

СИСТЕМА ИНЖЕКЦИИ РЕЗОНАНСНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ БЕТА-8. РАСЧЕТЫ И ЭКСПЕРИМЕНТ

*А. М. Опекунов, А. Н. Беляев, В. В. Кузнецов, Н. Н. Курапов, Л. Е. Поляков, Г. П. Поспелов,
М. Л. Сметанин, А. В. Тельнов, М. И. Хромьяк, Э. А. Шаравин, А. Н. Шейн, И. В. Шориков*

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

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.

Из-за высокой проектной средней мощности пучка необходимо минимизировать или полностью исключить потери электронов на стенках резонатора и в каналах транспортировки пучка. По этой причине проведены расчеты динамических параметров электронного пучка системы инжекции, чтобы, по возможности, исключить потери тока на начальных этапах.

В работе приведены результаты численных расчетов динамики электронных сгустков с учетом объемного заряда в системе инжекции пучка. Для подтверждения правильности выбранной физико-математической модели, лежащей в основе численных расчетов, проведены испытания ВЧ инжектора с пучком.

Введение

Проведенные в РФЯЦ-ВНИИЭФ исследования по воздействию потоков электронного и тормозного излучений на конструкционные свойства материалов позволили получить многочисленные расчетно-теоретические и экспериментальные данные, где в качестве источника ионизирующего излучения использован линейный резонансный ускоритель электронов ЛУ-10-20 [2]. Совокупность полученных результатов дала основание для изучения проблем, связанных с необходимостью и возможностью создания нового более мощного ускорителя электронов.

Неординарность задачи заключается в том, что требуется получение электронного пучка с очень широким энергетическим спектром, с возможностью его регулировки. Такая необходимость обосновывается особым интересом к исследованию влияния энергетического спектра частиц и темпа ввода энергии на свойства материалов.

Создание резонансного ускорителя электронов БЕТА-8 обеспечит необходимые условия для проведения таких исследований. Помимо высокой средней мощности, техническая новизна ускорителя БЕТА-8 заключается в возможности генерации широкого перестраиваемого спектра электронов в диапазоне энергий от 1 до 8 МэВ.

В настоящей работе основное внимание уделено системе инжекции электронного пучка. Элементы этой системы состоят из инжектора электронов с ВЧ генератором и тракта магнитной транспортировки пучка к ускорителю.

ВЧ инжектор предназначен для инжекции электронов в непрерывном режиме с энергией (50–100) кэВ, средним током до 40 мА и частотой следования сгустков (0,01–100) МГц в ускоряющую область ВЧ поля резонатора ускорителя БЕТА-8.

1. Ускоритель БЕТА-8

Резонансный ускоритель электронов БЕТА-8 разработан на основе коаксиального полуволнового резонатора (тип колебаний T_1 , частота 100 МГц). Набор энергии электронным пучком осуществляется при многократном прохождении резонатора в его срединной поперечной плоскости. Возврат пучка в резонатор обеспечивают поворотные магниты, которые расположены снаружи корпуса резонатора. 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.

После ускорения, в зависимости от выходной энергии, пучок электронов направляется по соответствующему каналу транспортировки, каждый из которых оснащен поворотными магнитами и фокусирующими магнитными линзами. На конечном участке транспортировки пучки с разными энергиями, с помощью выходного поворотного магнита, сводятся в общий канал вывода и доставляются к облучаемому объекту (рис. 1) [1].

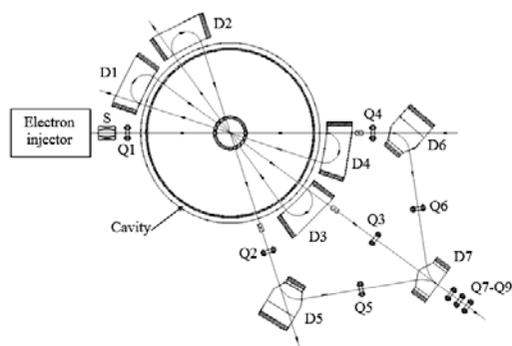


Рис. 1. Схема ускорения: \rightarrow – траектория движения пучка; D1 – D7 – поворотные дипольные магниты; S – соленоид; Q1 – Q9 – квадрупольные магнитные линзы

2. ВЧ инжектор

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

Таблица 1

Основные характеристики ВЧ инжектора

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

Принцип работы ВЧ инжектора следующий [3]: электроны эмитируются из термокатодного узла с заземленной сеткой, создающего короткие электронные сгустки, которые ускоряются ВЧ электрическим полем, создаваемым в зазоре высокочастотного четвертьволнового коаксиального резонатора (рис. 2). Электронные сгустки формируются импульсами отрицательного напряжения на катоде. Фазовая длина импульсов 43° (1,2 нс на полувысоте). Регулирование среднего тока пучка производится как за счет изменения заряда в сгустках, так и за счет изменения частоты повторения сгустков. Длительность сгустков на выходе инжектора регулируется фазой эмиссии.

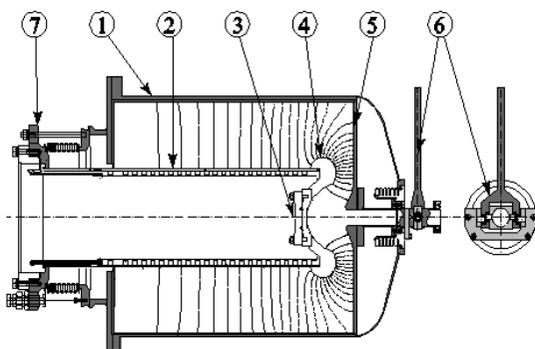


Рис. 2. Схематичное изображение резонатора ВЧ инжектора с силовыми линиями ускоряющего ВЧ поля: 1 – корпус резонатора; 2 – цилиндрический электрод; 3 – термокатодный узел; 4 – фокусирующий электрод; 5 – торцевая стенка резонатора с анодным отверстием; 6 – устройство оперативной перестройки частоты резонатора;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

Размер ускоряющего зазора порядка 80 мм, частота ускоряющего поля около 100 МГц. Максимальное поверхностное электрическое ВЧ поле (4 МВ/м при 100 кВ) сосредоточено на краях фокусирующего

электрода (поз. 4 на рис. 2), вдали от оси резонатора. Из-за высокой напряженности, края этого электрода служат источником темновых токов автоэмиссии, которые остаются внутри резонатора и не попадают в канал для пучка. Таким образом, сгустки из инжектора выходят без примеси посторонних частиц тока автоэмиссии.

3. Численное моделирование пучка

Для определения основных узлов диагностического оборудования создаваемого стенда для испытания ВЧ инжектора с пучком, определения положения этих узлов в пространстве относительно канала транспортировки пучка, с помощью программ трехмерного электродинамического моделирования, к примеру, ASTRA (A Space Charge Tracking Algorithm) [4] построена компьютерная модель канала диагностики пучка, учитывающая реальные размеры и физические свойства основных элементов.

3.1. Моделирование динамических параметров пучка ВЧ инжектора

В процессе моделирования принимается, что с поверхности катода постоянно и равномерно эмитируются макрочастицы с энергией $kT = 0,2$ эВ. В зависимости от величины и знака электрического поля над катодом, являющимся суперпозицией полей, создаваемых потенциалом управляющей сетки и потенциалом анода, а также полей пространственного заряда уже эмитированных частиц, вновь эмитированные частицы либо ускоряются в этом поле и пролетают в резонатор, частично оседая на сетке, либо возвращаются на катод и больше не участвуют в дальнейшей динамике.

В моделировании используются 50000 макрочастиц, равномерно вылетающих в интервале времени 2 нс с поверхности катода. На сетку подается импульс напряжения в виде сглаженного прямоугольника с длительностью примерно 1 нс.

Для того чтобы все частицы вылетали из зазора резонатора без потерь и имели наибольшую энергию, сгустки должны эмитироваться из катодно-сеточного узла в определенной фазе ВЧ поля, меньшей 90° иметь достаточно малую длительность [5]. Численные расчеты динамики пучка в поле ускоряющего зазора ВЧ пушки проводились с учетом действия импульсных отпирающих напряжений, подаваемых на катод. Импульсы приходят в момент роста ВЧ напряжения на зазоре, в интервале фаз ($31-55$) градусов, при амплитуде напряжения на зазоре 100 кВ, при среднем токе пучка 40 мА. На рис. 3 и 4 приведены характеристики сгустков, полученные в результате моделирования.

Согласно проведенным расчетам, оптимальная величина фазы эмиссии центра сгустка составляет 55° , когда величина ВЧ поля в резонаторе обеспечивает энергию частиц в сгустках 100 кэВ. Однако можно произвести продольное сжатие сгустков ($\approx 1,4$ раза), если выбрать фазу инжекции ниже. Для такого

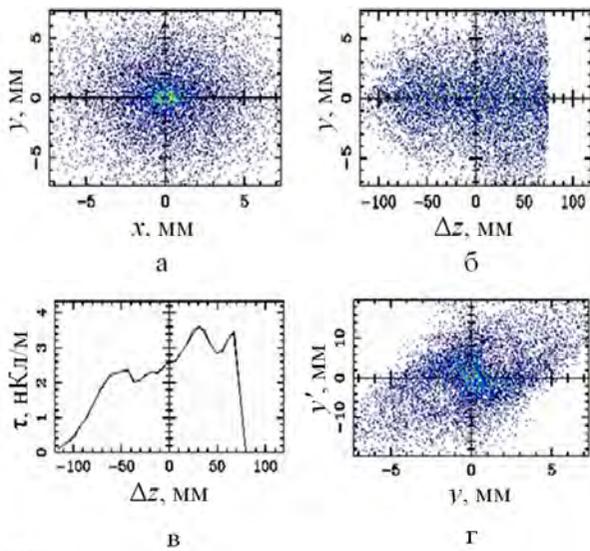


Рис. 3. Расчетные динамические параметры пучка на выходе из ВЧ пушки (фаза эмиссии 55°): а – поперечный профиль сгустка; б – продольный профиль сгустка; в – продольное распределение линейной плотности заряда; г – диаграмма эмиттанса

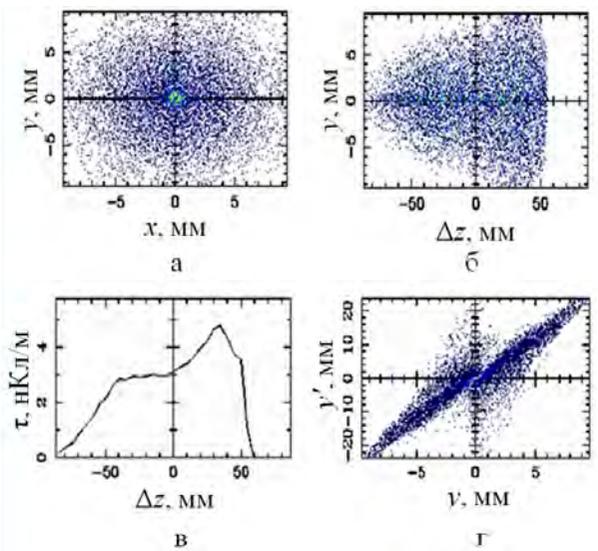


Рис. 4. Расчетные динамические параметры пучка на выходе из ВЧ пушки (фаза эмиссии 31°): а – поперечный профиль сгустка; б – продольный профиль сгустка; в – продольное распределение линейной плотности заряда; г – диаграмма эмиттанса

сжатия достаточно сдвинуть фазу эмиссии сгустков из катода в ВЧ пушке с 55° до 31° (рис. 3,б и 4,б), при этом наблюдается незначительное увеличение их поперечных размеров (рис. 3,а и 4,а), которые не превышают размеров отверстия на выходе из инжектора в 32 мм. При этом энергия сгустков меняется незначительно: со 100 кэВ до 96 кэВ. Еще больше сдвигать фазу было бы нежелательно, из-за наступающего уменьшения заряда в сгустках. Расчетные характеристики сгустков на выходе из ВЧ инжектора приведены в табл. 2.

После ускорения в инжекторе, заряд в сгустке должен сохраняться на уровне 0,4 нКл, что соответствует значению тока в 40 мА (рис. 3,в и 4,в).

Расчетная диаграмма эмиттанса (рис. 3,г и 4,г) на выходе из ВЧ инжектора в обоих случаях ускорения соответствует расходящемуся пучку [6], т. к. диаграмма преимущественно занимает первый и третий квадранты координатной плоскости, что может привести к неприемлемым размерам пучка в процессе дальнейшей его транспортировки на заданное расстояние.

Согласно расчетам, рабочий режим работы ВЧ инжектора занимает диапазон фаз эмиссии 30° – 55° при амплитуде напряжения 100 кВ. При фазах, меньших 30° , начинается ограничение заряда в сгустках, из-за того что головные частицы сгустка начинают эмитироваться в отрицательной фазе ВЧ в пушке и не могут вылететь за управляющую сетку. На верхней границе диапазона рабочих фаз сгустки получают максимальное ускорение. При фазах выше рабочего диапазона сгустки получают меньшее ускорение и удлиняются на всем протяжении дрейфа. Опасными являются фазы эмиссии 100° – 210° , когда появляются обратно ускоренные электроны, мощность тока которых может достигать 300 Вт.

Таблица 2

Расчетные характеристики сгустков на выходе из ВЧ инжектора (210 мм от катода)

Параметр	Значение	
Фаза эмиссии сгустков	55°	31°
Средняя энергия, кэВ	100	96,1
Длина сгустков (rms), мм	47,6	34,6
Энергетический разброс (rms), кэВ	1,74	4,25
Эмиттанс (rms), п-мм-мрад	10,7	10,3

3.2. Моделирование прохода пучка через систему магнитной транспортировки

Моделирование прохода пучка через систему диагностики (рис. 5) проводилось для энергии инжекции 100 кэВ для двух значений фаз эмиссии (31° и 55°). Исходя из ранее проведенных расчетов, пучок будет расширяться во время транспортировки по каналу, в соответствии с диаграммами эмиттансов (рис. 3,г и 4,г), что приведет к нежелательному расщеплению на стенках канала. Поэтому, для поперечной фокусировки пучка в канале транспортировки необходимо воздействовать внешней возмущающей силой, уравнивающей силу кулоновского расталкивания. Это можно осуществить путем использования фокусирующих магнитных полей, созданных с помощью системы соленоидов (см. рис. 5) с регулируемой индукцией магнитного поля.

После некоторых допущений и проведенного анализа, моделировалась проводка пучка в канале магнитной транспортировки, конфигурация полей в области которого образована тремя соленоидами (рис. 5). Результаты расчетов представлены на рис. 6 и 7.

Расчетные характеристики сгустков на расстоянии 1460 мм от катода

Параметр	Значение	
Фаза эмиссии сгустков	55°	31°
Энергия, кэВ	100	96,1
Длина сгустков (rms), мм	52,89	19,30
Поперечные размеры пучка (rms) σ_x/σ_y , мм	7,27/7,25	8,67/8,66
Энергетический разброс, кэВ	1,9	2,03
Эмиттанс (rms), $\mu\text{м}\cdot\text{мм}\cdot\text{мрад}$	10,0	11,5

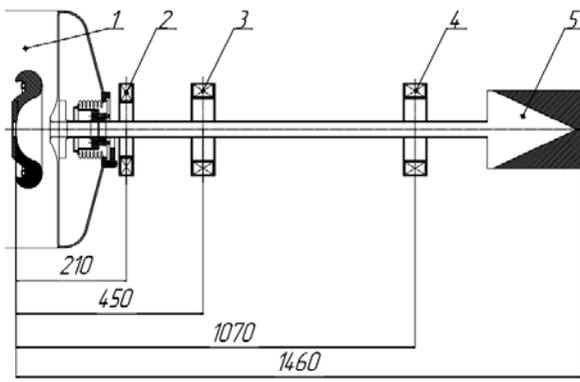


Рис. 5. Схематическое изображение системы диагностики пучка: 1 – ВЧ пушка; 2 – первый соленоид; 3 – второй соленоид; 4 – третий соленоид; 5 – поглотитель электронов (цилиндр Фарадея)

В результате расчетов установлено, что в процессе транспортировки пучка фокусирующие магнитные поля формируют профили сгустков, которые на расстоянии 1460 мм от катода (координата поглотителя электронов, рис. 5) имеют вид, представленный на рис. 6, а, б и 7, а, б. В случае эмиссии в фазе 31° наблюдается уменьшение продольных размеров сгустка ($\approx 2,5$), по сравнению с фазой 55°. Напротив, поперечные размеры сгустка увеличиваются и приближаются к величине диаметра канала транспортировки, но не превышают их. Характеристики пучков сведены в табл. 3.

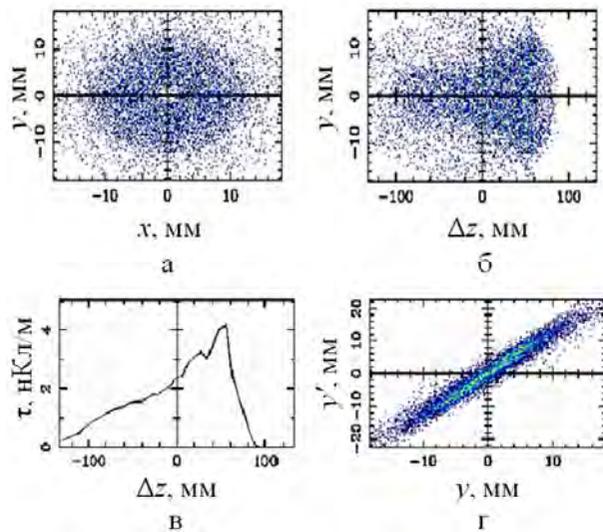


Рис. 6. Расчетные динамические параметры пучка на расстоянии 1460 мм от катода (фаза эмиссии 55°): а – поперечный профиль сгустка; б – продольный профиль сгустка; в – продольное распределение линейной плотности заряда; г – диаграмма эмиттанса

4. Испытания ВЧ инжектора

4.1. Измерение собственной резонансной частоты резонатора ВЧ инжектора

Резонатор ВЧ инжектора является основной составной частью инжектора электронов. При наличии соответствующего ВЧ питания (ВЧ сигнал со средней мощностью до 15 кВт на частоте 100 МГц) и обеспечения требуемых условий, создаваемых при помощи технологических систем водяного охлаждения и вакуумирования, в резонаторе возбуждаются электромагнитные колебания с напряженностью электрического поля достаточной для достижения электронами приращения энергии до 100 кэВ.

С использованием комплекта измерительных петель и анализатора цепей Agilent E5071C проведены измерения собственной частоты резонатора. Результаты измерений представлены на рис. 8 и 9.

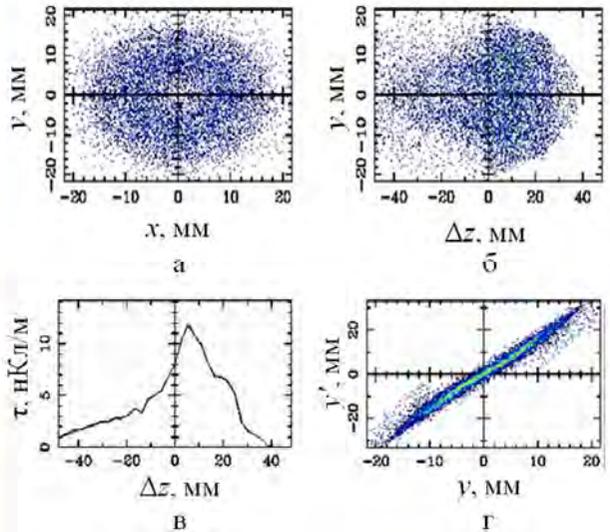


Рис. 7. Расчетные динамические параметры пучка на расстоянии 1460 мм от катода (фаза эмиссии 31°): а – поперечный профиль сгустка; б – продольный профиль сгустка; в – продольное распределение линейной плотности заряда; г – диаграмма эмиттанса

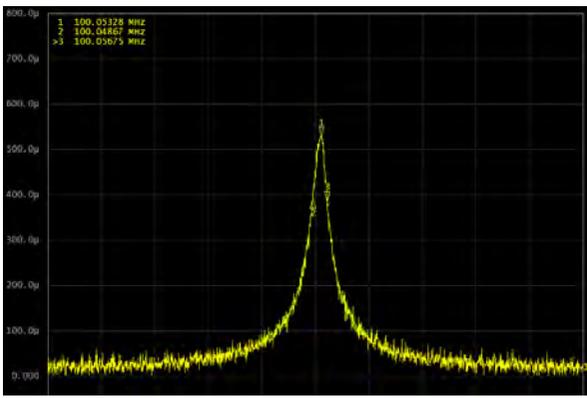


Рис. 8 Значение резонансной частоты резонатора и частот на уровне половинной мощности

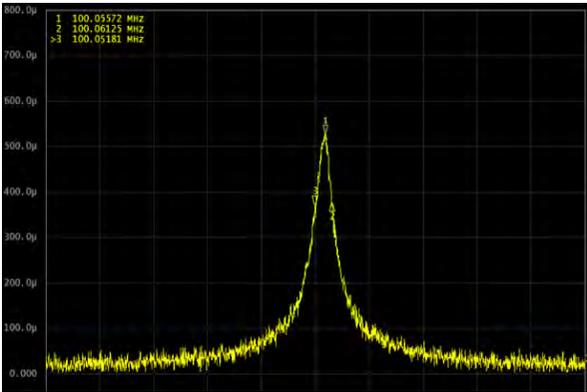


Рис. 9 Значение резонансной частоты резонатора и частот на уровне половинной мощности с учетом водяного охлаждения корпуса

Проведенные «холодные» измерения показали, что собственная резонансная частота резонатора ВЧ инжектора $f = 100,05328$ МГц (рис. 8). При включении водяного охлаждения корпуса резонатора резонансная частота $f = 100,05572$ МГц. Дрейф резонансной частоты (сравнивая рис. 8 и 9) может происходить за счет изменения геометрии внутренней полости объемного резонатора вследствие разогрева или охлаждения стенок резонатора. Однако такой уход частоты (≈ 2 кГц) находится в пределах рабочего интервала ($100 \pm 0,4$) МГц. Управление резонансной частотой осуществляется изменением емкости ускоряющего зазора, путем прогиба торцевой стенки резонатора. Прогиб осуществляется шаговым двигателем, который управляется системой фазовой автоподстройки частоты. Сигналы для работы системы фазовой автоподстройки частоты снимаются с одной из двух измерительных петель, расположенных по обе боковые стороны резонатора, симметрично.

Нагруженную добротность резонатора можно вычислить по формуле [7]:

$$Q = \frac{f_1}{f_3 - f_2}, \quad (1)$$

где f_1 – резонансная частота, f_2 и f_3 – частоты на уровне половинной мощности.

Исходя из полученных в эксперименте по определению собственной резонансной частоты резонатора ВЧ инжектора данных (рис. 8), оказывается, что $f_1 = 100,05328$ МГц, $f_2 = 100,04867$ МГц, $f_3 = 100,05675$ МГц. Таким образом, определим добротность контура, согласно выражению (1):

$$Q = \frac{f_1}{f_3 - f_2} = \frac{100,05328}{100,05675 - 100,04867} = 12400. \quad (2)$$

4.2. Стенд для испытания ВЧ инжектора с пучком

Для испытания ВЧ инжектора создан стенд с возможностью диагностики пучка электронов. Стенд включает в себя ВЧ инжектор и диагностическое оборудование (рис. 10). ВЧ мощность закачивается в инжектор генератором 16 кВт.

После оптимизации проведенных расчетов по транспортировке пучка в канале диагностики, были предложены рабочие параметры основных элементов канала диагностики, которые позволят без потерь транспортировать пучок к поглотителю электронов. Величину индукции магнитного поля на оси первого соленоида необходимо устанавливать в пределах (0–4) мТл, а второго – от 10 до 12 мТл.

В эксперименте с помощью двух пространственно-разделенных резистивных датчиков тока измерены энергии (50–100 кэВ), длительность (0,7–1 нс) и пиковый ток сгустков (≈ 4 мкА).

Форма импульсов с датчиков тока меняется в зависимости от фазы эмиссии с сеточно-катодного узла. Случай, когда импульсы имеют одинаковую амплитуду (рис. 11 а), соответствует рабочей фазе 55° с максимальной энергией ускорения. Когда же второй импульс выше и короче первого, это означает, что проявляется эффект продольной группировки сгустков, тогда фаза меньше рабочей (рис. 11, б).

Из амплитуды полученных импульсов и частоты посылы импульсов был определен средний ток, который достигал 400 мкА.

Для измерения профиля пучка электронов на выходе тракта транспортировки была установлена выпускная титановая фольга с прикрепленной к ней рентгеновской пленкой. Титановая фольга толщиной 50 мкм, согласно расчетам, полностью поглощает электроны с энергией 100 кэВ. Поэтому оценку профиля сгустка можно произвести по распределению квантов тормозного излучения, возникающего в результате взаимодействия электронов с материалом фольги. Расчет распределения квантов тормозного излучения, вылетающих с фольги (рис. 12), проведен в программе численного моделирования методом Монте-Карло [8] с нормировкой на один электрон, падающий на выходную фольгу. Максимальное значение в распределении соответствует $2,37 \cdot 10^{-4}$ квантам с одного участвующего в взаимодействии с веществом электроном. Ожидаемый диаметр пятна на пленке 10–12 мм. Используемый в расчетах профиль электронного сгустка, падающего на фольгу, представлен на рис. 13 (ток пучка 40 мкА).

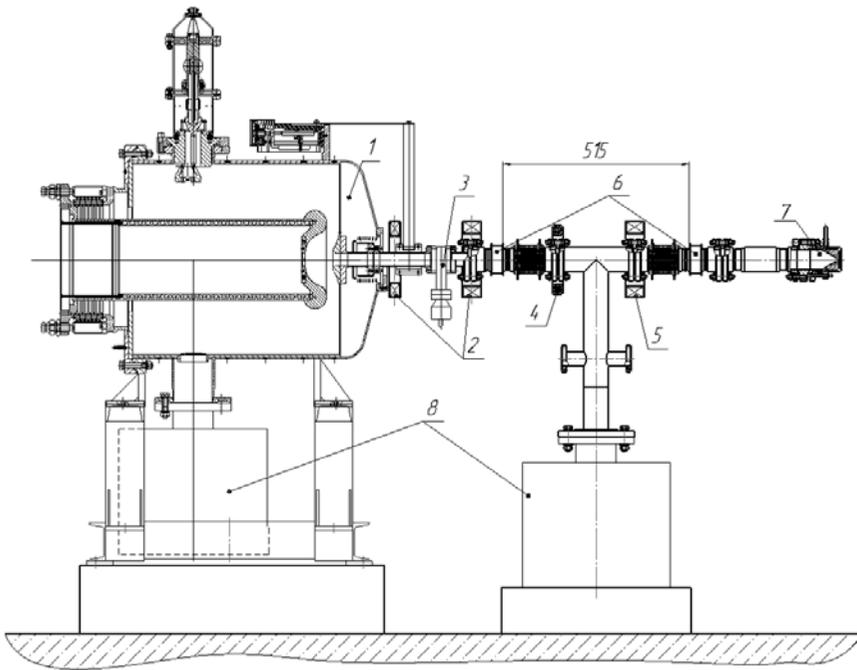
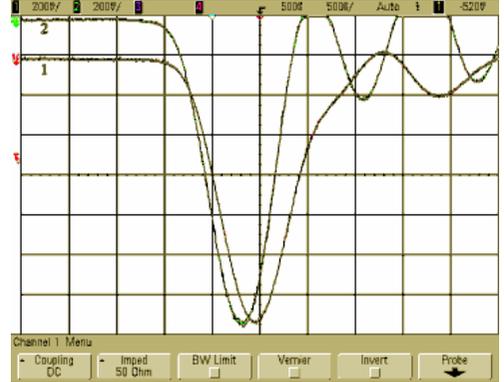


Рис. 10. Схематическое изображение диагностической части стенда: 1 – ВЧ инжектор; 2 – фокусирующие соленоиды. Индукция магнитного поля на оси соленоидов регулируется в пределах от 0 до 15 мТл; 3 – высоковакуумный шибер; 4 – корректор положения пучка; 5 – соленоид для получения необходимого профиля пучка на оконечном устройстве; 6 – резистивные датчики тока, связанные коаксиальным кабелем с высокочастотным осциллографом. С их помощью возможно определять длительность сгустков и пиковый ток сгустков Датчик состоит из 16 одинаковых 50 Ом резисторов, включенных параллельно вокруг изолятора; 7 – водоохлаждаемый поглотитель пучка (цилиндр Фарадея); 8 – магниторазрядные насосы



а



б

Рис. 11. Осциллограммы импульсов с датчиков тока для разных фаз эмиссии: а – 55°, б – 31°. Разрешение горизонтальной оси 0,5 нс/клетку



Рис. 12. Нормированное распределение квантов тормозного излучения

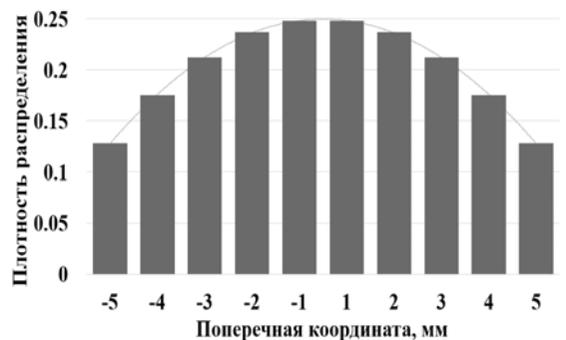


Рис. 13. Профиль пучка электронов, падающего на выходную фольгу

Проведены численные расчеты динамики электронных сгустков ВЧ инжектора с учетом объемного заряда для энергий инжекции 100 кэВ. С помощью создания системы магнитной транспортировки обеспечиваются условия, при которых размеры пучка не превысят апертуру канала инжекции, тем самым исключается рассеивание пучка на первых этапах его транспортировки.

Проведенные испытания подтвердили правильность понимания физических принципов ускорения высокоинтенсивных пучков электронов: физико-математические модели, которые легли в основу проведенных расчетов, адекватно описывают динамические параметры пучка на этапах его формирования, ускорения и транспортировки.

После проведения анализа экспериментов, сделан вывод о хорошем совпадении расчетных и измеренных динамических параметров пучка:

- рабочий режим работы ВЧ инжектора занимает диапазон фаз эмиссии 30° – 55° при амплитуде напряжения 100 кВ;
- расчетная и измеренная длительность импульсов составляет около 1 нс;
- средний ток в эксперименте получен в интервале (4–400) мкА, который регулируется в зависимости от частоты повторения импульсов в диапазоне (0,01–1) МГц, что предсказывается расчетами.

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. Zavyalov N. V., In'kov V. I., Lisovento N. A., Punin V. T. et. al. Development of Radiation Technologies on VNIIEF LU-10-20 Linac // ВАНИТ. Сер. Яд.-физ. Исслед. (34). 1999. № 3. С. 93.

3. 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.

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

5. Опекунов А. М., Сметанин М. Л., Тельнов А. В., Шориков И. В. Расчеты динамических параметров электронного пучка резонансного ускорителя БЕТА-8 // Молодежь в науке: Сборник тезисов XIV научно-технической конференции. 2015. С. 50.

6. Физика и технология источников ионов. / Под ред. Я. Брауна: Пер. с англ. – М.: Мир, 1998.

7. Диафрагмированные волноводы: Справочник. / Вальднер О. А., Собенин Н. П., Зверев Н. П., Щедрин И. С. – М: Энергоатомиздат. 1991. 280 с.

8. Житник А. К., Донской Е. Н., Огнев С. П., Горбунов А. В. 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.