

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОТРАБОТКА ПРОВОДКИ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА ВЧ ИНЖЕКТОРА ДЛЯ РЕЗОНАНСНОГО УСКОРИТЕЛЯ БЕТА-8

*Н. В. Завьялов¹, В. В. Кузнецов¹, Н. Н. Курапов¹, А. М. Опекунов¹, Г. П. Поспелов¹,
С. А. Путевской¹, М. Л. Сметанин¹, А. В. Тельнов¹, С. М. Тресков¹, М. И. Хромяк¹, И. В. Шорилов¹,
В. Е. Юрлов¹, В. С. Арбузов², В. Н. Волков², И. А. Запругаев², Е. И. Колобанов², С. А. Крутихин²,
Г. Я. Куркин², Е. А. Купер², С. В. Мотыгин², В. Н. Осипов², В. К. Овчар², В. В. Репков²,
В. М. Петров², И. К. Седяров², Г. В. Сердобинцев², С. С. Середняков², С. В. Тарарышкин²,
А. Г. Трибендис², К. Н. Чернов², М. А. Щеглов²*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»,

пр. Мира, 37, Саров, Нижегородская область, 607188, Россия

²Институт Ядерной Физики им. Г. И. Будкера (ИЯФ СО РАН)

В «РФЯЦ-ВНИИЭФ» создается резонансный ускоритель электронов БЕТА-8 [1] с широким диапазоном выходной энергии электронного пучка от 1 до 8 МэВ со средней мощностью до 300 кВт. Из-за высокой проектной средней мощности пучка, необходимо минимизировать или полностью исключить потери электронов на стенках резонатора и в каналах транспортировки пучка.

ВЧ инжектор [2], разработанный в ИЯФ СО РАН, и система магнитной транспортировки пучка выступают в качестве основных элементов системы инжекции. В работе приведены результаты численных расчетов динамики электронных сгустков. Для подтверждения правильности выбранной физико-математической модели, лежащей в основе численных расчетов, проведены испытания ВЧ инжектора с пучком. Испытания показали хорошее совпадение расчетных и измеренных параметров.

БЕТА-8 resonance electron accelerator [1] with a broad range of electron beam output energies 1–8 MeV with average power up to 300 kW is developed at «RFNC-VNIIEF». Due to a high rated average beam power it is necessary to minimize or completely eliminate electron losses on resonator walls and in beam transport channels.

The RF injector [2] developed by INP SO RAS and the magnet beam transport system serve as basic injection system's elements. The paper presents results of numerical calculations of electron bunch dynamics. To validate a selected physical and mathematical model underlying the numerical calculations the RF injector with a beam has been tested. The tests have proved a good coincidence of calculated and measured parameters.

Введение

Проводимые в «РФЯЦ-ВНИИЭФ» исследования по воздействию потоков электронного и тормозного излучений на физические свойства материалов, своим итогом имеют многочисленные расчетно-теоретические и экспериментальные данные, где в качестве источника ионизирующего излучения использован линейный резонансный ускоритель электронов ЛУ-10-20 [3]. 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 широким энергетическим спектром, с возможностью его регулировки.

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 [2] и тракта транспортировки пучка к ускорителю.

Цель работы заключается в определении режимов работы ВЧ пушки на основе расчетных и экспериментальных исследований характеристик электронных ступок, генерируемых этой пушкой.

Ускоритель БЕТА-8

Резонансный ускоритель электронов 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 [4]. 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) [5].

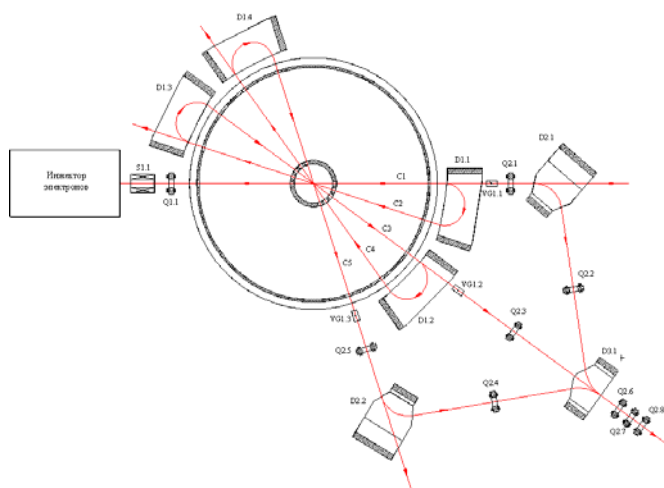


Рис. 1. Схема ускорения. \rightarrow — направление движения пучка; C1 – C5 – каналы ускорения в резонаторе; D1.1 – D1.4, D2.1 – D2.2, D3.1 – поворотные дипольные магниты; S1.1. – соленоид; Q1.1, Q2.1 – Q2.8 – квадрупольные магнитные линзы; VG1.1 – VG1.3 – вакуумные шиберы

ВЧ инжектор

Основной частью инжектора является сеточно-управляемая терموкатодная ВЧ пушка на основе высокочастотного четвертьволнового коаксиального резонатора 100 МГц. Резонатор запитан через индуктивный ввод ВЧ мощности от лампового генератора 16 кВт. В таблице 1 приведены основные характеристики ВЧ инжектора.

Таблица 1

Основные характеристики ВЧ инжектора

Параметр	Значение
Средний ток ВЧ инжектора, мА	> 40
Энергия электронов, кэВ	50–100
Длительность ступков, нс	0,5–2
Мощность ВЧ генератора, кВт	< 16
Допустимый рабочий вакуум, Па	10^{-4}

Схематическое изображение резонатора ВЧ инжектора представлено на рис. 2.

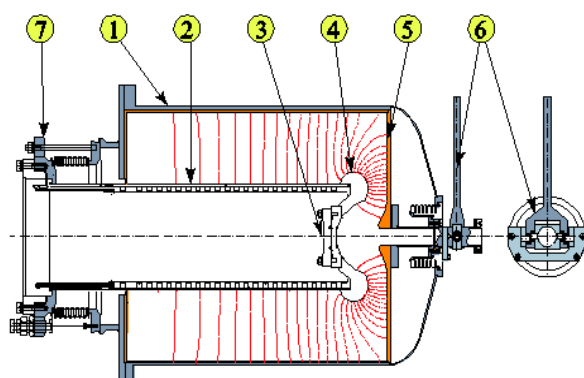


Рис. 2. Схематическое изображение резонатора ВЧ пушки. 1 – корпус резонатора; 2 – цилиндрический электрод; 3 – термокатодный узел; 4 – фокусирующий электрод; 5 – торцевая стенка резонатора с анодным отверстием; 6 – устройство оперативной перестройки частоты резонатора; 7 – устройство предварительной настройки частоты резонатора

Численное моделирование пучка

Для прогнозирования динамических параметров электронного пучка на этапах его формирования, ускорения и транспортировки, была необходимость в создании физико-математической модели рассматриваемого источника электронов

для понимания физических принципов ускорения высокоинтенсивных пучков электронов.

В свою очередь, 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) [6], создана компьютерная модель будущего канала диагностики пучка, учитывающая реальные размеры и физические свойства прогнозируемых элементов.

Расчеты динамики 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 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.

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, при фазе инжекции 55° ускоренный пучок имеет наибольшее значение энергии в 100 кэВ. Однако можно произвести продольное сжатие сгустков, если выбрать фазу инжекции ниже. Для такого сжатия достаточно сдвинуть фазу эмиссии сгустков с катода в ВЧ пушке с 55° до 31° (рис. 3б и 4б). При этом энергия сгустков меняется незначительно: со 100 кэВ до 96 кэВ. Еще больше сдвигать фазу было бы нежелательно, из-за наступающего ограничения заряда в сгустках.

Прогнозируется, что после ускорения в ВЧ пушке, заряд в сгустке будет сохраняться на уровне 0,4 нКл, что соответствует значению среднего тока в 40 мА (рис. 3в и 4в).

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

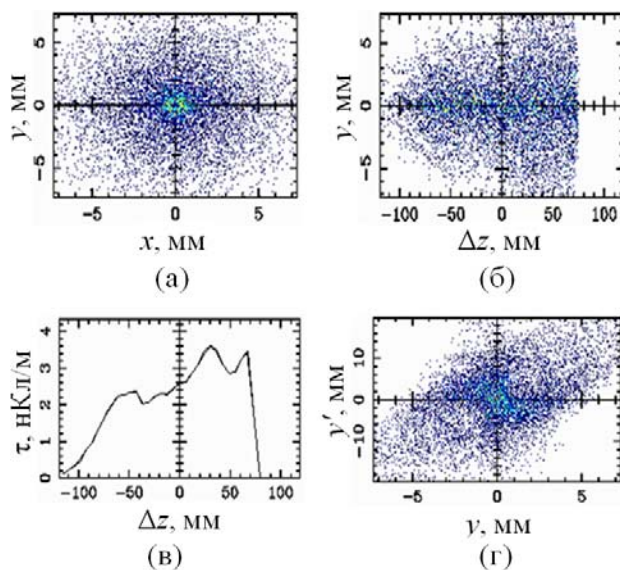


Рис. 3. Расчетные динамические параметры пучка на выходе из ВЧ пушки (фаза инжекции 55°): (а) – поперечный профиль сгустка; (б) – продольный профиль сгустка; (в) – продольное распределение линейной плотности заряда; (г) – диаграмма эмитанса

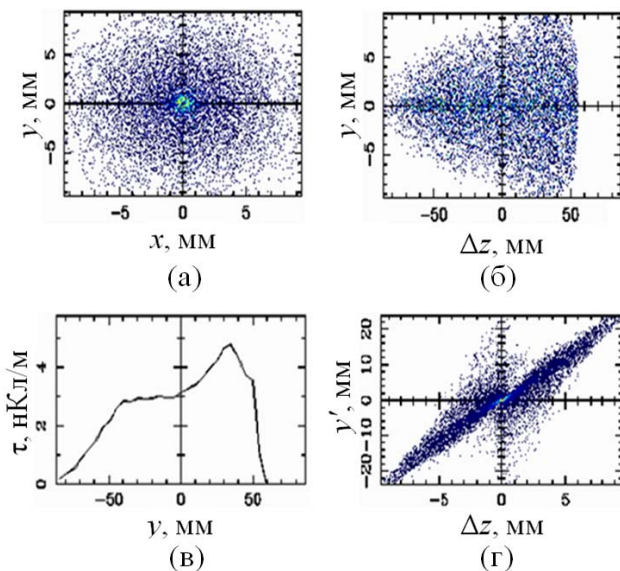


Рис. 4. Расчетные динамические параметры пучка на выходе из ВЧ пушки (фаза инжекции 31°): (а) – поперечный профиль сгустка; (б) – продольный профиль сгустка; (в) – продольное распределение линейной плотности заряда; (г) – диаграмма эмитанса

После оптимизации режимов, расчетами установлено, что максимальная энергия и минимальный энергетический разброс при напряжении 100 кВ, обеспечиваются в фазе 55° . При меньших фазах начинает проявляться эффект продольной группировки сгустков. Так при фазе 31° , сгустки укорачиваются в 1,4 раза по сравнению с режимом максимума энергии сразу на выходе из ВЧ пушки (табл. 2).

Таблица 2

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

Параметры	Значения	
Фаза ВЧ эмиссии сгустков, град	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

Расчеты динамики пучка в канале диагностики

В принятом на сегодняшний день конструктивном варианте канала инжекции в ускоритель, расстояние, на которое необходимо транспортировать пучок от ВЧ пушки до входа в резонатор ускорителя, составляет порядка 1400 мм. По этой причине длина тракта транспортировки пучка от ВЧ инжектора до поглотителя электронов, в случае стенда для диагностики пучка, соизмерима и составляет 1460 мм (рис. 5), чтобы уже при проведении тестовых испытаниях была возможность отработать режимы работы ВЧ пушки.

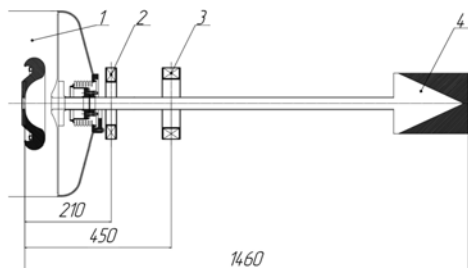


Рис. 5. Схематическое изображение системы диагностики пучка: 1 – ВЧ пушка; 2 – первый соленоид; 3 – второй соленоид; 4 – поглотитель электронов

Моделирование проводки пучка в канале системы диагностики (рис. 5) проводилось для энергии инжекции 100 кэВ для двух значений фаз инжекции (31° и 55°). Исходя из ранее проведенных расчетов, пучок будет расширяться во время транспортировки по каналу, в соответствии с диаграммой

эмиттанса на выходе из ВЧ пушки (рис. 3г и 4г). 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, технически созданных с помощью системы соленоидов (см. рис. 5).

После проведения анализа и учета всех оговоренных ранее фактов, расчеты динамики пучка в канале диагностики включают транспортировку пучка через поля двух фокусирующих соленоидов (поз. 2, 3) до мишени (поз. 5). Выбор такого варианта основан на том, что в рамках настоящей работы он является достаточным для выполнения поставленных целей, заключающихся в определении режимов работы ВЧ пушки.

Результаты моделирования проводки 100 кэВ пучка через канал магнитной транспортировки приведены на рис. 6 и 7.

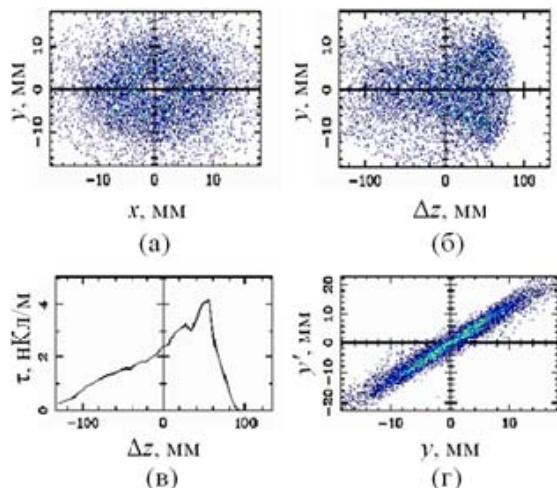


Рис. 6. Расчетные динамические параметры пучка на расстоянии 1460 мм от катода (фаза инжекции 55°): (а) – поперечный профиль сгустка; (б) – продольный профиль сгустка; (в) – продольное распределение линейной плотности заряда; (г) – диаграмма эмиттанса

После оптимизации режимов, на расстоянии 1460 мм расчетная фазовая протяженность сгустка для 100 кэВ пучка сокращается в 2,5 раза в случае инжекции в фазе 31° по сравнению с фазой 55° , однако немного увеличивается энергетический разброс (около 6%). В связи с этим, ускорение при фазе инжекции 31° выглядит перспективнее, т.к. при несколько больших значениях поперечного размера пучка и энергетического разброса, чем в случае инжекции 55° , продольные размеры сгустка значительно сокращаются, что может стать ключевым фактором при ускорении пучка в резонаторе ускорителя. Характеристики пучков сведены в табл. 3.

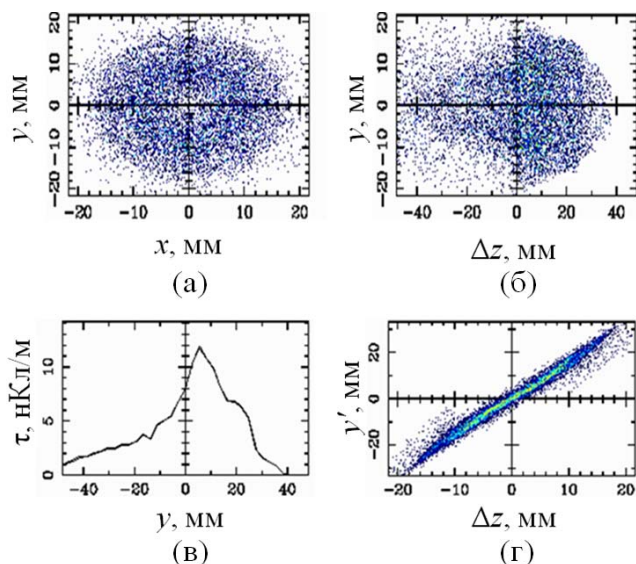


Рис. 7. Расчетные динамические параметры пучка на расстоянии 1460 мм от катода (фаза инжекции 31°): (а) – поперечный профиль сгустка; (б) – продольный профиль сгустка; (в) – продольное распределение линейной плотности заряда; (г) – диаграмма эмиттанса

Таблица 3

Расчетные характеристики сгустков на расстоянии 1460 мм от катода

Параметр	Значение	
Фаза ВЧ эмиссии сгустков, град	55	31
Энергия, кэВ	100	96,1
Длина сгустков (rms), мм	52,89	19,30
Поперечные размеры пучка (rms) σ_x и 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

Стенд для испытания ВЧ инжектора с пучком

Для проведения экспериментов с пучком, отладки лампового генератора, системы управления и системы питания ВЧ генератора, настройки аппаратуры был создан стенд с диагностическим оборудованием (рис. 8). ВЧ мощность закачивается в инжектор ламповым ВЧ генератором 16 кВт, соединенным с ВЧ пушкой коаксиальным фидером. В удаленном от стенда помещении находятся стойка высоковольтного питания генератора и стойка управления генератором и модулятором сеточно-катодного узла.

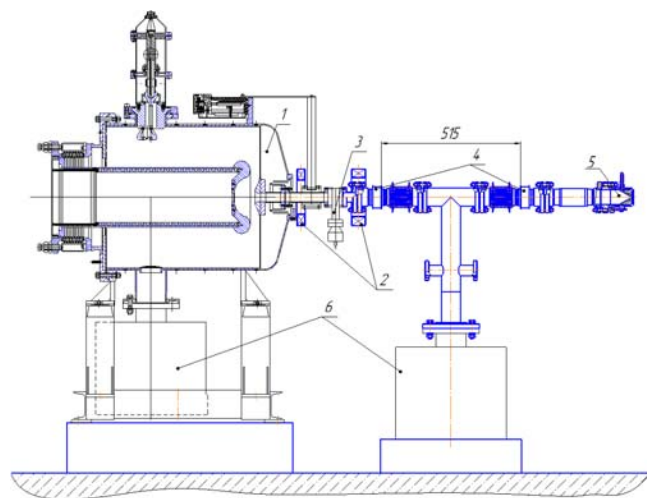


Рис. 8. Схематическое изображение диагностической части стенда: 1 – ВЧ инжектор; 2 – соленоиды, обеспечивающие минимум эмиттанса пучка. Индукция магнитного поля на оси соленоидов регулируется в пределах от 0 до 15 мТл; 3 – высоковакуумный шибер; 4 – резистивные датчики тока, связанные коаксиальным кабелем 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; 5 – поглотитель пучка (цилиндр Фарадея); 6 – магниторазрядные насосы

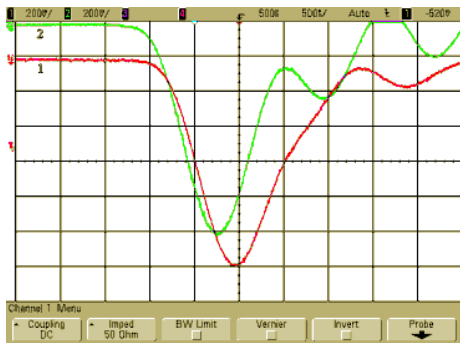
Помимо проведения испытаний ВЧ инжектора с пучком, эксперименты, проводимые на стенде с диагностическим оборудованием, помогут определить адекватность разработанной и принятой физико-математической модели, которая легла в основу проведенных расчетов, прогнозирующей поведение пучка и его динамические параметры в том числе и на этапе его транспортировки в канале диагностики.

Результаты испытаний

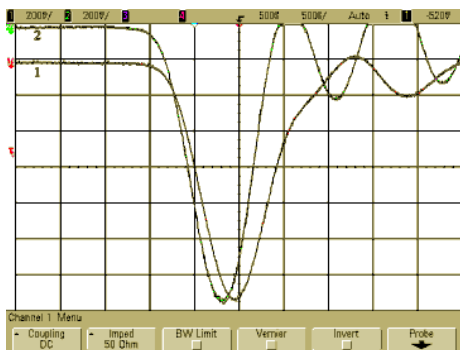
После оптимизации проведенных расчетов по транспортировке пучка в канале диагностики, были предложены рабочие параметры основных элементов канала диагностики, которые позволят без потерь транспортировать пучок к поглотителю электронов. Так величину индукции магнитного поля на оси первого соленоида необходимо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

Создав такую суперпозицию фокусирующего магнитного поля, удалось осуществить транспортировку пучка без потерь. При отходе от заданного режима работы, наблюдалось рассеивание тока на внутренней стенке канала.

В эксперименте с помощью двух пространственно-разделенных резистивных датчиков тока измерены энергии, длительность и пиковый ток сгустков.



а



б

Рис. 9. Изображение сигналов с датчиков для разных фаз эмиссии: (а) – 55° , (б) – 31° . Разрешение горизонтальной оси 0,5 нсек/клетку

Форма импульсов с датчиков тока меняется в зависимости от фазы эмиссии с сеточно-катодного узла. В случае, когда импульсы имеют одинаковую амплитуду (рис. 9а), это соответствует рабочей фазе 55° с максимумом ускорения. Когда же второй импульс выше и короче первого, это означает, что проявляется эффект продольной группировки сгустков, тогда фаза меньше рабочей (рис. 9б).

На представленных осциллограммах импульсов видно, что длительности импульсов составляют порядка 1 нс. Из амплитуды полученных импульсов и частоты посылы импульсов, был определен средний ток, который достигал 400 мкА. При увеличении тока пучка вакуум ухудшается, что делает опасным дальнейшее увеличение тока, т.к. катод ВЧ пушки очень чувствителен к вакууму [2]. Поэтому для проведения дальнейших работ по увеличению тока пучка ВЧ инжектора, необходимо произвести процедуру отжига канала диагностики пучка с целью его обезгаживания.

Заключение

Проведены численные расчеты динамики электронных сгустков ВЧ инжектора с учетом объемного заряда для энергий инъекции 100 кэВ. Показано, что параметры сгустков на выходе из канала инъекции согласуются с проектными требованиями. С помощью создания системы магнитной транспортировки можно обеспечить условия, при которых размеры пучка не превысят апертуру канала инъекции, тем самым исключается рассеивание пучка на первых этапах его транспортировки.

Для подтверждения возможности функционирования выбранной в результате расчетов системы магнитной транспортировки, был сконструирован и собран стенд с диагностическим оборудованием для испытания ВЧ пушки с пучком. 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:

- расчетная и измеренная длительность импульсов составляет около 1 нс;
- при разных фазах инъекции имеется различие в величине энергии сгустков (100 кэВ для 55° и 96,1 кэВ для 33°), что наблюдается в эксперименте;
- Средний ток в эксперименте получен в интервале (4–400) мкА, который регулируется в зависимости от частоты повторения импульсов в диапазоне (0,01–100) МГц, что предсказывается расчетами.

Следующим этапом в работе по данному направлению является расчет параметров электронного пучка после нескольких проходов в резонаторе ускорителя, что позволит уточнить режимы работы ВЧ инжектора.

Список литературы

1. Zavyalov N. V., Zhelezov S. A., Nazarenko S. T., Porkhaev V. V. et al. A CW electron accelerator. The planned design and electrophysical characteristics. // Problems of atomic science and technology. 2006. № 2 Series: Nuclear Physics Investigations (46). P. 8–10.
2. 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 RU-PAC. 2014. P. 309–311.

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

4. Pottier J. A new type of RF electron accelerator: the Rhodotron // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. 1989. Vol. B40/41. P. 943–945.

5. 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. 2015. Вып. 20. Ч. 1. С. 184–193.

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