

УДК 621.384.64

DOI 10.53403/9785951505163_2021_26_1_318

Результаты работ по созданию ускорителя электронов непрерывного действия с высокой мощностью пучка

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

Представлено состояние дел по созданию в РФЯЦ-ВНИИЭФ резонансного ускорителя электронов непрерывного действия. Диапазон выходной энергии электронов – от 1,5 до 7,5 МэВ. Средняя мощность электронного пучка – до 300 кВт. Приведены технические характеристики основных узлов ускорителя: система ВЧ питания, ВЧ инжектор электронов, ускоряющая структура, магнито-оптическая система. Представлена схема ускорения электронов. Проведены эксперименты, в результате которых получен пучок электронов с энергиями 1,5 и 3 МэВ со средним током до 100 мкА. Характеристики электронного пучка, определенные в результате экспериментов, подтверждают принципы работы ускорителя, заложенные на этапе проектирования.

Введение

Ускоритель предназначен для обработки технологических процессов, требующих высокую мощность и большие значения поглощенной дозы электронного и тормозного излучений.

Основные проектные параметры установки [1]:

- выходная энергия электронов – 1,5; 4,5; 7,5 МэВ;
- максимальная средняя мощность электронного пучка 300 кВт;
- рабочая резонансная 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 7,5 МэВ достигается после пятикратного прохождения электронного пучка через ускоряющий резонатор.

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

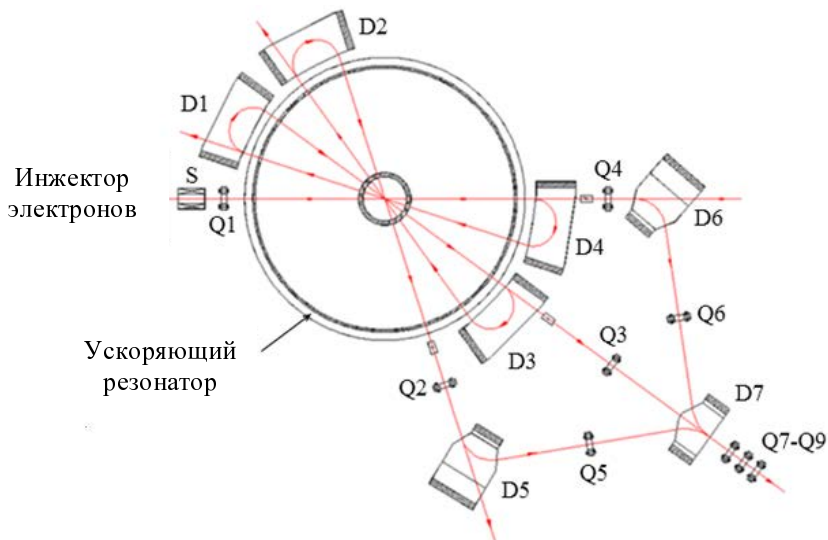


Рис. 1. Схема ускорения: \rightarrow – траектория движения пучка; D1 – D7 – поворотные дипольные магниты; S – фокусирующий соленоид; Q1 – Q9 – квадрупольные магнитные линзы

Составные системы ускорителя

Ускоряющий резонатор

Ускоряющий резонатор представляет собой короткозамкнутый коаксиальный волновод длиной $\lambda/2$ (рис. 2).

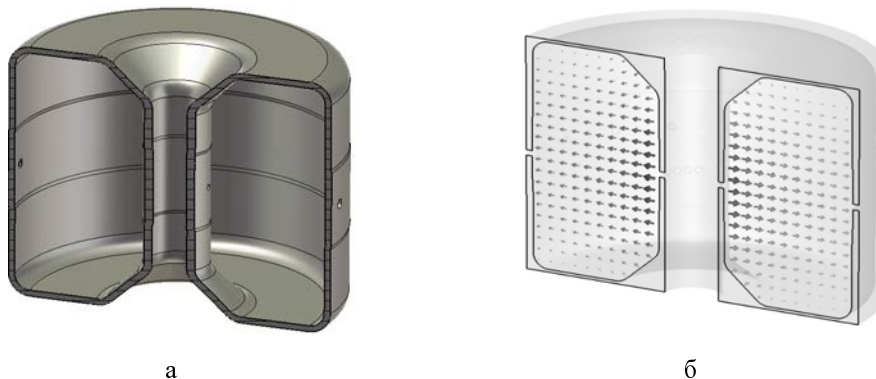


Рис. 2. Трехмерная модель резонатора (а) и характерное распределение напряженности электрического поля (б)

Система ВЧ питания

Для достижения величины средней мощности пучка в 300 кВт необходима система ВЧ питания 540 кВт. Такая система состоит из трех типовых генераторных модулей с выходной средней мощностью 180 кВт каждый и сумматора их ВЧ мощности [3].

ВЧ мощность поступает в ускоряющий резонатор по коаксиальному фидеру через узел ввода мощности. В резонаторе возбуждаются электромагнитные колебания типа T_1 с напряженностью электрического поля, достаточной для приращения энергии электронов на 1,5 МэВ за один проход резонатора.

Инжектор электронов

Инжектором электронов является сеточно-управляемая термокатодная электронная ВЧ пушка на основе четвертьволнового коаксиального резонатора (100 кэВ, 40 мА, 100 МГц) [4]. Через канал инжекции электронные сгустки попадают в ускоряющий коаксиальный резонатор для последующего набора необходимой энергии.

Технологические системы

К резонатору подключена система вакуумирования, обеспечивающая остаточное давление во внутренних объемах резонатора не хуже 10^{-5} Па.

Установленная система водяного охлаждения и термостабилизации рассчитана на отвод от узлов макета ускорителя избытков тепловой мощности до 400 кВт и поддержание заданной температуры с точностью ± 1 °С.

Для дистанционного управления и контроля технологическими процессами установки разработана автоматизированная система управления ускорителем.

Система магнитной проводки пучка

Систему магнитной проводки можно разделить на две части: рециркуляция пучка и транспортировка пучка (рис. 3).

При проводке пучка столь высокой мощности потери электронов даже на уровне единиц процентов представляют серьезную опасность. В связи с этим электронный пучок должен обладать следующими параметрами: эмиттанс – не более 50 мм мрад, энергетический разброс электронов в сгустке – не более 0,1 МэВ.

Средства контроля качества пучка

Учитывая высокую среднюю мощность (до 300 кВт) и сложность траектории электронного пучка (см. рис. 1), для минимизации потерь тока электронов на участках ускорения и дрейфа разработана и испытана система контроля. Такая система, состоящая из монитора положения пучка на основе емкостных датчиков и корректирующего электромагнита, позволяет определять и корректировать траекторию пучка в режиме реального времени.

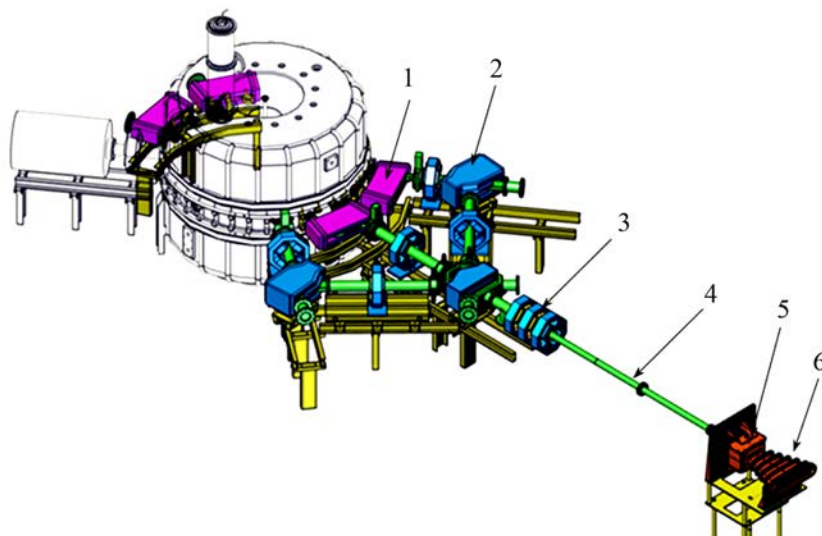


Рис. 3. Система магнитной проводки: 1 – магниты рециркуляции пучка; 2 – магниты транспортировки пучка; 3 – квадрупольные линзы; 4 – вакуумный тракт проводки пучка; 5 – сканирующий магнит; 6 – вакуумный растроб

Текущее состояние ускорителя

На рис. 4 представлено текущее исполнение установки, позволяющее отработать основные физические принципы ускорения (до пяти проходов ускоряющего резонатора) при пониженной мощности пучка (до 10 кВт).

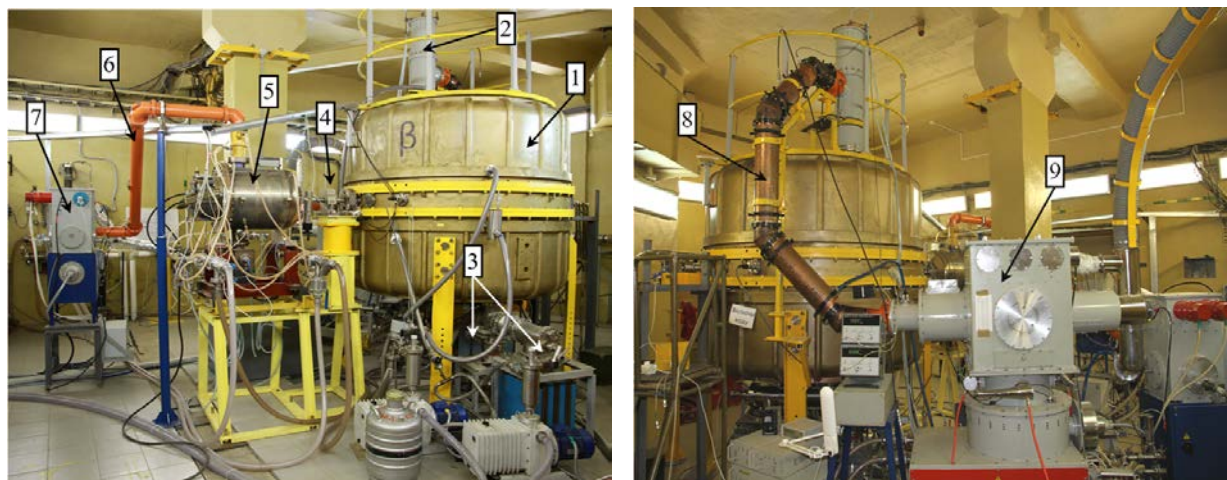


Рис. 4. Внешний вид ускорителя: 1 – ускоряющий коаксиальный резонатор; 2 – узел ввода мощности; 3 – вакуумная система; 4 – канал инжекции электронного пучка; 5 – ВЧ инжектор электронов; 6 – фидер ВЧ инжектора; 7 – генератор ВЧ инжектора; 8 – фидер ускоряющего резонатора; 9 – генераторный модуль ВЧ мощности

В таком исполнении ВЧ питание резонатора осуществляется от одного ВЧ генератора мощностью до 180 кВт.

Для достижения электронов с энергией 3 МэВ с внешней стороны ускоряющего резонатора размещен дипольный поворотный магнит, обеспечивающий разворот пучка обратно в ускоряющий резонатор и экранирующий пучок от воздействия тормозящей фазы поля.

Экспериментальные результаты

Начальные исследования электронного пучка на ускорителе после одного и двух проходов проведены в импульсном режиме включения генераторного модуля. За счет изменения частоты генерации электронных сгустков средний ток пучка варьировался от 10 до 100 мкА.

Для определения наличия пучка ускоренных электронов напротив соответствующего выводного устройства был установлен сцинтиляционный экран. Сцинтиллятор формировал изображение в видимом спектре, характеризующее распределение электронов в поперечном сечении пучка. Для регистрации интегральной картины свечения экрана использовалась цифровая видеокамера [5]. На рис. 5 представлены характерные изображения свечения сцинтиллятора.

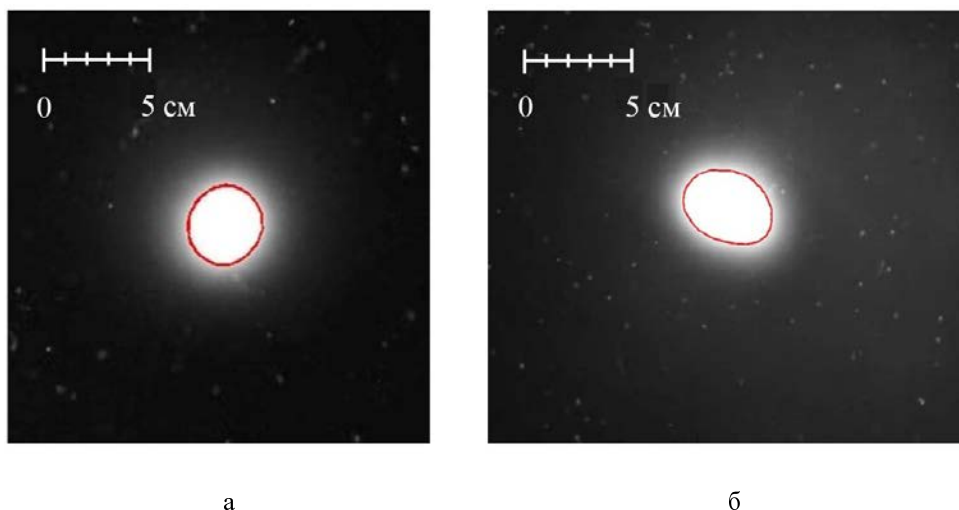


Рис. 5. Картина свечения сцинтиллятора: 1,5 МэВ (а) и 3 МэВ (б)

Методом поглощающих фильтров [6] была измерена энергия ускоренных электронов. С помощью расчетного и экспериментального распределений заряда в пластинах был восстановлен энергетический спектр ускоренных электронов (рис. 6).

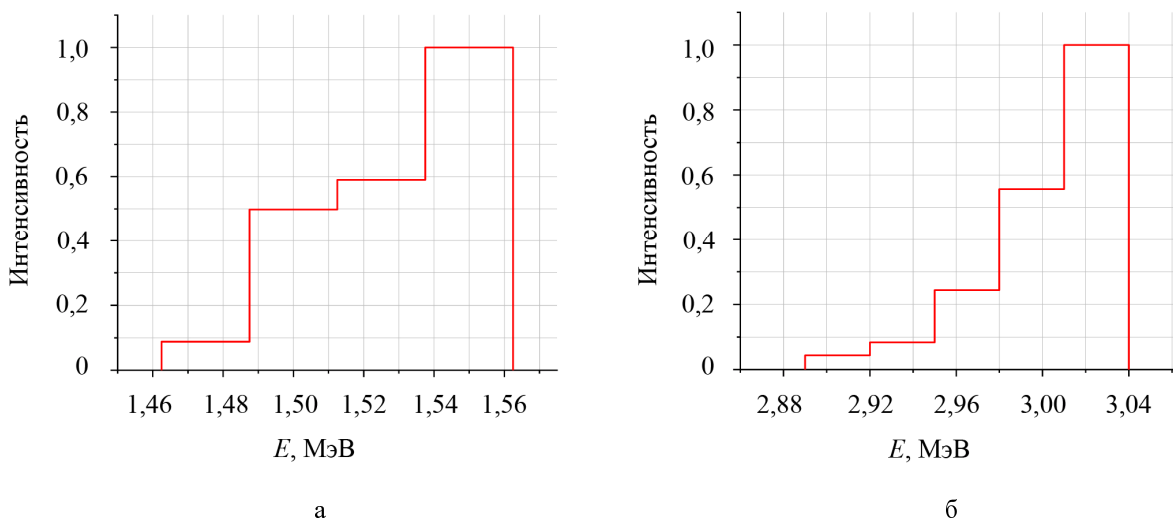


Рис. 6. Восстановленный энергетический спектр электронов после одного (а) и двух (б) проходов

В случае однократного режима работы ускорителя средняя энергия ускоренных электронов составила 1,52 МэВ. Энергетический разброс – не более 100 кэВ. В случае двухкратного режима – 3 МэВ с энергетическим разбросом – не более 200 кэВ.

Заключение

Представлено состояние работ по созданию резонансного ускорителя электронов, предназначенного для генерации пучка электронов с энергией до 7,5 МэВ и средней мощностью пучка до 300 кВт.

С целью отработки физических принципов ускорения на текущей конфигурации ускорителя произведены первые экспериментальные исследования характеристик электронного пучка при среднем токе пучка до 100 мкА.

В результате проведенных исследований показана возможность получения ускоренных электронов с энергией 1,5 и 3 МэВ на рассмотренном ускорителе. Расчетным способом определены критерии инжекции электронов в ускоряющий резонатор.

Экспериментально полученные характеристики пучка хорошо коррелируют с результатами расчетов и подтверждают возможность реализации пятикратного режима ускорения для достижения максимальной величины энергии электронов 7,5 МэВ.

Список литературы

1. Telnov A. V., Smetanin M. L., Opekunov A. M. Progress in CW Mode Electron Resonance Accelerator Development // Proc. of XXV Russian Particle Accelerator Conference «RUPAC'16». 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., Бирючевский Ю. А., Горникер Э. И. и др. ВЧ генератор для резонансного ускорителя электронов на основе коаксиального резонатора // Сб. тр. Межд. конф. «XII Харитоновские тематические научные чтения. Проблемы физики высоких плотностей энергии». 2010. С. 28–32.
4. Volkov V. N., Arbuzov V. S., Chernov K. N. et al. CW 100 keV Electron RF Injector for 40 mA Average Beam Current // Proc. of XXIV Russian Particle Accelerator Conference (RUPAC'14). 2014. P. 309–311.
5. Жуков И. В., Мочалов М. Р., Сорокин А. Л. Интеллектуальный визуальный датчик событий // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. Вып. 15. 2010. С. 506–513.
6. 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 // Сб. тр. Межд. конф. «XVIII Харитоновские тематические научные чтения. Проблемы физики высоких плотностей энергии». 2017. С. 222–228.

Status Report of Development of High Power Beam CW Electron Accelerator

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

The present paper describes the current status of CW resonance electron accelerator design at RFNC-VNIIEF. The range of output electron energy is from 1.5 MeV to 7.5 MeV. The average power of electron beam is up to 300 kW. Parameters of basic accelerator components (RF power supply system, RF injector, accelerating structure, beam transport system) are presented. The electron acceleration scheme is displayed in this paper. First experiments were carried out. As a result, 1.5 and 3 MeV electron beams were obtained. The average beam current is up to 100 μ A. Derived beam characteristics confirm physical principles of designed accelerator.