

# МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ИНЖЕКЦИИ РЕЗОНАНСНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ БЕТА-8

*А. Н. Беляев, А. М. Опекунов, А. В. Тельнов, И. В. Шориков*

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

## Аннотация

В РФЯЦ-ВНИИЭФ создается мощный резонансный ускоритель электронов БЕТА-8 [1] на основе коаксиального полуволнового резонатора. Значения выходной средней энергии электронов – 1,5; 4,5; 7,5 МэВ; максимальная средняя мощность пучка – 300 кВт.

Работа включает расчетные исследования параметров пучка до и после одного прохода в коаксиальном резонаторе ускорителя БЕТА-8. Определены оптимальные фазы эмиссии электронных сгустков в инжекторе и приемлемые фазы инжекции в резонатор ускорителя, при которых наблюдается минимальный энергетический разброс в электронных сгустках после ускорения, а также минимальные потери тока на всех участках ускорения.

## Введение

Электронный ускоритель БЕТА-8 разработан на основе коаксиального полуволнового резонатора (тип колебаний  $T_{11}$ , частота 100 МГц). Принцип ускорения основан на многократном прохождении электронного пучка через ускоряющие зазоры резонатора в медианной плоскости, где полностью отсутствует магнитная компонента ВЧ поля [2, 3]. Такой резонатор образован из коаксиального волновода длиной  $\lambda/2$ , закороченного с обоих концов, где  $\lambda$  – длина волны. Фактически пучком совершается  $N$  проходов через один резонатор с ускоряющим напряжением  $U$ , приводящих к увеличению энергии электронов пропорционально  $U \cdot N$ . Радиальная компонента электрического поля  $E_r$  имеет свой максимум в серединной поперечной плоскости резонатора, а азимутальная компонента магнитного поля  $B_\alpha$  в этой же плоскости равна нулю (рис. 1,а). Пучок вне полости резонатора возвращается в область ускорения при помощи поворотных магнитов, за счет чего обеспечивается его ускорение до заданной энергии (рис. 1,б). Ускоритель рассчитан на получение трех значений средней энергии электронов: 1,5; 4,5 и 7,5 МэВ, с максимальной средней мощностью пучка до 300 кВт.

Основной частью инжектора электронов является сеточно-управляемая термокатодная ВЧ пушка на основе высокочастотного четвертьволнового коаксиального резонатора, с резонансной частотой 100 МГц. В табл. 1 приведены основные характеристики ВЧ инжектора.

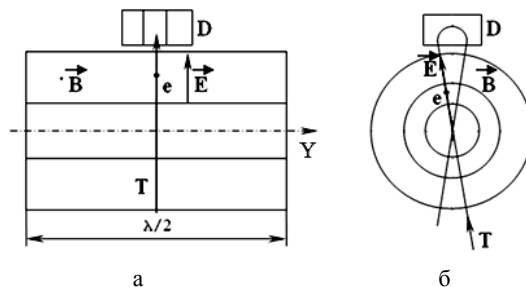


Рис. 1. Принцип ускорения: а – аксиальное сечение; б – серединное поперечное сечение ускоряющего коаксиального резонатора; Т – траектория пучка;  $\vec{B}$  и  $\vec{E}$  – компоненты поля; D – отклоняющий магнит

Таблица 1

Основные характеристики ВЧ инжектора

Параметр	Значение
Максимальный средний ток ВЧ инжектора, мА	40
Максимальная энергия электронов, кэВ	100
Длительность сгустков, нс	0,5–1
Максимальная частота повторения, МГц	100
Средняя ВЧ мощность генератора, кВт	16
Допустимый рабочий вакуум, Па	$10^{-4}$

Принцип работы ВЧ инжектора [4] состоит в том, что сеточно-катодный узел, расположенный непосредственно в ВЧ резонаторе, выпускает электронные сгустки определенной длительности и в определенной фазе ВЧ ускоряющего поля в резонаторе. Определенную длительность сгустков и привязку их к фазе ВЧ поля в резонаторе обеспечивает модулятор сеточно-катодного узла, создающий импульсы отпирающего напряжения.

На рис. 2 представлено схематическое изображение резонатора ВЧ инжектора.

Из-за высокой проектной средней мощности электронного пучка необходимо минимизировать потери электронов на стенках резонатора и в каналах транспортировки пучка. Расчеты динамических параметров электронного пучка в первую очередь должны выявить проблемные места предлагаемой схемы транспортировки и помочь оптимизировать потери тока в процессе ускорения.

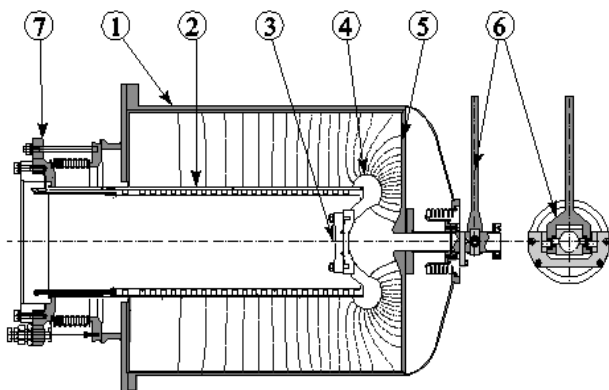


Рис. 2. Схематическое изображение резонатора ВЧ инжектора с силовыми линиями ускоряющего ВЧ поля: 1 – корпус резонатора; 2 – цилиндрический электрод; 3 – термокатодный узел; 4 – фокусирующий электрод; 5 – торцевая стенка резонатора с анодным отверстием; 6 – устройство оперативной перестройки частоты резонатора; 7 – устройство фиксации электрода и предварительной настройки частоты резонатора

## 1. Численное моделирование электронного пучка ВЧ инжектора

### 1.1. Модель резонатора ВЧ инжектора

Чтобы определить динамические параметры электронных сгустков, генерируемых ВЧ инжектором, необходимо знать распределение электрического и магнитного полей в области резонатора инжектора, в которой происходит формирование, ускорение и фокусировка эмитируемых с катода частиц. Для решения этой задачи была создана трехмерная компьютерная модель, с учетом реальной геометрии основных элементов электронно-оптической системы. Геометрия такой модели обладает аксиальной симметрией (рис. 3).

Перед запуском решения задачи, связанной с нахождением собственных значений резонансных частот и соответствующих им распределений электромагнитных полей, производится сеточное разбиение геометрии модели; в зависимости от предполагаемой точности расчета устанавливается шаг сетки.

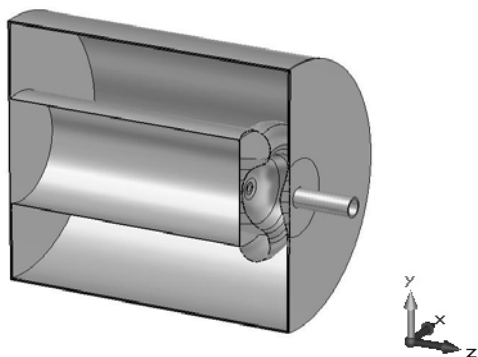


Рис. 3. Трехмерная модель резонатора ВЧ инжектора

Амплитуды напряженности электрического и магнитного полей зависят от запасенной в объеме резонаторной области энергии. При амплитуде

напряжения на ускоряющем зазоре 100 кВ требуется наличие электромагнитной энергии, запасенной в объеме резонатора за один период изменения поля, равной 0,1368 Дж. На рис. 4 представлено расчетное распределение продольной компоненты напряженности электрического поля в резонаторе инжектора, взятое на его продольной оси в ускоряющем зазоре.

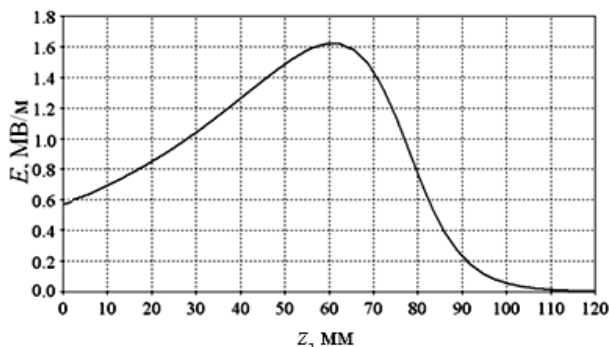


Рис. 4. Расчетное распределение продольной компоненты напряженности электрического поля в ускоряющем зазоре ВЧ резонатора

### 1.2. Моделирование эмиссии частиц с катода

В моделировании была принята Гауссова эмиссионная модель, представляющая собой такое распределение, при котором заряженные частицы эмитируются с катода с начальной скоростью, определяемой кинетическими параметрами. Модель является Гауссовой в том смысле, что испускаемый заряд каждого импульса представляет собой кривую распределения Гаусса как функцию от времени. Причем имеется возможность устанавливать различные параметры импульса (или группы импульсов), такие как полный заряд каждого импульса, ширину импульса или временного интервала между двумя последовательными импульсами.

В принятой Гауссовой модели распределения форма импульса тока источника заряженных частиц зависит от параметра « $\sigma$ » и от времени эмиссии. Зависимость формы импульса тока от параметра « $\sigma$ » представлена на рис. 5. Начиная с некоторого значения « $\sigma$ », форма этого импульса принимает вид «ступеньки».

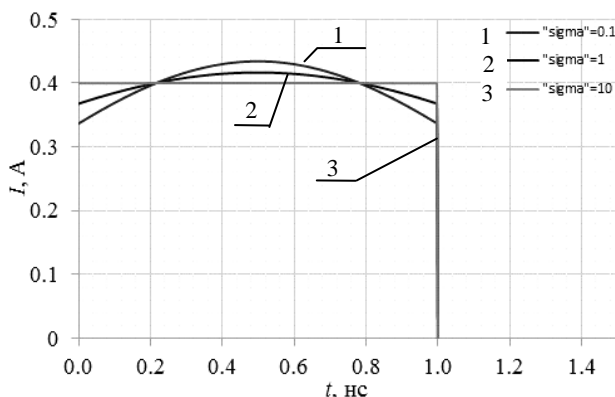


Рис. 5. Смоделированный эмиссионный ток с катода

### 1.3. Расчеты динамики пучка электронов ВЧ инжектора

В процессе моделирования принимается то, что с поверхности катода постоянно и равномерно эмитируются 275000 макрочастиц, равномерно вылетающих в интервале времени 1 нс с поверхности катода.

Основные задачи, которые необходимо решить при моделировании сгустков катодного узла – это оптимально подобрать фазу и амплитуду ускоряющего поля в резонаторе, при которых обеспечивается заданный заряд в сгустке и минимальный энергетический разброс.

Численные расчеты динамики пучка в поле ускоряющего зазора ВЧ инжектора в разных режимах ускорения проводились с учетом действия импульсных отпирающих напряжений, подаваемых на катод. Импульсы приходят в момент роста ВЧ напряжения на зазоре в интервале фаз (0–90) градусов при амплитуде напряжения на зазоре 100 кВ.

Участок инжекции электронов в коаксиальный резонатор ускорителя БЕТА-8 показан на рис. 6. В этом варианте ВЧ инжектор расположен так, что катод находится на расстоянии 840 мм от внутренней стенки резонатора ускорителя, соленоид (поз. 5) расположен от катода на расстоянии 500 мм и квадрупольная линза (поз. 6) – 700 мм.

Вследствие действия пространственного заряда поперечный размер сгустков растет после выхода из ускоряющего зазора резонатора ВЧ инжектора. В случае отсутствия фокусировки, на апертуре входного отверстия ускорителя, находящемся на расстоянии 840 мм от плоскости катода, будет задерживаться до 30 % частиц. Для того чтобы все частицы проходили в ускоритель, должна быть обеспечена фокусировка пучка соленоидом.

На рис. 7 показано изменение поперечных размеров пучка в процессе его транспортировки в канале инжекции, когда соленоид помещен на расстоянии 500 мм от плоскости катода. Пучок имеет кроссовер на расстоянии 800 – 850 мм от катода, т.е., можно сказать, внутри ускорителя. Дальнейшая фокусировка пучка производится ускоряющим ВЧ полем резонатора ускорителя.

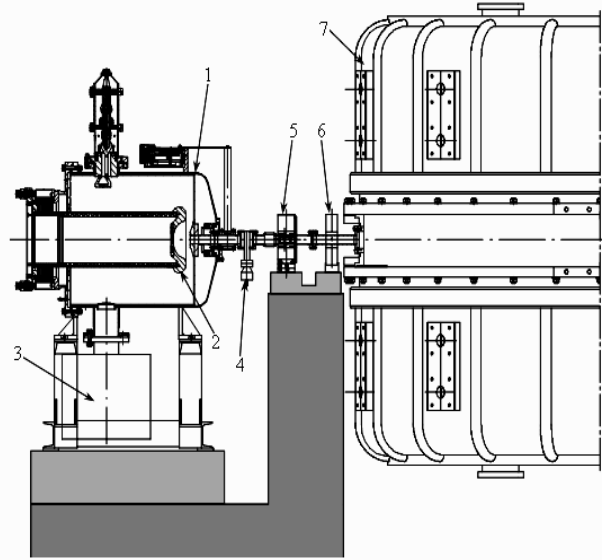


Рис. 6. Схема участка инжекции ускорителя БЕТА-8: 1 – резонатор инжектора; 2 – катодный узел с фокусирующим электродом; 3 – высоковакуумный магниторазрядный насос; 4 – высоковакуумный шибер; 5 – фокусирующий соленоид; 6 – магнитная квадрупольная линза; 7 – коаксиальный резонатор ускорителя

Из-за различия поперечных составляющих электрического ВЧ поля резонатора ускорителя вдоль траектории пучка [1], влияние их на пучок в вертикальной (вдоль оси резонатора) и в горизонтальной (медиа́нной) плоскостях различаются. Для лучшей фокусировки пучка внутри ускорителя применяется квадрупольная линза, расположенная непосредственно перед входным отверстием ускорителя. Квадрупольная линза будет фокусировать пучок по вертикали и дефокусировать по горизонтали. Дефокусировка не должна компенсировать полностью горизонтальную фокусировку в электрическом поле ускорителя.

На рис. 8 приведены расчетные параметры сгустков на выходе из ВЧ инжектора, а на рис. 9 – расчетные параметры сгустков на входе в резонатор ускорителя.

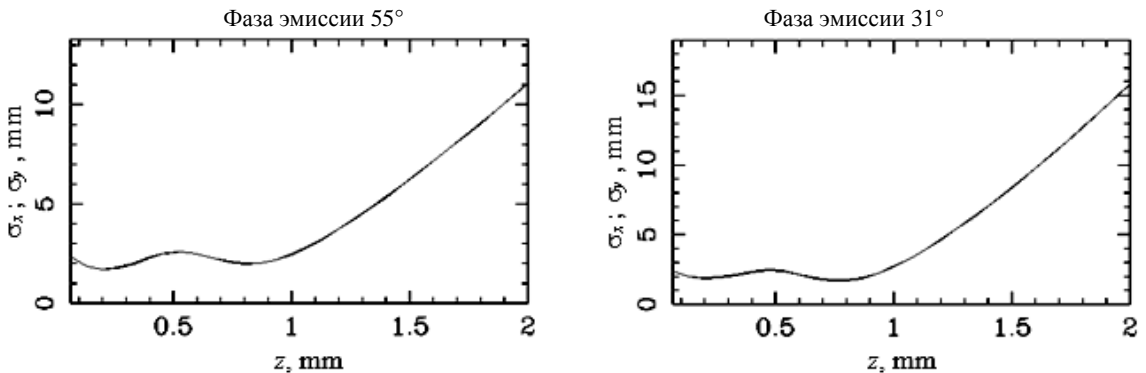


Рис. 7. Расчетное изменение среднеквадратичного поперечного размера пучка на участке дрейфа 2 м от катода

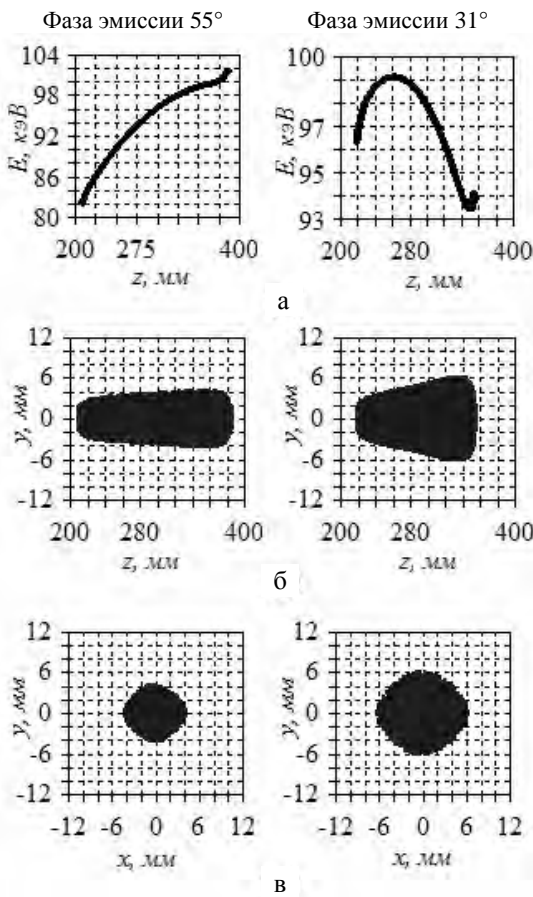


Рис. 8. Расчетные параметры пучков на выходе из ВЧ инжектора: а – распределение по энергии в пучке; б – продольный профиль пучка; в – поперечный профиль пучка

Основываясь на проведенном анализе результатов расчетов, можно сделать выводы:

- максимальное значение энергии электронов в пучке 100 кэВ достигается при фазе эмиссии 55° (табл. 2). Это так называемый рабочий режим ВЧ инжектора;

- при значении фазы эмиссии 55° энергетический разброс в пучке на входе в ускоряющий резонатор имеет значение 25 кэВ (рис. 9,а). Минимальное значение в 5,5 кэВ наблюдается при фазе 31°. Распределение энергии частиц вдоль пучка имеет форму верхней части косинусоиды, при этом максимум в распределении энергии частиц вдоль пучка смещается от центра в сторону его «хвоста» (рис. 9,а);

- ВЧ инжектор позволяет осуществить продольную группировку пучков путем уменьшения фазы эмиссии от рабочего режима. «Хвост» пучка, имеющий частицы с большей энергией, будет догонять головную часть пучка. Таким образом, длина пучков будет сокращаться (рис. 8,б и 9,б). Так, на входе в ускоритель, при фазе эмиссии 31°, длина пучка 150 мм, по сравнению с 240 мм при фазе 55°;

- поперечные размеры электронного пучка увеличиваются с уменьшением фазы эмиссии (рис. 9,в) по сравнению с рабочей фазой (55°). Так при фазе в 55°

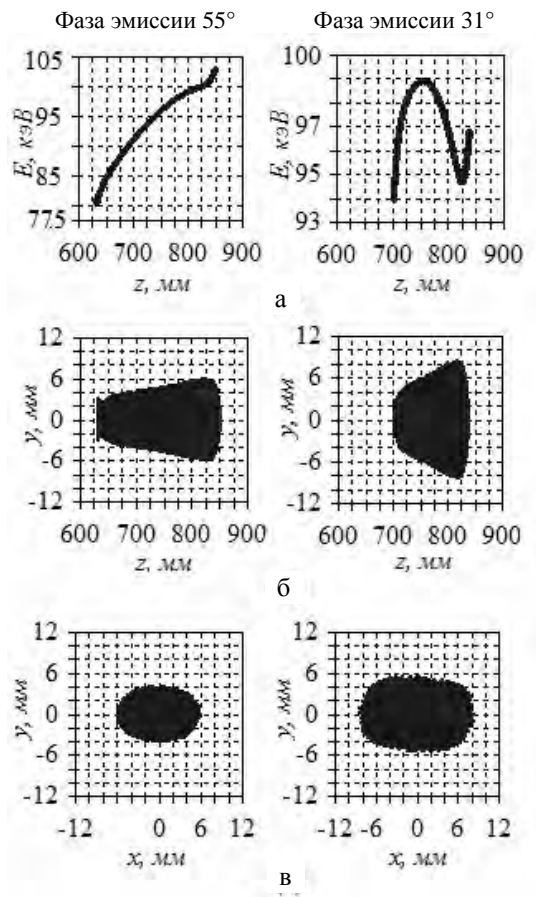


Рис. 9. Расчетные параметры пучков на входе в резонатор ускорителя: а – распределение по энергии в пучке; б – продольный профиль пучка; в – поперечный профиль пучка

поперечный размер пучка на входе в ускоряющий резонатор 11 × 9 мм, при фазе 31° – 14 × 12 мм (табл. 2), однако, эти размеры не превышают апертуру канала инжекции в резонатор. Неоднородность в радиальном направлении поперечного профиля пучка обусловлена действием фокусирующего поля квадрупольной линзы (рис. 9,в).

Для удобства, расчетные параметры пучков сведены в табл. 2.

Таблица 2

Расчетные параметры пучка ВЧ инжектора

Параметр	Значение			
	На выходе ВЧ инжектора		На входе в ускоряющий резонатор	
Фаза эмиссии пучков	55°	31°	55°	31°
Максимальная энергия электронов в пучке, кэВ	102,5	99	102,5	99
Энергетический разброс, кэВ	22,5	5	25	5,5
Продольный размер пучков, мм	170	150	240	150
Поперечный размер пучков, мм	7,6	9,6	11 × 9	14 × 12

## 2. Расчет динамики движения электронов внутри резонатора ускорителя

В расчетах определялась энергия электронов, энергетический разброс и размеры сгустка после однократного прохода через резонатор ускорителя при значении энергии инжекции 100 кэВ. Данные параметры рассчитывались для электронов, инжектируемых в ускоряющий резонатор в моменты времени, соответствующие фазам ВЧ поля в диапазоне от  $-90^\circ$  до  $+90^\circ$ , с шагом в  $1^\circ$ .

На рис. 10 представлены расчетные зависимости выходной энергии электронов, энергетического разброса и продольного размера сгустка от фазы ВЧ поля на входе электронов в ускоряющий резонатор (фаза инжекции).

Анализ результатов численного моделирования динамики пучка дает следующие результаты:

- функция зависимости энергетического разброса электронов в сгустке от фазы инжекции в ускоряющий резонатор имеет выраженный экстремум (рис. 10а). Так минимальный энергетический разброс в сгустке на выходе из ускорителя при фазе эмиссии в инжекторе  $55^\circ$  достигается при фазе инжекции  $-7^\circ$

(141 кэВ), а при фазе эмиссии  $31^\circ$  достигается при фазе инжекции  $+8^\circ$  (51 кэВ);

- во всем исследуемом диапазоне фаз эмиссии ( $31^\circ$ – $55^\circ$ ) электронов с катода инжектора, сгустки на выходе из ускорителя приобретают требуемую энергию за один проход в рассматриваемом диапазоне фаз инжекции в ускоритель (рис. 10б);

- продольные размеры сгустка увеличиваются с увеличением фазы инжекции как для фазы эмиссии  $31^\circ$ , так и для фазы эмиссии  $55^\circ$  (рис. 10в). Таким образом, для получения более коротких сгустков необходимо инжектировать электроны в ускоритель при меньших значениях фазы ВЧ поля в резонаторе ускорителя. Однако при фазе эмиссии  $31^\circ$ , сгустки на выходе из ускоряющего резонатора имеют меньшие продольные размеры по сравнению с фазой эмиссии  $55^\circ$  при прочих равных условиях.

Оптимальная фаза ВЧ поля в ускоряющем резонаторе – фаза в момент инжекции электронного пучка, при которой сгустки приобретают минимальный энергетический разброс, причем такой, чтобы в «крейсерском режиме работы ускорителя» на участках поворота обеспечивался энергетический разброс не более 6 % от средней энергии электронов [1].

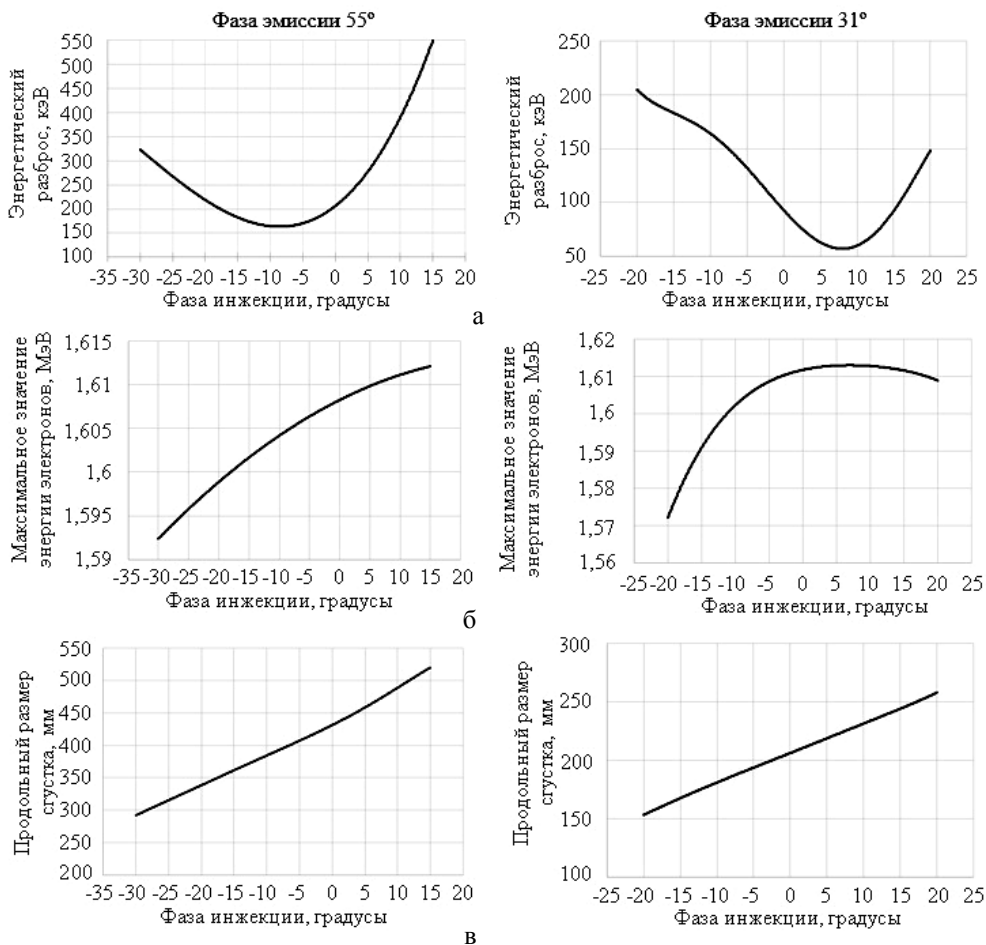


Рис. 10. Расчетные зависимости выходных параметров сгустков от фазы инжекции в резонатор ускорителя: а – энергетический разброс в сгустке; б – максимальное значение энергии электронов; в – продольный размер сгустка

Согласно результатам моделирования (рис. 10), при фазе эмиссии  $55^\circ$  не удается достичь значения энергетического разброса электронов в сгустке менее 6 % от средней энергии электронов. Данное обстоятельство накладывает ограничение по фазе эмиссии с катода ВЧ инжектора: необходимо уменьшать фазу эмиссии вплоть до оговоренного ранее значения в  $31^\circ$ . Лишь тогда можно удовлетворить требованию в получении энергетического разброса менее 6 %.

Таким образом, уже на данном этапе исследования накладываются требования к режиму работы, как инжектора электронов, так и ускоряющего резонатора для обеспечения многопроходного режима и получения проектных параметров электронного пучка [1].

Расчетные параметры сгустков на выходе из резонатора ускорителя, удовлетворяющие требованию минимального энергетического разброса, представлены на рис. 11.

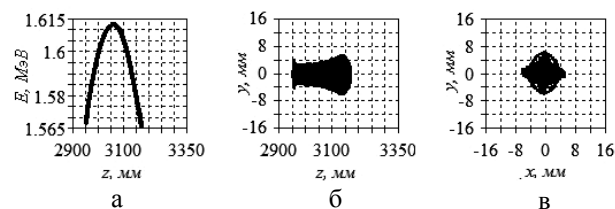


Рис. 11. Расчетные параметры электронных сгустков на выходе из ускоряющего резонатора (фаза эмиссии  $31^\circ$ , фаза инжекции  $8^\circ$ ): а – распределение энергии в электронном сгустке; б – продольный профиль сгустка; в – поперечный профиль сгустка

В результате численного моделирования определено что:

- оптимальная фаза инжекции, при которой достигается значение энергетического разброса в сгустке менее 6 % от средней энергии электронов в 1,5 МэВ, соответствует диапазону  $0^\circ$ – $15^\circ$ . Причем минимальное значение энергетического разброса в сгустке (51 кэВ) соответствует фазе инжекции  $8^\circ$ ;
- распределение энергии частиц вдоль сгустка имеет форму верхней части косинусоиды (рис. 11,а). Максимум в распределении энергии частиц вдоль сгустка смещается к центру при оптимальной фазе инжекции;
- поперечные размеры сгустка на выходе из ускорителя не превышают размеры апертуры пролетных отверстий в резонаторе ускорителя на всех этапах движения.

## Заключение

Проведены численные расчеты динамики электронных сгустков ВЧ инжектора с учетом влияния объемного заряда. Подтверждено, что максимальная энергия электронов в сгустке (100 кэВ) достигается при фазе эмиссии  $55^\circ$ . Однако можно произвести продольное сжатие сгустков, выбрав фазу эмиссии меньше рабочей. Нижний предел рабочего диапазона фазы

эмиссии ограничивается значением в  $31^\circ$ . При фазах эмиссии  $<31^\circ$  заряд в сгустке начинает уменьшаться из-за того, что головные частицы сгустка начинают эмитироваться в отрицательной фазе и не могут вылететь за управляющую сетку ВЧ пушки.

Проведены расчетные исследования динамических параметров пучка на выходе из ускоряющего резонатора БЕТА-8 при однопроходном режиме работы. Определены оптимальные фазы эмиссии электронных сгустков в инжекторе и приемлемые фазы инжекции в резонатор ускорителя, при которых наблюдается минимальный энергетический разброс в сгустках после первого этапа ускорения. Во всем исследуемом диапазоне фаз эмиссии ( $31^\circ$ – $55^\circ$ ) электронов с катода инжектора сгустки на выходе из ускоряющего резонатора приобретают требуемую энергию (1,5 МэВ) за один проход.

Накладывая дополнительные условия на параметры электронных сгустков (энергетический разброс в сгустке не должен превышать 6 % от средней энергии электронов), выдвигаются требования к режиму работы, как инжектора электронов, так и резонатора ускорителя для обеспечения возможности многопроходного режима. Установлено, что выполнение таких требований к величине энергетического разброса после первого этапа ускорения, возможно лишь при фазе эмиссии электронов в ВЧ инжектор меньше рабочего в  $55^\circ$  (рис. 10). Так, для фазы эмиссии  $31^\circ$  это условие выполняется при фазах инжекции  $0^\circ$ – $15^\circ$ . Минимальный энергетический разброс (51 кэВ) соответствует фазе инжекции  $8^\circ$ .

На данном этапе исследований можно сказать, что определены такие режимы работы ускорителя, при которых параметры электронных сгустков после первого этапа ускорения позволят в дальнейшем осуществить пятипроходный вариант ускорения практически без потерь тока в стенках резонатора.

## Литература

1. Гладышев Е. Н., Гордеев В. С., Завьялов Н. В., Кузнецова Н. Н. 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.
2. Pottier J. A new type of RF electron accelerator: the Rhodotron // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. 1989. Vol. B40/41. P. 943–945.
3. Jongen Y., Abs M., Delvigne T., Herer A. et al. Rhodotron Accelerators for Industrial Electron-beam Processing: a Progress Report // EPAC96. 1996. P. 2687.
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. P. 309–311.