

## ОЦЕНКА И КОНТРОЛЬ ПОПЕРЕЧНЫХ РАЗМЕРОВ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

*А. М. Опекунов, И. В. Жуков, Н. Н. Курапов, И. А. Машин, Л. Е. Поляков, М. Л. Сметанин, А. В. Тельнов, А. Н. Шеин, И. В. Шориков*

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

Представлен способ оценки и контроля поперечных размеров электронного пучка с энергий до 100 кэВ, генерируемого высокочастотным (ВЧ) инжектором электронов [1]. Предложенный в настоящей работе способ основан на оценке дозовых характеристик тормозного излучения, возникающего в результате взаимодействия электронов с выпускным вакуум-атмосферным окном канала транспортировки электронного пучка. Для формирования изображения, характеризующего распределение квантов тормозного излучения в поперечном сечении, используется сцинтилляционный экран на основе кристалла CsI. Для регистрации интегральной картины свечения экрана используется интеллектуальный визуальный датчик событий (ИВД), на основе цифровой видеокамеры [2]. Регистрируемые кадры отображаются на экране монитора в реальном времени, что позволяет осуществлять визуальный мониторинг положения, фокусировки и интенсивности электронного пучка.

### Введение

ВЧ инжектор формирует сгустки электронов длительностью  $43^\circ$  (1,2 нс) от периода ВЧ поля на полувысоте с энергией до 100 кэВ и средним током электронного пучка до 40 мА (в непрерывном режиме) с регулируемой частотой посылки электронных сгустков 0,01 – 100 МГц [1]. На рис. 1 представлены внешний вид и схематическое изображение резонатора ВЧ инжектора электронов.

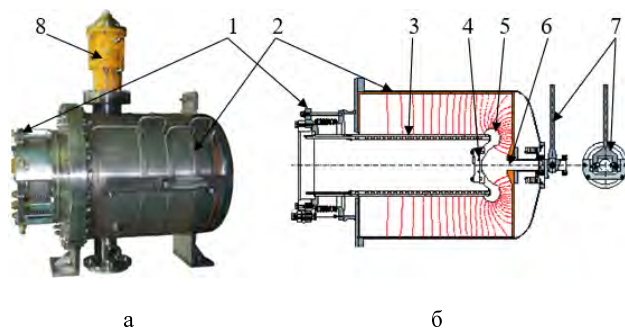


Рис. 1. Резонатор ВЧ инжектора с силовыми линиями ускоряющего поля: а – внешний вид, б – схематическое изображение: 1 – устройство фиксации электрода и предварительной настройки резонансной частоты, 2 – корпус резонатора, 3 – цилиндрический электрод, 4 – термокатодный узел, 5 – фокусирующий электрод, 6 – анодное отверстие, 7 – устройство перестройки частоты резонатора, 8 – узел ввода ВЧ мощности

Электроны эмитируются с термокатодного узла с заземленной сеткой, изготовленного на основе металлокерамической ВЧ триодной лампы ГС-34 с оксидным катодом, создающего короткие электронные сгустки. Электроны ускоряются ВЧ электрическим

полем, создаваемым в зазоре ВЧ четвертьволнового коаксиального резонатора. Регулирование среднего тока электронного пучка производится как за счет изменения заряда в сгустках, так и за счет изменения частоты посылки сгустков. Длительность электронных сгустков на выходе инжектора регулируется фазой эмиссии электронов.

Результаты расчетных и экспериментальных исследований динамики электронного пучка ВЧ инжектора можно найти, к примеру, в работе [3]. Однако на этапе определения режимов работы ВЧ инжектора электронов возникла необходимость в контроле и диагностике поперечных размеров формируемых электронных сгустков в зависимости от их фазы эмиссии с катодно-сеточного узла. Для этих целей использован имеющийся в РФЯЦ-ВНИИЭФ экспериментальный стенд для диагностики электронного пучка ВЧ инжектора электронов [3].

### Суть и методика испытаний по оценке поперечных размеров электронного пучка ВЧ инжектора электронов

Исследования проводились на экспериментальном стенде для диагностики электронного пучка ВЧ инжектора электронов, эскиз которого представлен на рис. 2.

Фокусирующие соленоиды 3, рис. 2, выполняют функцию магнитных линз при дрейфе электронного пучка в канале транспортировки, а также фокусируют его на оконечном устройстве 8. Индукция магнитного поля на оси соленоидов регулируется в необходимых пределах.

Магнитный корректор положения электронного пучка 6 [4] состоит из четырех катушек, надетых на железный сердечник квадратной формы. Путем ре-

гулировки тока через катушки электронный пучок можно отклонять на заданный угол относительно первоначальной траектории.

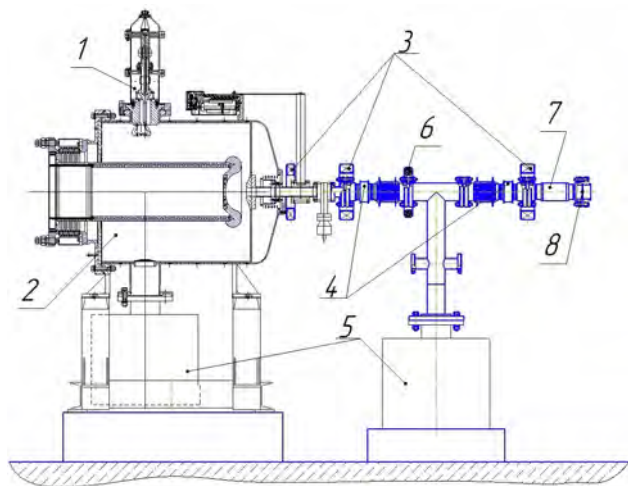


Рис. 2. Эскиз экспериментального стенда для диагностики электронного пучка ВЧ инжектора: 1 – узел ввода ВЧ мощности, 2 – ВЧ инжектор электронов, 3 – фокусирующие соленоиды, 4 – резистивные датчики импульсного тока, 5 – магниторазрядные насосы, 6 – магнитный корректор положения электронного пучка, 7 –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

Резистивные датчики импульсного тока 4, состоящие из 16 резисторов сопротивлением 50 Ом каждый, включенных параллельно вокруг вакуумного изолятора, связаны коаксиальным кабелем с широкополосным высокочастотным осциллографом. С их помощью определяются длительность и пиковый ток электронных сгустков. Резистивные датчики импульсного тока 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 оценки поперечных размеров электронных сгустков на конечном участке канала магнитной транспортировки экспериментального стенда установлена вакуум-атмосферная развязка 8 на основе титановой фольги. Титановая фольга толщиной 50 мкм, согласно расчетам, полностью поглощает электроны с энергией 100 кэВ (пробег электронов с энергией 100 кэВ в титане ~33 мкм). Поэтому определить поперечные размеры электронных сгустков можно путем оценки дозовых характеристик тормозного излучения, возникающего в результате взаимодействия электронов с титановой фольгой. Расчет распределения квантов тормозного излучения, вылетающих с фольги, проведен по методике C-007 методом Монте-Карло [5], по результатам которого сделан вывод о возможности оценки поперечных размеров электронного сгустка, падающего на фольгу со стороны вакуума, по распределению квантов тормозного излучения.

Для формирования изображения, характеризующего распределение квантов тормозного излучения в поперечном сечении, используется сцинтилляционный экран на основе кристалла CsI. На рис. 3 представлен внешний вид оснастки с закрепленным на ней сцинтилляционным экраном. С помощью данной оснастки осуществляется установка экрана на максимально близкое расстояние к выпускной титановой фольге со стороны атмосферы, чтобы свети к минимуму влияние рассеяния тормозного излучения в воздухе.

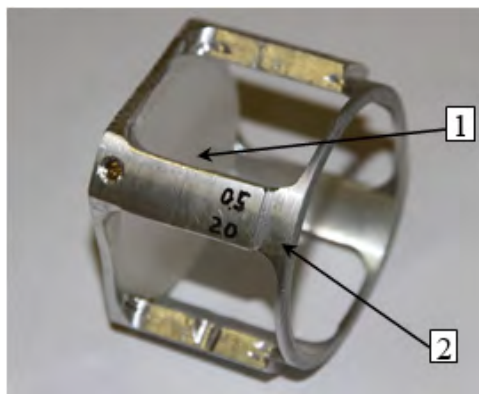


Рис. 3. Оснастка для сцинтилляционного экрана: 1 – сцинтилляционный экран, 2 – корпус оснастки

Для регистрации интегральной картины свечения экрана используется интеллектуальная цифровая видеокамера ИВД [2], подключаемая к стандартной компьютерной сети и взаимодействующая с ней по протоколу IP. На время запуска ВЧ инжектора комнатное освещение отключалось, что обеспечивало полное отсутствие посторонней засветки.

Цифровой канал (100 Мбит Ethernet), использованный в ИВД для обмена как видеоданными, так и управляющими воздействиями, в сочетании с развитым графическим интерфейсом пользователя на стороне удаленного ПК, позволяет производить дистанционную регулировку экспозиции, усиления, формата кадра и других параметров. Помимо реализованного режима непрерывного визуального мониторинга электронного пучка, программное обеспечение ИВД позволяет сохранять необходимую для последующей обработки или иллюстрирования информацию как в видео формате, так и в форме отдельных изображений, просматривать в режиме реального времени гистограмму значений яркости и т. д.

На рис. 4 представлена картина свечения сцинтилляционного экрана от взаимодействия с квантами тормозного излучения, снятая на цифровую видеокамеру ИВД. Возможность дистанционного управления экспозицией позволяет устанавливать режим высокой контрастности, который применен в данном случае, что приводит к яркостным искажениям. Однако за счет этой функции обеспечивается визуаль-

ный контроль положения электронного пучка в канале магнитной транспортировки.

Изображение на рис. 4 несет информацию о позиции электронного пучка в канале магнитной транспортировки.

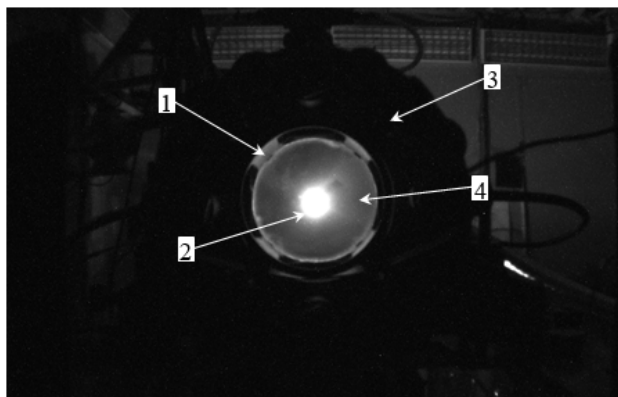


Рис. 4. Картина свечения сцинтилляционного экрана: 1 – оснастка для сцинтилляционного экрана, 2 – изображение свечения кристалла CsI, 3 – фланец с закрепленной титановой фольгой, 4 – сцинтилляционный экран

На рис. 5 представлено распределение яркости свечения пятна на сцинтилляционном экране при работе с ИВД в режиме насыщения для большей наглядности положения электронного пучка в поперечном к направлению его движения сечении. Такое распределение яркости соответствует представленной на рис. 4 картине свечения сцинтилляционного экрана.

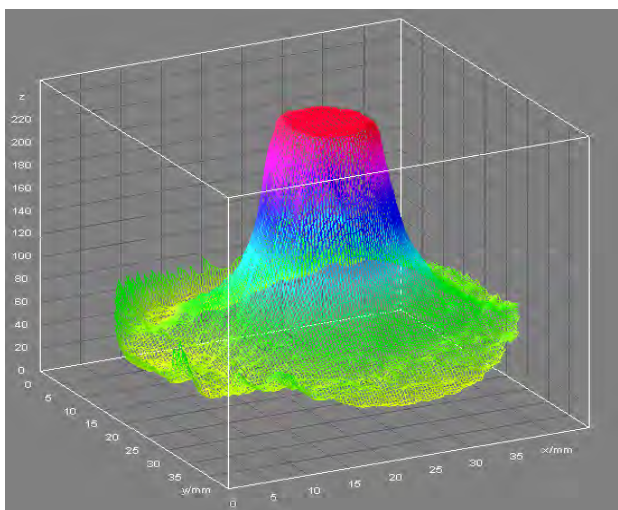


Рис. 5. Распределение яркости свечения пятна на сцинтилляционном экране, соответствующее картине рис. 4

Для оценки размеров пучка электронов, падающих на титановую фольгу, необходимо подобрать параметры усиления и экспозиции ИВД таким образом, чтобы характер преобразования интенсивности потока тормозного излучения в интенсивность светового потока имел линейную зависимость, что не имеет места на рис. 4.

Оценка размеров пятна производится посредством обработки картины свечения сцинтилляционного экрана, возникающей вследствие взаимодействия квантов тормозного излучения с веществом сцинтиллятора, в зависимости от режима ускорения электронов в ВЧ инжекторе. На рис. 6 представлено характерное изображение. Обработка полученной в эксперименте картины свечения производится в программе ImageJ [6].

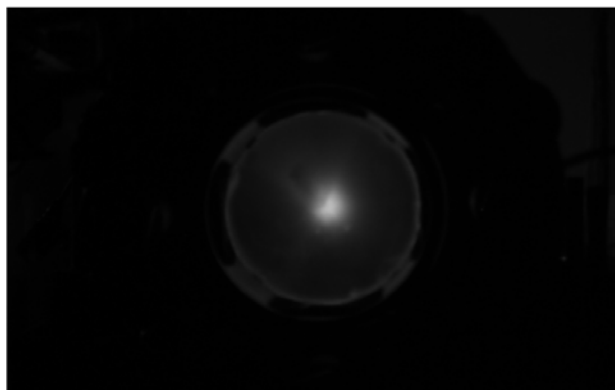


Рис. 6. Характерная картина свечения сцинтилляционного экрана

Для достоверного определения значения максимальной светимости (вершины пятна) производится высокочастотная фильтрация изображения, соответствующего рис. 6, чтобы исключить измерения на основе статистически недостоверной единственной яркой точки на вершине пятна. Максимальное амплитудное значение яркости в рассмотренном случае составляет 200 единиц за вычетом фона. Распределение яркости свечения пятна, соответствующего рис. 6, представлено на рис. 7. Можно отметить характерное нормальное распределение, причем в отличие от рис. 5 на рис. 7 отсутствует усеченная вершина.

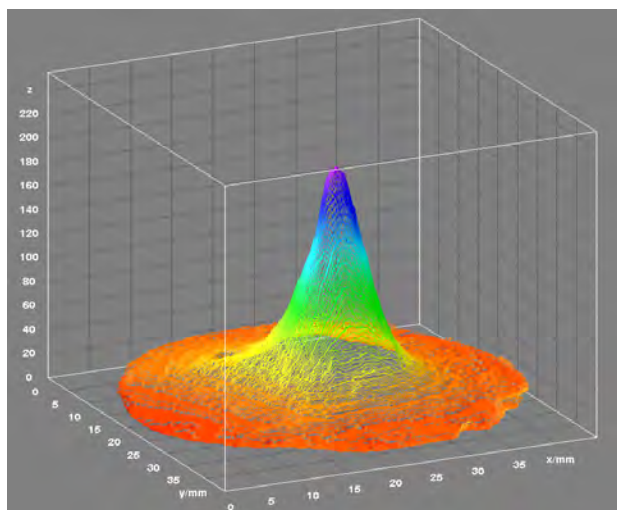


Рис. 7. Распределение яркости свечения пятна на сцинтилляционном экране, соответствующее картине на рис. 6

Функция плотности вероятности  $f(x)$  распределения случайной величины по закону Гаусса записывается следующим образом [7]:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (1)$$

где  $\sigma$  – среднеквадратичное отклонение;  $a$  – математическое ожидание.

Определим уровень яркости, соответствующий высоте на ширине  $(a-\sigma; a+\sigma)$ . Выбор ширины интервала  $(a-\sigma; a+\sigma)$  объясняется тем фактом, что размеры электронного пучка, определенные ранее в работе [3], представлены в среднеквадратичных величинах, верификация которых происходит как раз экспериментальным путем с помощью рассматриваемого в настоящей работе метода.

Так как функция плотности вероятности распределения случайной величины по закону Гаусса четная относительно математического ожидания, уровень яркости на ширине  $\sigma$  определим из выражения (1) следующим образом:

$$f(\sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(a-\sigma-a)^2}{2\sigma^2}\right] = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-1/2} = \\ = f(a) \cdot e^{-1/2} = 0,606 \cdot f(a)$$

т.е. искомый уровень составляет 0.606 от максимального, который определен ранее (200 единиц). Здесь  $f(a) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}$ .

Ограничив область, соответствующую уровню 0.606 от максимального (рис. 8), можно определить ее площадь, которая составляет  $\sim 39 \text{ мм}^2$ . Приняв допущение, что подсвеченная область на рис. 8 представляет собой круг радиусом  $R$ , вычислим радиус следующим образом:

$$S = \pi R^2 \Rightarrow R = \sqrt{\frac{S}{\pi}} = \sqrt{\frac{39}{\pi}} = 3,52 \text{ мм.}$$

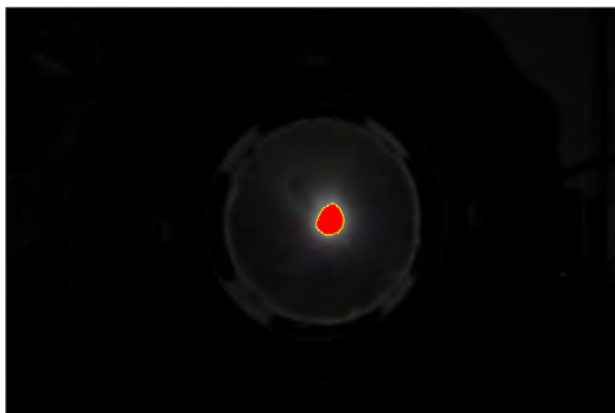


Рис. 8. Подсвеченная область на картине свечения сцинтилляционного экрана

В ходе проведения эксперимента зарегистрировано семейство изображений, аналогичных представленному изображению на рис. 6, но соответствующих различным значениям фаз эмиссии электронов с катодно-сеточного узла ВЧ инжектора, лежащих в интервале от  $10^\circ$  до  $80^\circ$ .

Обработка каждого из этих изображений позволяет получить набор экспериментальных точек для построения графика зависимости размеров пятна на сцинтилляционном экране от фазы эмиссии электронов. Выбор обозначенного диапазона фаз эмиссии электронов диктуется определенным ранее в работе [3] рабочим интервалом ( $30\text{--}55^\circ$ ).

На рис. 9 отображена динамика изменения размера пятна на сцинтилляционном экране в зависимости от фазы эмиссии электронов с катодно-сеточного узла ВЧ инжектора, полученная при проведении экспериментов.

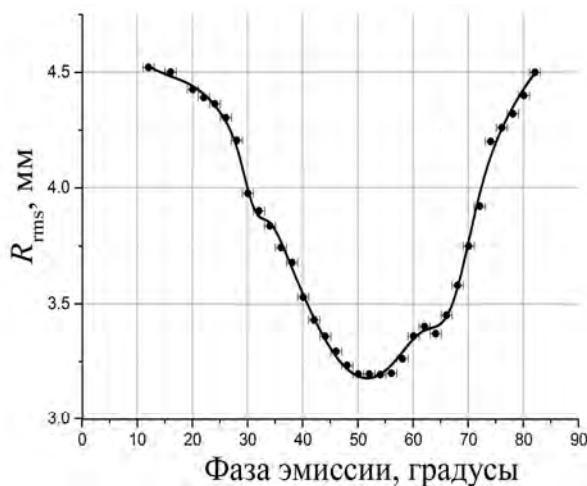


Рис. 9. Размеры пятна на сцинтилляционном экране в зависимости от фазы эмиссии электронов с катодно-сеточного узла ВЧ инжектора

Кривая на рис. 9 имеет минимум в окрестности фаз эмиссии  $50\text{--}55$  градусов, что говорит о минимальных радиальных размерах пятна на сцинтилляционном экране при таком режиме ускорения электронов в ВЧ инжекторе, в отличие от других фаз эмиссии из интервала, обозначенного на рис. 9. При отдалении от рассмотренной области в сторону увеличения или уменьшения фазы эмиссии происходит увеличение радиальных размеров пятна. Это вполне справедливо, так как при меньших фазах эмиссии, согласно расчетам, выполненным в работе [3], происходит продольная группировка электронных сгустков. Это приводит к увеличению их поперечных размеров, а при больших фазах эмиссии электроны получают меньшее приращение энергии в ВЧ инжекторе, как следствие имеют меньшую кинетическую энергию, что приводит к «раздуванию» электронного сгустка полем пространственного заряда в радиальном направлении.

Характерные размеры пятна на сцинтилляционном экране должны быть не меньше размеров электронного пучка, падающего на титановую фольгу со стороны вакуума. Сопоставим результаты компьютерного моделирования по проводке электронного пучка в канале магнитной транспортировки экспериментального стенда (рис. 2), выполненных в работе [3], с результатами настоящих экспериментов. Расчеты динамики электронных сгустков проведены с помощью программы трехмерного электродинамического моделирования ASTRA (A Space Charge Tracking Algorithm) [8].

На рис. 10 представлена расчетная эволюция радиальных размеров электронного пучка на участке дрейфа 1,5 м в зависимости от режима ускорения электронов в ВЧ инжекторе.

Отметим тот факт, что размеры пятна на сцинтилляционном экране, как минимум, не превышают соответствующих размеров электронного пучка на подлете к титановой фольге. Согласно рис. 10 расчетные радиальные размеры электронного пучка на подлете к титановой фольге составляют ~3 мм и ~3,8 мм для фазы эмиссии электронов с катодно-сеточного узла ВЧ инжектора 55° и 30°, соответственно. Радиальные размеры пятна на сцинтилляционном экране (рис. 9) составляют ~3,2 мм и ~4 мм для фазы эмиссии электронов 55° и 30°, соответственно.

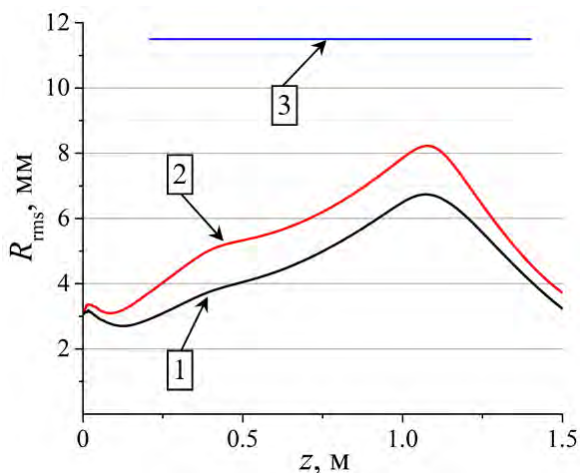


Рис. 10. Расчетная эволюция поперечных размеров электронного пучка на участке дрейфа 1,5 м в присутствии фокусирующих магнитных полей: 1 – фаза эмиссии 55°, 2 – фаза эмиссии 30°, 3 – граница канала магнитной транспортировки электронного пучка

Сравнивая динамику изменения размеров пятна на сцинтилляционном экране в зависимости от фазы эмиссии электронов с катодно-сеточного узла ВЧ инжектора (рис. 9) с размерами электронного пучка на подлете к фольге при двух значениях фаз эмиссии, соответствующим границам рабочего интервала (рис. 10), можно заключить полное соответствие. Действительно, при фазе эмиссии ~55°, размеры электронного пучка должны быть минимальны по сравнению с другими фазами эмиссии, что и пред-

сказывалось на этапе компьютерного моделирования проводки электронного пучка в канале магнитной транспортировки экспериментального стенда [3].

Для удобства сравнения расчетных и экспериментальных данных сведем эти результаты в таблицу, в которой сравниваются параметры электронных сгустков, соответствующие двум граничным значениям фазы эмиссии электронов из расчетного рабочего интервала (30°–55°), т. е. так называемый «режим продольной группировки электронных сгустков» (30°) и «режим максимума энергии электронов в сгустке» (55°). Помимо определенных в настоящей работе параметров электронных сгустков, в таблице представлены некоторые другие характеристики, полученные ранее [3].

Параметры электронных сгустков

| Параметр  | Значение |      |             |      |
|---|----------|------|-------------|------|
|   | Расчет   |      | Эксперимент |      |
| Фаза эмиссии электронов, градусы                  | 30       | 55   | 30          | 55   |
| Поперечные размеры электронных сгустков (rms), мм | 7,5      | 6    | 8           | 6,5  |
| Максимальный средний ток электронного пучка, мА   | 40       | 40   | 40          | 40   |
| Энергия электронов в сгустке, кэВ                 | 100,9    | 96,1 | 100         | 96   |
| Длительность электронных сгустков, нс             | 0,9      | 1,1  | 0,9         | 1    |
| Заряд в электронном сгустке, нКл                  | 0,4      | 0,42 | 0,4         | 0,42 |

### Заключение

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. 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, радиальные среднеквадратичные размеры пятна на сцинтилляционном экране составляют ~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 ~3,8 мм при тех же условиях).

Преимущество данного способа контроля положения электронного пучка и оценки его поперечных размеров состоит в возможности производить этот мониторинг в режиме реального времени и оперативно реагировать на изменения в его поведении.

Итогом проведенных исследований является экспериментальное подтверждение результатов численного моделирования транспортировки низкоэнергетичного электронного пучка, полученных ранее [3], а также возможности диагностики положения электронного пучка низких энергий заявленным способом.

### Литература

1. Volkov V. N., Arbuzov V. S., Chernov K. N. 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.

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

3. Завьялов Н. В., Кузнецов В. В., Курапов Н. Н. и др. Экспериментальная отработка проводки электронного пучка ВЧ инжектора для резонансного ускорителя БЭТА-8 // Труды международной конфе-

ренции «XVIII Харитоновские тематические научные чтения. Проблемы физики высоких плотностей энергии»: сборник докладов. 2017. С. 121–127.

4. Юрьев И. А., Поляков Л. Е., Курапов Н. Н. и др. Разработка магнитного корректора для системы диагностики положения пучка резонансного ускорителя электронов БЭТА-8 // Молодежь в науке: сборник докладов XV научно-технической конференции. 2017.

5. Житник А. К., Донской Е. Н., Огнев С. П. и др. Методика С-007 решения методом Монте-Карло связанных линейных уравнений переноса нейтронов, гамма-квантов, электронов и позитронов // ВАНТ Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2011. Вып. 1, С. 17–24.

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

7. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика. Изд. 4-е, доп. Учеб. пособие для вузов. М.: Высшая школа, 1972. С. 368.

8. Floettmann K. Astra User's Manual. [http://www.desy.de/~mpyflo/Astra\\_documentation](http://www.desy.de/~mpyflo/Astra_documentation).