

## СОСТОЯНИЕ РАБОТ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ РЕЗОНАНСНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ БЕТА-8

### STATUS OF DEVELOPMENT AND TESTING RESULTS OF RESONANCE ELECTRON ACCELERATOR BETA-8

*Л. Е. Поляков, Н. В. Завьялов, В. В. Кузнецов, Н. Н. Курапов, И. А. Машин, А. М. Опекунов,  
Г. П. Поспелов, С. М. Придчин, С. А. Путевской, М. Л. Сметанин, А. В. Тельнов,  
С. М. Тресков, А. Н. Шеин, И. В. Шориков*

*L. E. Polyakov, N. V. Zavyalov, V. V. Kuznetsov, N. N. Kurapov, I. A. Mashin, A. M. Opekunov,  
G. P. Pospelov, S. M. Pridchin, S. A. Putevskoj, M. L. Smetanin, A. V. Telnov,  
S. M. Treskov, A. N. Shein, I. V. Shorikov*

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

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

В рамках создания ускорителя изготовлены, испытаны и скомпонованы основные элементы установки. Разработана схема транспортировки пучка ускоренных электронов, позволяющая осуществить до пяти последовательных проходов ускоряющего резонатора и достигнуть энергии электронов от 1,5 до 7,5 МэВ.

Проведены исследования выходных параметров электронного пучка после одного прохода. Получен пучок электронов со средней энергией 1,5 МэВ, что подтверждает результаты проведенных расчетов.

Basic components of the accelerator BETA-8 are produced, tested and assembled. Accelerated electron beam transport scheme realizing up to five sequential passes through the accelerating cavity was developed. Interval of variable output electron energy is 1.5–7.5 MeV.

The measurement of the BETA-8 electron beam parameters was performed after one pass of accelerating cavity. Electron beam with the average energy of 1.5 MeV was extracted at the output of accelerator, that confirms the results of prior calculations.

#### Введение

Ускоритель электронов БЕТА-8 предназначен для проведения исследований в широком диапазоне энергии ускоренных электронов [1]. Он позволит обрабатывать технологические процессы с высокой мощностью и большими значениями поглощенной дозы электронного и тормозного излучений. В настоящее время ускоритель функционирует в макетном исполнении.

Основные параметры макета ускорителя [1]:

- перестраиваемая выходная энергия электронов – 1,5; 4,5; 7,5 МэВ;
- максимальная средняя мощность электронного пучка – 300 кВт;
- рабочая частота – 100 МГц;
- средний ток – до 40 мА;
- режимы работы – непрерывный и импульсно-периодический.

Принцип ускорения электронов основан на многократном прохождении электронного пучка через ускоряющие зазоры коаксиального полуволнового резонатора на уровне медианной плоскости, где полностью отсутствует магнитная компонента ВЧ поля (рис. 1) [2]. Максимальная энергия электронов достигается после пятикратного прохождения электронного пучка через ускоряющий резонатор.

Многократный проход электронов через ускоряющие зазоры резонатора осуществляется с помощью поворотных электромагнитов, расположенных снаружи корпуса резонатора (рис. 1, поз. D1–D4). С помощью электромагнитов D5–D7 ускоренный пучок с различными энергиями электронов транспортируется к выводному устройству.

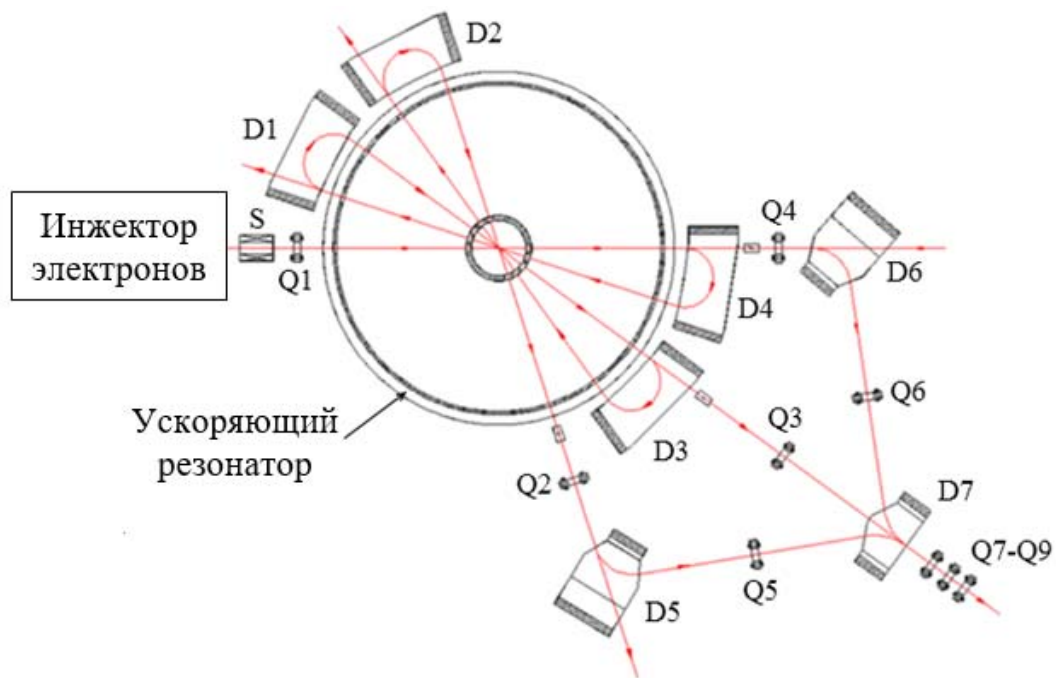


Рис. 1. Схема ускорения:  $\rightarrow$  — траектория движения пучка; D1–D7 — поворотные дипольные магниты; S — фокусирующий соленоид; Q1–Q9 — квадрупольные магнитные линзы

### Система ВЧ питания макета ускорителя БЕТА-8

Для достижения необходимой величины средней мощности пучка изготовлена система ВЧ питания, состоящая из трех типовых генераторных модулей и сумматора их ВЧ мощности [3].

Каждый генераторный модуль обеспечивает генерацию 1/3 части от общей выходной ВЧ мощности. Генераторный модуль является многокас-

кадным линейным усилителем ВЧ мощности. Система сложения ВЧ мощности осуществляет эффективное суммирование мощностей отдельных генераторных модулей в заданном диапазоне рабочих частот. Сумматор ВЧ мощности представляет собой плоскую двухпроводную *TEM* линию, имеющую элементы связи с генераторными модулями. На рис. 2 представлена схема сумматора мощности с тремя подключенными генераторными модулями.

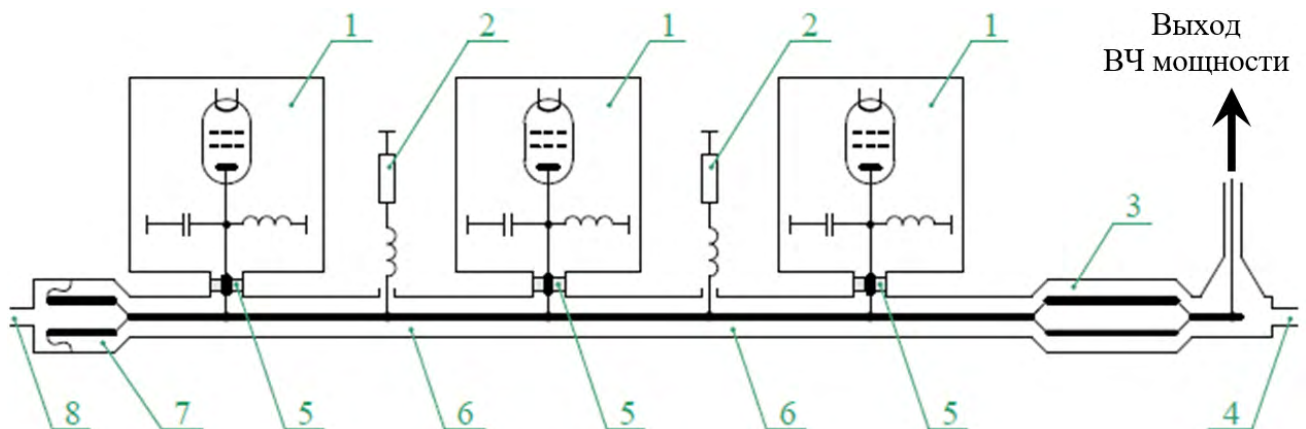


Рис. 2. Схема сумматора мощности: 1 — типовые генераторные модули; 2 — резисторы для подавления «паразитных» колебаний; 3 — трансформатор сопротивлений; 4 — воздушный коллектор; 5 — узлы связи линии сложения с генераторными модулями; 6 — отрезки воздушной *TEM* линии; 7 — узел подстройки частоты; 8 — воздухозаборник

### Система магнитной проводки электронного пучка макета ускорителя БЭТА-8

На основе результатов, полученных в ходе расчетных и экспериментальных исследований по магнитной транспортировке электронного пучка, разработана схема проводки [1], согласно которой для ускоренных пучков организуются три канала вывода, которые на оконечном участке сводятся в один (рис. 3).

Далее пучок выводится на общую систему вывода и формирования области облучения электронным или тормозным излучениями. Система магнитной проводки совместно в ускоряющем резонаторе представлена на рис. 4.

Таким образом, систему магнитной проводки можно условно разделить на часть, отвечающую за рециркуляцию ускоряемого электронного пучка, и часть, отвечающую за его транспортировку к месту проведения эксперимента.

При проводке пучка столь высокой мощности потери электронов даже на уровне единиц процентов представляют серьезную опасность. Элементы конструкции ускоряющего резонатора и вакуумных камер не рассчитаны на отвод избыточного тепла мощностью более 5 кВт на отдельных локальных участках. Ограничение потерь тока можно обеспечить, если параметры электронного пучка, такие как угловое отклонение и ширина энергетического спектра, перед каждым поворотом соответствуют заданным критериям.

Результаты расчетов показывают, что поперечный ненормализованный эмиттанс пучка не должен превышать 50 мм·мрад, а ширина спектра – не более 6 % от средней энергии. Обеспечивая заданную траекторию пучка и эти условия можно осуществлять пятикратное ускорение электронного пучка в резонаторе и вывод в область облучения.

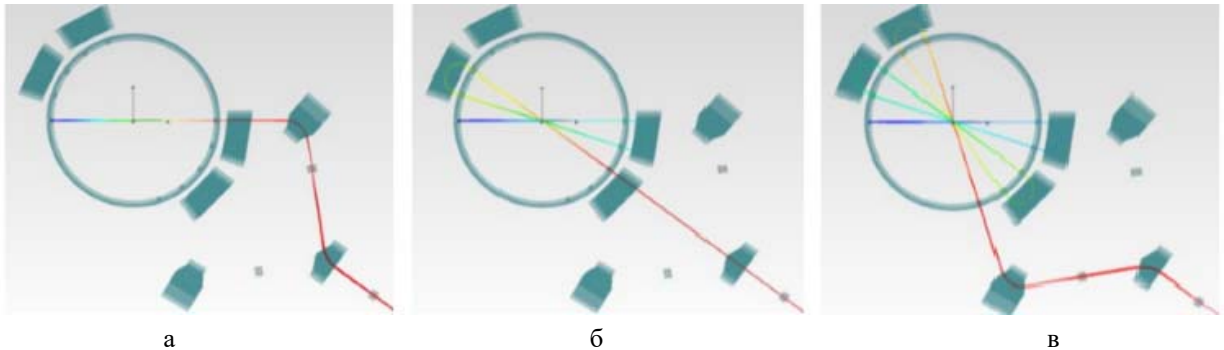


Рис. 3. Три варианта магнитной проводки пучка в зависимости от выходной энергии электронов: а – один проход, б – три прохода, в – пять проходов

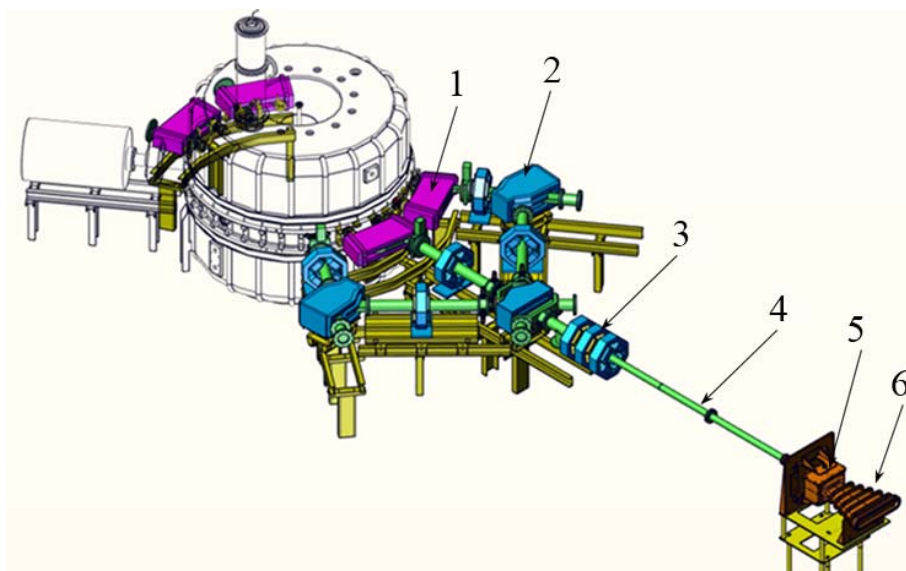


Рис. 4. Система магнитной проводки электронного пучка: 1 – магниты рециркуляции пучка; 2 – магниты транспортировки пучка; 3 – квадрупольные линзы; 4 – вакуумный тракт проводки пучка; 5 – сканирующий магнит; 6 – вакуумный раструб

## Описание макета ускорителя электронов БЕТА-8

В настоящее время изготовлен полномасштабный макет установки, позволяющий отработать основные физические принципы ускорения (до пяти проходов ускоряющего резонатора) при пониженной мощности пучка (до 10 кВт). Его внешний вид представлен на рис. 5.

Инжектором электронов (рис. 5, поз. 5) является сеточно-управляемая термокатодная электронная ВЧ пушка [4] на основе четвертьволнового коаксиального резонатора, работающего на частоте 100 МГц. Она создает короткие электронные сгустки длительностью 1,2 нс ( $43^\circ$  от периода ВЧ поля) на полувысоте с энергией электронов до 100 кэВ, средним током пучка до 40 мА (в непрерывном режиме) и регулируемой частотой посылки электронных сгустков 0,01 – 100 МГц.

Через канал инжекции (рис. 5, поз. 4), электронные сгустки попадают в ускоряющий коаксиальный резонатор (рис. 5, поз. 1) для последующего набора необходимой энергии. При средней мощности ВЧ питания равной 160 кВт в ускоряющем резонаторе возбуждаются электромагнитные колебания типа  $T_1$  с напряженностью электрического поля достаточной для приращения энергии электронов на 1,5 МэВ за один проход резонатора.

Один генераторный модуль из системы ВЧ питания выдает среднюю выходную мощность до 180 кВт, которая посредством коаксиального передающего фидера с волновым сопротивлением 50 Ом (рис. 5, поз. 8) и узла ввода мощности (рис. 5, поз. 2) подается в ускоряющий резонатор.

К резонатору подключена система вакуумирования, представляющая собой два идентичных вакуумных поста, подключенных к ускоряющему резонатору, с помощью которых в откачиваемых объемах ускорителя создается вакуум с остаточным давлением не хуже  $10^{-5}$  Па.

Установленная система водяного охлаждения и термостабилизации рассчитана на отвод от узлов макета ускорителя избытков тепловой мощности и поддержания заданной температуры с точностью  $\pm 1^\circ\text{C}$ .

Для дистанционного управления и контроля технологическими процессами установки разработана автоматизированная система управления и контроля на базе промышленного компьютера, обеспечивающая централизованное управление оборудованием и контроль параметров системы охлаждения, вакуумной системы и системы ВЧ питания.

Учитывая высокую среднюю мощность и сложность траектории электронного пучка (рис. 1), для минимизации потерь электронов на участках ускорения и дрейфа разработана и испытана система диагностики и корректировки положения электронного пучка [5, 6], способная отслеживать и корректировать траекторию электронных сгустков в режиме реального времени. В состав системы диагностики и корректировки входят монитор положения электронного пучка на основе емкостных датчиков и магнитный корректор положения электронного пучка, представляющий собой электромагнит с замкнутым магнитопроводом квадратной формы.

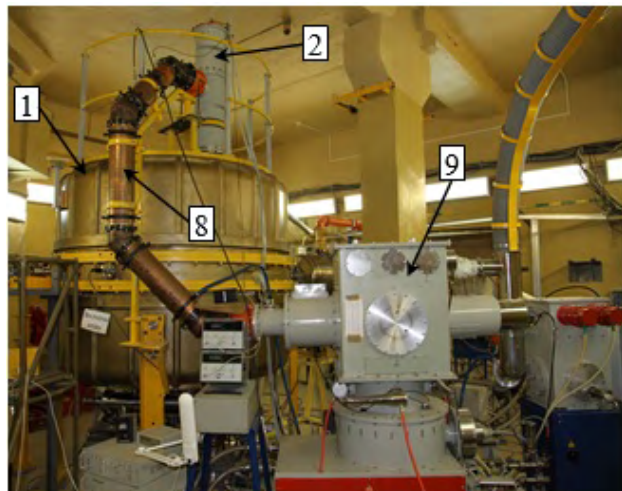
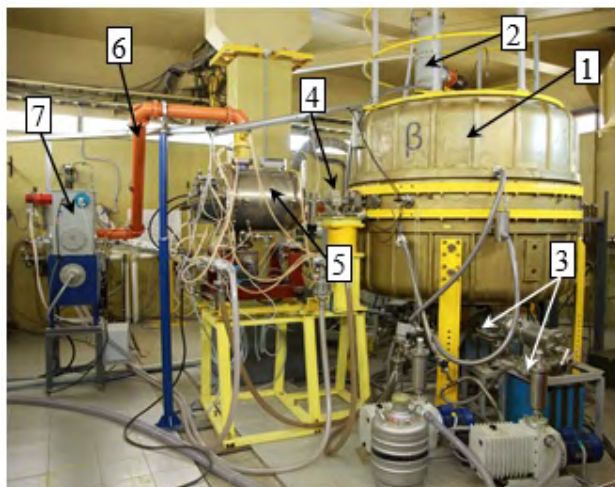


Рис. 5. Внешний вид макета ускорителя БЕТА-8: 1 – ускоряющий коаксиальный резонатор; 2 – узел ввода мощности; 3 – вакуумная система; 4 – канал инжекции электронного пучка; 5 – ВЧ инжектор электронов; 6 – фидер ВЧ инжектора; 7 – генератор ВЧ инжектора; 8 – фидер ускоряющего резонатора; 9 – генераторный модуль ВЧ мощности



## Экспериментальные результаты

Начальные исследования электронного пучка ускорителя БЕТА-8 после одного прохода проведены в импульсном режиме включения генераторного модуля на рабочей частоте  $\approx 100$  МГц с длительностью радиоимпульса 2 мс и периодом повторения импульсов 40 мс. После достижения импульсной ВЧ мощности 160 кВт, передаваемой в ускоряющий резонатор от ВЧ генератора, и установления ВЧ напряжения 100 кВ на катод-анодном зазоре в ВЧ инжекторе произведена генерация электронов с катодного узла с частотой посылки электронных сгустков 200 кГц.

Вывод электронов в атмосферу производился через выходное вакуум-атмосферное окно из титановой фольги толщиной 50 мкм. По цветной дозиметрической пленке, установленной на расстоянии 25 мм от выходного окна, определено наличие и профиль пучка ускоренных электронов. Также, с помощью дозиметрической пленки СО ПД(Ф)Р-5/50, установленной на расстоянии 25 мм от выводного окна, измерена поглощенная доза от электронного пучка, которая за 20 с составила 1,6 Мрад.

Регистрация распределения плотности ускоренных электронов в пучке произведена на сцинтилляционном экране на основе полистирола, установленном на расстоянии 25 мм от выходного окна. На экране получено изображение в видимом спектре. Для регистрации интегральной картины свечения экрана использовался интеллектуальный визуальный датчик (ИВД) [7] на основе цифровой видеокамеры. На рис. 6 представлено распределение яркости свечения пятна на сцинтилляционном экране при работе с ИВД, которое качественно

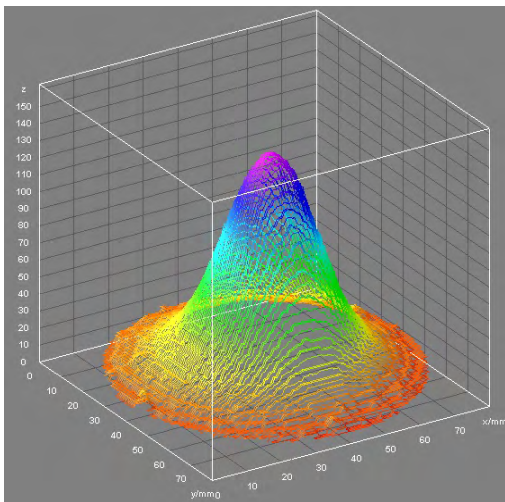


Рис. 6. Распределение яркости свечения пятна на сцинтилляционном экране

соответствует градиентной картине, полученной на пленке СО ПД(Э)-5/50.

С помощью метода поглощающих фильтров была измерена энергия ускоренных электронов. Использованный детектор энергии [8] представляет собой сборку из 23 изолированных между собой алюминиевых пластин толщиной 150 мкм с зазорами между ними 2 мм (рис. 7).

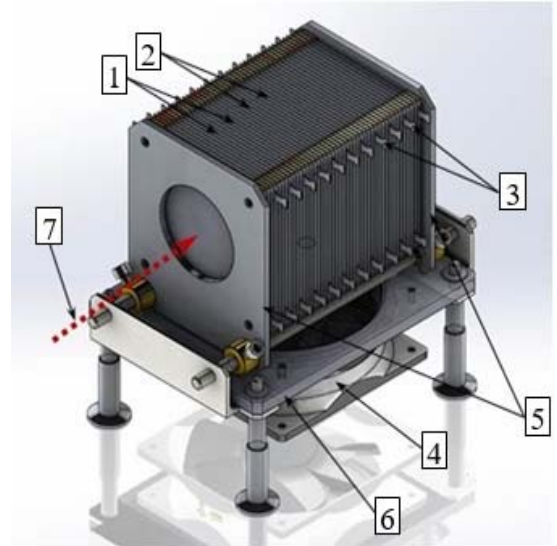


Рис. 7. Схематическое изображение измерительной сборки: 1 – алюминиевые пластины; 2 – изоляция между пластинами; 3 – выводы для измерения тока; 4 – вентилятор; 5 – стягивающие фланцы; 6 – несущий каркас; 7 – направление оси электронного пучка

Используя расчетные и экспериментальные распределения зарядов в пластинах измерительной сборки, был восстановлен энергетический спектр ускоренных электронов после одного прохода ускоряющего резонатора макета ускорителя. По восстановленному спектру определена средняя энергия ускоренных электронов, которая составила 1,52 МэВ. Энергетический разброс составил  $\pm 50$  кэВ.

## Заключение

На разработанном полномасштабном макете, при пониженной выходной мощности электронного пучка, могут быть отработаны ключевые физические принципы действия проектируемой установки. В рамках создания макета ускорителя осуществлена сборка ускоряющего резонатора. Выполнен монтаж системы вакуумирования и ее подключение к резонатору. При осуществлении вакуумирования во внутреннем объеме ускоряющего резонатора получено остаточное давление на

уровне  $1 \cdot 10^{-5}$  Па. В рабочих помещениях смонтированы элементы системы охлаждения, необходимые для запуска ВЧ генератора и термостабилизации корпуса резонатора. Произведены монтаж и пуско-наладочные работы генератора ВЧ мощности, тракта передачи ВЧ мощности и УВМ. Проведено испытание генератора, в режиме непрерывной генерации ВЧ мощности на согласованную нагрузку получено 170 кВт. Систему ВЧ питания можно успешно использовать для создания полномасштабного ускорителя БЕТА-8.

Описана разработка предлагаемой системы магнитной проводки электронного пучка в ускорителе БЕТА-8. Представлены рассчитанная схема магнитной проводки и входящие в нее дипольные электромагниты участка рециркуляции электронного пучка, дипольные магниты и квадрупольные линзы участка транспортировки электронного пучка. Также показаны расчетные траектории электронного пучка для каждой из рабочих энергий, полученные в результате трехмерного моделирования динамики электронов.

Произведен пуск ускорителя в макетном режиме с питанием от одного модуля ВЧ генератора. При подаваемой в ускоряющий резонатор ВЧ мощности равной 160 кВт в однопроходном режиме ускорения получен пучок электронов со средней энергией 1,5 МэВ и среднем токе 4 мкА. Его экспериментально измеренные характеристики подтверждают возможность получения основных проектных параметров электронного пучка полномасштабного ускорителя. Макет резонансного ускорителя электронов БЕТА-8 при соответствующем дооснащении может быть преобразован в действующий ускоритель с требуемыми выходными параметрами.

### Список литературы

1. 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.

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. Арбузов В. С. и др. ВЧ генератор для резонансного ускорителя электронов на основе коаксиального резонатора // Труды международной конференции «XII Харитоновские тематические научные чтения. Проблемы физики высоких плотностей энергии»: сборник докладов. 2010. С. 28–32.

4. Volkov V. N., Arbuзов 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.

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

6. 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.

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

8. Курапов Н. Н., Бодряшкин Я. В., Леонтьев В. Н. и др. Система оперативного контроля энергии электронного пучка ускорителей ЛУ-7-2 и ЛУ-10-20 // Труды международной конференции «XVIII Харитоновские тематические научные чтения. Проблемы физики высоких плотностей энергии»: сборник докладов. 2017. С. 222–228.