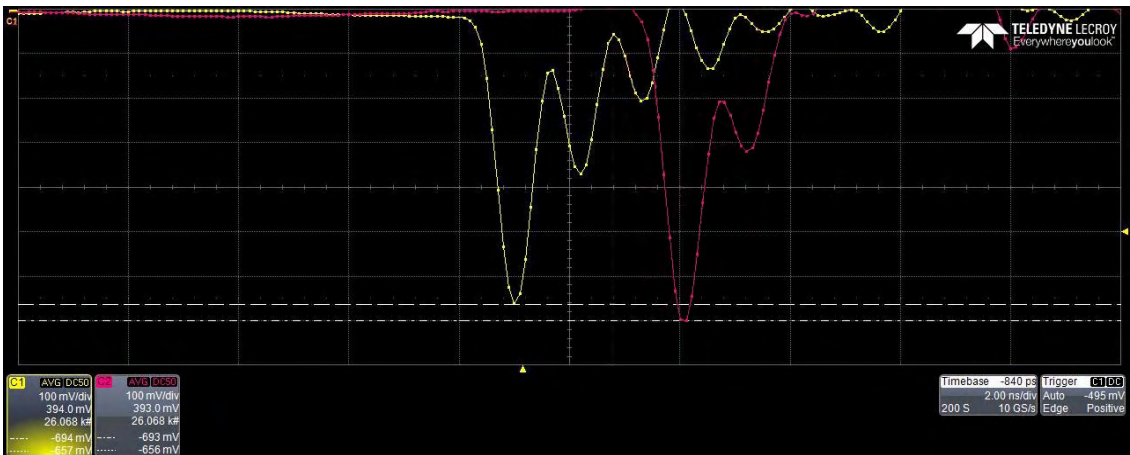


Рис. 5. Осциллограмма импульсов с резистивных датчиков тока для фазы эмиссии электронов $\approx 30^\circ$ (разрешение по горизонтальной оси 2 нс/клетку)

Энергию электронов в сгустке можно оценить, зная расстояние между резистивными датчиками тока и время задержки между двумя импульсами с датчиков тока на осциллограмме:

$$W = E_0 \left(\frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}} - 1 \right) = E_0 \left(\frac{1}{\sqrt{1-(\Delta l)^2/(\Delta t)^2 c^2}} - 1 \right). \quad (2)$$

где E – полная энергия электрона, E_0 – энергия покоя электрона, γ – Лоренц-фактор, $\Delta l = 515$ мм – расстояние между резистивными датчиками тока, Δt – время задержки между импульсами с резистивных датчиков, c – скорость распространения света в вакууме.

Согласно рис. 4–5 энергию электронов в сгустке равную 100 кэВ и 96 кэВ при фазах эмиссии электронов $\approx 55^\circ$ и $\approx 30^\circ$ соответственно.

Определение поперечных размеров электронных сгустков производилось путем оценки дозовых характеристик тормозного излучения, возникающего в результате взаимодействия электронов с титановой фольгой.

Для формирования изображения, характеризующего распределение квантов тормозного излучения в поперечном сечении, использовался сцинтилляционный экран на основе кристалла CsI, установленный вплотную к фольге со стороны атмосферы, и интеллектуальная цифровая видеокамера [9]. На рис. 6 представлена характерная картина свечения сцинтилляционного экрана от взаимодействия с квантами тормозного излучения, снятая на видеокамеру, дающая информацию о позиции электронного пучка в канале магнитной транспортировки.

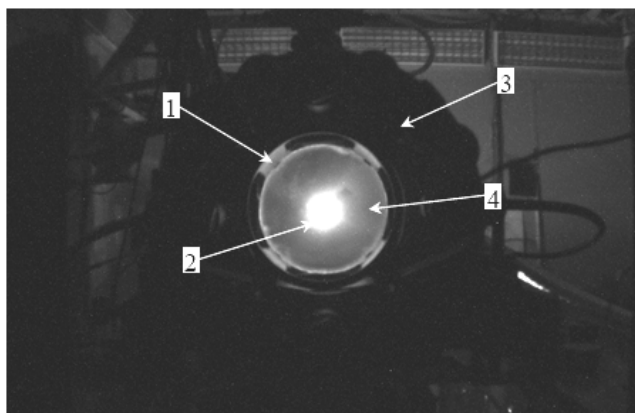


Рис. 6. Картина свечения сцинтилляционного экрана: 1 – оснастка для сцинтилляционного экрана; 2 – изображение свечения кристалла CsI; 3 – фланец с закрепленной титановой фольгой; 4 – сцинтилляционный экран

Для оценки размеров пучка электронов, падающих на титановую фольгу, необходимо подобрать параметры усиления и экспозиции видеокамеры таким образом, чтобы характер преобразования интенсивности потока тормозного излучения в интенсивность светового потока имел линейную зависимость. Обработка полученной в эксперименте картины свечения производится в программе ImageJ [10].

В ходе проведения эксперимента зарегистрировано семейство изображений, соответствующих различным значениям фазы эмиссии электронов ВЧ инжектора (в интервале от 10° до 80°) и после обработки каждого из этих изображений построена зависимость размеров пятна на сцинтилляционном экране от фазы эмиссии электронов рис. 7.

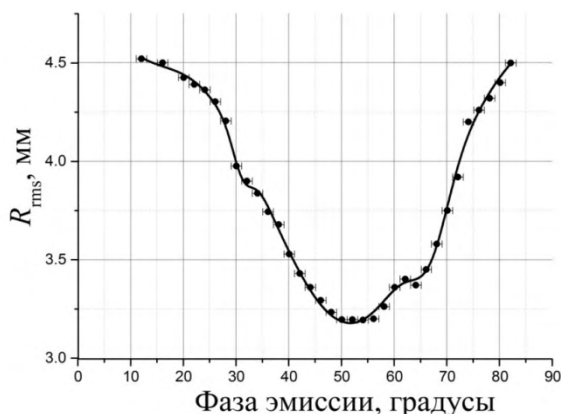


Рис. 7. Размеры пятна на сцинтилляционном экране в зависимости от фазы эмиссии электронов с катодно-сеточного узла ВЧ инжектора

Согласно результатам эксперимента, среднеквадратичные радиальные размеры пятна на сцинтилляционном экране составляют $\sim 3,2$ мм и ~ 4 мм для фазы эмиссии электронов с катодного узла ВЧ инжектора 55° и 30° , соответственно, что согласуется с расчетами (~ 3 мм и $\sim 3,8$ мм при тех же условиях).

Заключение

Проведены численные расчеты динамики электронных сгустков, генерируемых ВЧ инжектором электронов, с учетом объемного заряда, в результате которых определены основные параметры электронного пучка в зависимости от фазы эмиссии электронов с катодного узла. Определены режимы работы ВЧ инжектора электронов, удовлетворяющие проектным требованиям к электронному пучку. Электроны должны эмитироваться с поверхности катода в диапазоне фаз (30° – 55°)

относительно внешнего ускоряющего ВЧ поля в резонаторе ВЧ инжектора. Уменьшая фазу эмиссии электронов с 55° до 30° в границах обозначенного диапазона, можно осуществлять продольную группировку электронных сгустков уже на выходе из ВЧ инжектора, при этом энергия электронов в сгустке уменьшается незначительно – до 96 кэВ.

Проведены испытания ВЧ инжектора электронов на экспериментальном стенде с возможностью диагностики параметров электронного пучка. После проведения анализа результатов экспериментов, сделан вывод о хорошем совпадении расчетных и измеренных динамических параметров пучка:

- расчетная и измеренная фазовая протяженность электронных сгустков составляет порядка 1 нс (36°),

- заряд в электронном сгустке $\sim 0,4$ нКл, численное значение которого использовалось при компьютерном моделировании;

- измеренная энергия электронов в сгустке в зависимости от режима их ускорения в ВЧ инжекторе составляет 100 кэВ и 96 кэВ для фаз эмиссии 55° и 30° , соответственно, что согласуется с результатами расчетов.

Для определения поперечных размеров электронных сгустков использован способ, основанный на оценке дозовых характеристик тормозного излучения, возникающего в результате взаимодействия электронов с выпускным вакуум-атмосферным окном канала магнитной транспортировки электронного пучка. Установлено, что с помощью рассмотренного способа действительно можно производить контроль и оценку поперечных размеров электронных сгустков и осуществлять визуальный мониторинг положения, фокусировки и интенсивности электронного пучка.

Согласно результатам эксперимента, среднеквадратичные радиальные размеры пятна на сцинтилляционном экране составляют $\sim 3,2$ мм и ~ 4 мм для фазы эмиссии электронов с катодного узла ВЧ инжектора 55° и 30° , соответственно, что согласуется с расчетами (~ 3 мм и $\sim 3,8$ мм).

Список литературы

1. Железов С. А., Завьялов Н. В., Назаренко С. Т. и др. Проект электронного резонансного

ускорителя непрерывного действия // Труды международной конференции «VIII Харитоновские тематические научные чтения. Проблемы физики высоких плотностей энергии»: сборник докладов. 2006. С. 122–128.

2. Telnov A. V., Gordeev V. S., Zavialov N. V. et al. Progress in CW Mode Electron Resonance Accelerator BETA-8 Development // Proceeding of XXV Russian Particle Accelerator Conference «RUPAC-2016». 2017. P. 185–187.

3. Гладышев Е. Н., Гордеев В. С., Завьялов Н. В. и др. Состояние работ по проекту создания электронного резонансного ускорителя непрерывного действия БЕТА-8 // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. Сер. Научно-исследовательское издание. 2015. Вып. 20. Ч. 1. С. 184–193.

4. Volkov V. N., Arbuzov V. S., Chernov K. N., Kurkin G. Ya. et al. CW 100 keV Electron RF Injector for 40 mA Average Beam Current // Proceeding of XXIV Russian Particle Accelerator Conference «RUPAC-2014». 2014. P. 309–311.

5. Юрьев И. А., Поляков Л. Е. и др. Разработка магнитного корректора для системы диагностики положения пучка резонансного ускорителя электронов БЕТА-8 // Молодежь в науке: сборник докладов XV научно-технической конференции. 2017. С. 292–295.

6. Поляков Л. Е., Курапов Н. Н., Опекунов А. М. и др. Разработка системы диагностики положения пучка для резонансного ускорителя электронов БЕТА-8 // Сборник докладов XV научно-технической конференции «Молодежь в науке». 2017. С. 240–244.

7. Floettmann K. Astra User's Manual. http://www.desy.de/~mpyflo/Astra_documentation.

8. Опекунов А. М., Беляев А. Н., Кузнецов В. В. и др. Система инжекции резонансного ускорителя электронов БЕТА-8. Расчеты и эксперимент // Молодежь в науке: сборник докладов XV научно-технической конференции. 2017. С. 229–235.

9. Жуков И. В., Мочалов М. Р. и др. Интеллектуальный визуальный датчик событий // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2010. Вып. 15. С. 506–513.

10. ImageJ – Image Processing and Analysis in Java (National Institute of Health). <http://rsb.info.nih.gov/ij/>.