

МОЩНЫЙ ЛИНЕЙНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ ЭЛЕКТРОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ ДО 40 МэВ

Н.И. Айзацкий, В.И. Белоглазов, Е.З. Биллер, В.Н. Борискин, А.Н. Довбня, Р.Н. Дронов, В.Ф. Жигло, А.В. Ивахненко, А.И. Косой, В.А. Кушнир, В.А. Мац, В.В. Митроченко, В.А. Момот, Л.К. Мякушко, Т.Ф. Никитина, А.Н. Опанасенко, С.А. Пережогин, В.А. Попенко, О.А. Репихов, Л.В. Репринцев, Д.Л. Степин, В.И. Татанов, Г.Е. Тарасов, Ю.Д. Тур

Национальный Научный Центр "Харьковский физико-технический институт"

Харьков, Украина

E-mail: mitvic@kipt.kharkov.ua

Дано описание линейного ускорителя электронов десятисантиметрового диапазона, предназначенного для проведения работ в области радиационного материаловедения и производства изотопов медицинского назначения. Ускоритель создан на базе существующего ускорителя электронов с энергией 20 МэВ. Приведены результаты численного моделирования процессов формирования и ускорения электронных сгустков. Представлены результаты экспериментального исследования временных и пространственных характеристик пучка на выходе ускорителя. При импульсном токе пучка 0.5 А энергия в центре энергетического распределения составляет 40 МэВ, а поперечный эмиттанс пучка не превышает 2.5 мм-мрад.

1. ВВЕДЕНИЕ

В последнее время возрождается интерес ученых, работающих в различных областях науки и техники, к проведению экспериментов с использованием пучков электронов с энергией до 40 МэВ. Такие пучки могут применяться в ядерной физике для изучения вопросов трансмутации продуктов ядерной энергетики [1], в области радиационного материаловедения [2] и в ядерной медицине для разработки методов производства некоторых радиоизотопов [3]. При проведении исследований трансмутации, ресурсных испытаний материалов ядерных реакторов или при исследовании методов производства медицинских радиоизотопов необходимо обеспечить значительный средний ток ускоренных частиц. В связи с тем, что линейные ускорители электронов, которые эксплуатируются в ННЦ ХФТИ [4], не могут обеспечить достаточную мощность и нужный средний ток пучка при энергии частиц выше 30 МэВ, было принято решение реконструировать ускоритель КУТ-20 [4]. Ниже приведены результаты численного моделирования процессов формирования и ускорения электронных сгустков, представлены результаты экспериментального исследования временных и пространственных характеристик пучка на выходе ускорителя.

2. СТРУКТУРА УСКОРИТЕЛЯ

Созданный ускоритель КУТ-30 включает в себя ускоряющую систему и системы, обеспечивающие работоспособность и управление установкой. Ускоряющая система (см. Рис.1) состоит из инжектора, трех ускоряющих секций и системы транспортировки пучка. Инжектор ускорителя включает в себя низковольтный (25 кВ) диодный источник электронов, однорезонаторный группирователь и ускоряющий резонатор [5]. Система высоковольтного питания состоит из модулятора источника электронов

(25 кВ) и трех высоковольтных импульсных модуляторов клистронных усилителей. Система высокочастотного питания базируется на использовании трех усилительных клистронов КИУ-12АМ и состоит из задающего генератора, системы волноводных трактов и элементов диагностики параметров СВЧ-сигналов. В качестве задающего генератора используется клистронный автогенератор, обеспечивающий СВЧ-питание первой секции. Для уменьшения времени установления колебаний этого автогенератора используется дополнительный маломощный автогенератор [6]. Система обеспечивает подачу и регулировку необходимого уровня СВЧ-мощности в резонаторы инжектора и ускоряющие секции, а также выбор нужных фазовых соотношений между СВЧ-сигналами.

Рис.1. Ускоряющая система ускорителя

Охлаждение и термостатирование элементов ускорителя обеспечивает система охлаждения. При этом температура высокочастотных элементов инжектора и ускоряющих секций регулируется и стабилизируется с точностью $\pm 0.5^\circ\text{C}$. Система термостатирования построена на основе микропроцессорного комплекса АДАМ5511 [7].

Система измерения параметров ускорителя обеспечивает получение информации о режиме работы всех систем ускорителя и о параметрах ускоренного пучка. Часть из этих параметров, в частности, ток и положение центра тяжести пучка измеряются непрерывно в ходе работы ускорителя в рабочем режиме. Измерение других параметров – энергии и энергетического спектра электронов, эмиттанса пучка производится при пониженной частоте следования импульсов тока пучка. Система измерения базируется на ЭВМ, оснащенной двухканальным аналого-цифровым преобразователем с частотой дискретизации

до 20 МГц. Аналоговый коммутатор позволяет подключать к преобразователю два из 32 импульсных сигналов.

Для измерения энергетических характеристик пучка используется 90° дипольный магнит. В качестве анализирующего элемента используется щелевой коллиматор и цилиндр Фарадея. Разрешающая способность устройства по энергии составляет 1%. Сигнал с цилиндра Фарадея через ступенчатый аттенюатор подается на коммутатор, что позволяет проводить времязависимые измерения энергии частиц.

Для измерения пространственных характеристик пучка применялся проволоочный профилометр, установленный в воздухе, непосредственно за выходным устройством.

Система транспортировки пучка, обеспечивающая минимальные потери частиц в процессе формирования электронных сгустков и их ускорения в ускоряющих секциях, состоит из трех фокусирующих линз в инжекционной части, коротких соленоидов и протяженных корректоров положения пучка на каждой секции. Между выходом третьей секции и устройством для вывода пучка в атмосферу установлен дублет квадрупольных линз.

Контроль и управление всеми системами ускорителя осуществляется с помощью компьютеризированной системы управления.

3. РАСЧЕТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПУЧКА

Для исследования самосогласованной динамики интенсивного пучка электронов в резонаторах и неоднородных ускоряющих волноводах с учетом переходных процессов использовался развитый нами численный подход [8,9], который основан на нестационарной теории возбуждения резонаторов и волноводов пучком заряженных частиц и источниками СВЧ-питания [10]. Теория возбуждения волноводов обобщена и распространена на случай пространственно-неоднородных ускоряющих структур на бегущей волне. Для расчета собственных полей и электродинамических характеристик осесимметричных резонансных структур использовался пакет программ SUPERFISH [11]. Движение заряженных частиц на каждом временном шаге интегрирования моделировалось с помощью программы PARMELA [12]. Электронный пучок формируется термоэлектронной пушкой, которая моделировалась с помощью программы EGUN [13].

Моделирование динамики частиц проводилось при мощности СВЧ-питания каждой секции 12 МВт. Основной целью расчетов являлось достижение на выходе третьей секции минимального энергетического разброса полного импульса тока пучка при максимальной энергии в максимуме энергетического спектра. Энергетический разброс пучка обусловлен как конечной протяженностью сгустков в стационарном режиме ускорения, так и переходными процессами, связанными с формой импульсов тока пучка и СВЧ-питания, а также временами заполнения СВЧ-полем резонансных структур. Минимизация энергетического разброса пучка в стационарном режиме обеспечивается фазированием секций, то есть

подбором сдвига фаз между сигналами СВЧ-питания инжектора и ускоряющих секций. Уменьшение вклада переходных процессов в энергетический разброс достигается путем выбора оптимальной задержки импульса тока относительно СВЧ-импульса.

Поскольку в первой ускоряющей секции еще продолжается продольное группирование сгустков, для достижения минимального энергетического разброса на выходе ускорителя следует фазировать секцию так, чтобы получить минимальную фазовую ширину сгустка. Релятивистские энергии электронов пучка после первой секции (13.3 МэВ в максимуме спектра при разбросе $\Delta W/W=4\%$ для 70% частиц пучка) делают невозможным их существенное фазовое движение при последующем ускорении в поле бегущей волны с фазовой скоростью, равной скорости света. Потому настройка второй и третьей секций проводилась по минимуму энергетического разброса пучка.

На выходе второй секции энергия частиц достигает 27 МэВ в максимуме спектра при энергетическом разбросе $\Delta W/W=2.5\%$ для 70% частиц пучка. Причем, энергетический разброс установившегося участка импульса тока не превышает $\Delta W/W=1\%$. Следует заметить также, что значительно уменьшился диаметр, включающий 70% частиц пучка, от 6 мм на выходе первой секции до 1 мм на выходе второй секции.

Параметры пучка на выходе третьей секции приведены в табл. 1. В скобках указано значение параметров в установившемся режиме.

Таблица 1

Энергия, МэВ	40.4
Ток, А	0.52
Среднеквадратический нормализованный эмиттанс, мм·мрад	78
Диаметр 70% пучка, мм	2.9
Фазовая протяженность для 70% частиц, град.	(<6.8)
Энергетический разброс для 70% частиц, %	2.5 (1.4)

Размер пучка на выходе третьей секции больше, чем на выходе второй. Таким образом, в районе второй секции есть кроссовер пучка, что нужно учитывать при транспортировке частиц на выход ускорителя. Энергетические характеристики пучка на выходе третьей секции при оптимальной настройке ускорителя представлены на Рис.2,3.

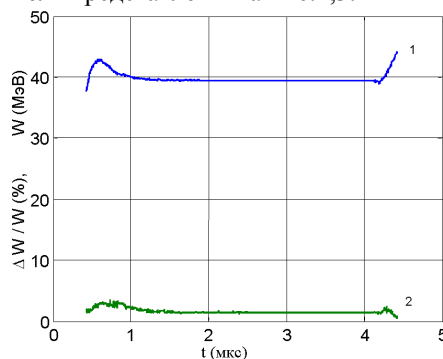


Рис.2. Энергия (1) и ширина энергетического спектра (2) в течение импульса

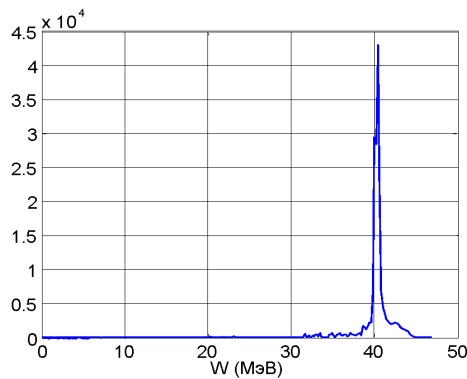


Рис.3. Энергетический спектр

Проведенное моделирование динамики электронного пучка в модернизированном ускорителе показывает, что при импульсном токе ускоренного пучка 0.5 А выбранная схема обеспечит энергию частиц 40 МэВ.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

После проведения наладки всех систем ускорителя были проведены измерения зависимости энергии частиц от импульсного тока пучка при различных уровнях вводимой в секции мощности $P_{вх}$. Данные измерений при $P_{вх}=10$ МВт приведены на Рис.4. Видно, что в результате реконструкции существенно увеличена энергия частиц и полученные экспериментальные результаты согласуются с данными численного моделирования.

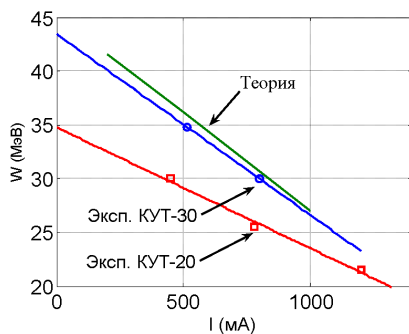


Рис.4. Зависимость энергии электронов от импульсного тока пучка при $P_{вх} = 10$ МВт

Известно, что значение энергии электронов и энергетический спектр зависят от многих параметров, в первую очередь, от частоты, мощности и фазы сигнала СВЧ-питания каждой из секций и резонаторов инжектора, температуры секций, временных задержек СВЧ-импульсов и импульса тока пучка. Поэтому, значительное внимание нами уделялось экспериментальному определению области изменения этих параметров, в которой достигаются требуемые энергетические характеристики пучка. Одной из особенностей ускорителя является используемая схема задающего генератора – автогенератор на основе клистрона, питающего первую ускоряющую секцию. Это дает возможность легко перестраивать среднюю частоту в пределах ± 500 кГц. С целью изучения влияния рабочей частоты ускорителя на энергию частиц на его выходе мы провели соответствующие измерения при уровне вводимой в

каждую из секций мощности 12 МВт и неизменной температуре ускоряющих секций (см. Рис.5). Энергетический спектр пучка при максимальном наборе энергии показан на Рис.6. Ширина спектра на полувысоте для этого случая составила 2.7%. Как следует из полученных данных, непрерывный контроль за значением рабочей частоты и поддержание ее стабильности является очень важной задачей.

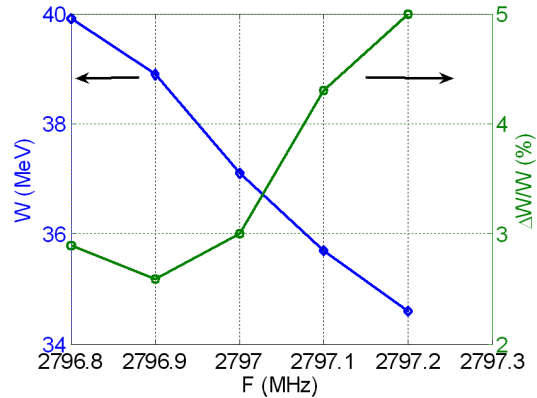


Рис.5. Энергия и ширина энергетического спектра от рабочей частоты ускорителя

070707[5].txt, t = 4.1 through 7.6 ns, $W_s / W = 2.7155$ (% FWHM)

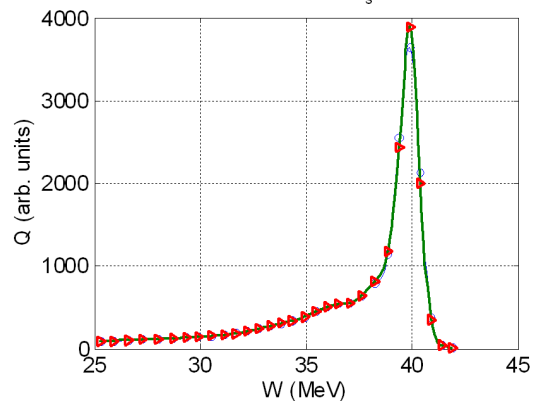


Рис.6. Энергетический спектр пучка при максимальном наборе энергии

Другой проблемой, связанной с работой клистрона первой ускоряющей секции в режиме автогенератора является внутриимпульсная девиация частоты, вызванная неидеальностью высоковольтного импульса модулятора клистрона и переходными процессами. Эксперименты показали, что эта девиация влияет на внутриимпульсное изменение энергии частиц. Измерения осуществлялись при постоянных параметрах пучка на выходе первой секции и при токе пучка 0.5 А. Мощность СВЧ-питания секций равнялась 10 МВт. Анализ полученных данных показал, что энергия частиц в течение основной части токового импульса может как увеличиваться, так и уменьшаться. Изменение зависит от фазовых соотношений между СВЧ-сигналами питания второй и третьей ускоряющих секций. Путем анализа зависимости энергии частиц во времени в течение импульса были найдены фазы второй и третьей секций, при которых минимизируется внутриимпульсное изменение энергии частиц при умеренном (около 3%) уменьшении прироста энергии. Контурный график

энергетического спектра приведен на Рис.7. Ширина спектра на полувысоте в этом случае составила 1.9%. Учитывая величину токовой нагрузки для этого случая (9 МэВ или 40% энергии частиц), такая ширина спектра является хорошим результатом. Проведенные исследования позволили также получить зависимости энергии и ширины энергетического спектра частиц от соотношения фаз СВЧ-питания второй и третьей секций.

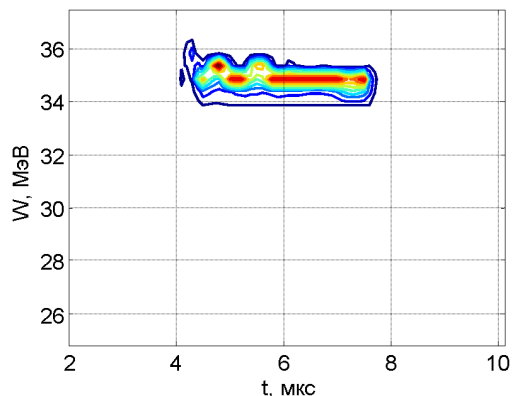


Рис.7. Спектр от времени в течение импульса тока

Эти данные позволяют упростить процесс настройки ускорителя на заданную энергию ускоренных частиц. Кроме того, варьируя мощность и фазы сигналов СВЧ-питания секций, можно изменять энергию частиц и форму энергетического спектра. Так, например, можно получить спектр с резким спадом распределения в области высоких энергий, либо близкое к симметричному распределение частиц по энергиям.

Измерение эмиттанса ускоренного пучка и определение факторов, влияющих на его величину, является важной задачей с точки зрения уменьшения потерь частиц и формирования необходимых размеров пучка на выходе ускорителя. В ходе измерений нами использовался хорошо известный (см., например, [14]) "quadruple scan"-метод. Измеряя зависимость размера пучка после некоторого дрейфового промежутка за квадрупольной линзой от ее силы, можно определить поперечный эмиттанс пучка в месте расположения квадруполя. Для этой цели мы использовали один из квадруполей дублета, установленного на выходе третьей секции и упомянутый выше проволочный профилометр. Измеренная зависимость представлена на Рис.8. Обработка полученных данных дала значение геометрического эмиттанса 2.5 п-мм-мрад. При этом нормализованный эмиттанс составил 173 п-мм-мрад.

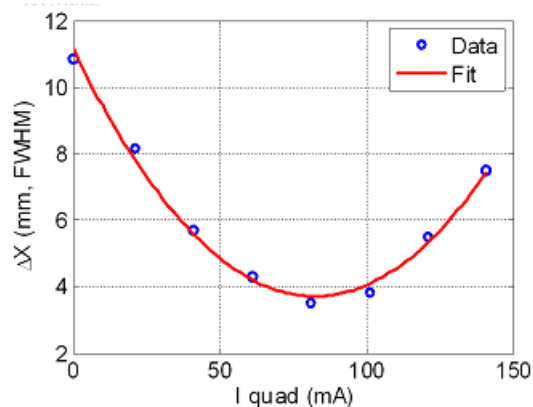


Рис.8. Зависимость ширины профиля от тока квадруполя

Анализ изменения профиля пучка во времени показал, что существует внутриимпульсное смещение оси пучка. Наиболее сильное смещение оси имеет место в начальной части импульса, что свидетельствует о влиянии переходных процессов в задающем автогенераторе, инжекторе и ускоряющих секциях на пространственные характеристики пучка. Природа этих процессов и механизмы их воздействия на параметры пучка требуют более детального исследования, что будет проведено в дальнейшем.

Параметры пучка, достигнутые в процессе исследования реконструированного ускорителя, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Энергия, МэВ	27...40
Ширина энергетического спектра на полувысоте, %	2...12
Нормализованный эмиттанс, п-мм-мрад	173
Длительность импульса тока, мкс	3.5
Размер пучка на полувысоте профиля (на выходной фольге), мм	До 4
Частота повторения импульсов тока, Гц	150
Средний ток пучка, мА	0.22
Средняя мощность пучка, кВт	До 8
Поток электронов, 1/s	$1.3 \cdot 10^{15}$

ВЫВОДЫ

Проведенная модернизация линейного ускорителя электронов позволила существенно увеличить энергию частиц. Измеренные параметры пучка хорошо совпадают с расчетными значениями. Разработанная система для исследования внутриимпульсного изменения параметров и характеристик пучка позволяет оптимизировать настройку ускорителя.

Таким образом, в результате модернизации создана электрофизическая установка, которая позволяет проводить широкий спектр исследований, как в области радиационного материаловедения, так и в области применения фотоядерных реакций.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке партнерского проекта УНТЦ №P228.

ЛИТЕРАТУРА

1. N.P. Dikiy, A.N. Dovbnya, Yu.V. Lyashko, V.L. Uvarov. Research of Transmutation of Products of Nuclear Cycle at the Electron Accelerator // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерно-физические исследования»* (42). 2004. №1, с.203-205.
2. В.В. Ганн, А.Н. Довбня, В.И. Дубинко, и др. Применение линейных ускорителей электронов в радиационной физике твердого тела и радиационных технологиях // *Вопросы атомной науки и техники. Сер. «Ядерно-физические исследования»*. 1997, вып.4, т.II, с.157-160.
3. N.P. Dikiy, A.N. Dovbnya, V.L. Uvarov. Fundamentals of Technological Cycle Technetium-99m Production at Electron Accelerator // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерно-физические исследования»*, 2004, №1, с.168-171.
4. V.A. Kushnir, K.I. Antipov, M.I. Ayzatsky, et al. *The NSC KIPT Electron Linacs - R&D and Application* // *APAC'01 Proc.*, 2001, Beijing, China, p.150-152.
5. M.I. Ayzatsky, E.Z. Biller, V.N. Boriskin, et al. High Power Electron S-band Linac for Industrial Purposes // *Proc. of the 2003 Particle Accelerator Conference*, Portland, Oregon, USA. 2003, p.2778-2780.
6. В.И.Белоглазов, В.А. Вишняков, И.А. Гришаев и др. Использование клистронного автогенератора на двухсекционном ускорителе // *Вопросы атомной науки и техники. Сер. «Линейные ускорители»*. 1976, вып.1(2) с.18-19.
7. V.N. Boriskin, N.V. Demidov, A.V. Ivahnenko et al. Temperature control system of two section electron linac-40. *Problems of Atomic Science and Technology. Series: «Nuclear Physics Investigations»* (47). 2006, №3, p.90-91.
8. V.A. Kushnir, V.V. Mytrochenko, A.N. Opanasenko. Simulations of Transient Phenomena in Thermionic RF Guns. // *Proc. of 2002 European Particle Accelerator Conference*. (France, Paris, June 5-12) p.1649-165.
9. V.V. Mytrochenko, A.N. Opanasenko. Simulation Technique for Study of Transient Self-consistent Beam Dynamics in RF Linacs // *Proc. of the ninth European Particle Accelerator Conference*, Lucerne, Switzerland, 5 to 9 July 2004, p.2762-2764.
10. Л.А. Вайнштейн, В.А. Солнцев. *Лекции по сверхвысококачественной электронике*. М.: «Сов. Радио» 1973, с.400.
11. J.H. Billen and L.M. Young. *Poisson Superfish* – Los Alamos: 1996. 43 с. (препринт / Los Alamos National Laboratory, LA-UR-96-1834).
12. Young L.M. *PARMELA*. Los Alamos: 1996. 93 с. (препринт / Los Alamos National Laboratory, LA-UR-96-1835).
13. W.B. Herrmannsfeldt. *Developments in the Electron Gun Simulation Program, EGUN*, –Stanford: 1994. 12 с. (препринт / Stanford Linear Accelerator Center, SLAC-PUB-6726).
14. P. Strehl. Beam diagnostic // *Rev. Sci. Instrum.* 1992. 63(4). p.2652-2659.

HIGH-POWER 40 MeV ELECTRON LINAC

N.I. Ayzatsky, V.I. Beloglazov, E.Z. Biller, V.N. Boriskin, A.N. Dovbnya, R.N. Dronov, V.F. Zhiglo, A.V. Ivahnenko, A.I. Kosoy, V.A. Kushnir, V.A. Mats, V.V. Mytrochenko, V.A. Momot, L.K. Myakushko, T.F. Nikitina, A.N. Opanasenko, S.A. Perezhogin, V.A. Popenko, O.A. Repikhov, L.V. Reprintsev, D.L. Stepin, V.I. Tatanov, G.E. Tarasov, Yu.D. Tur

Description of the S-band linac, intended for conducting experimental researches in materials science and medical radionuclide production are given. The results of computer simulation of electron bunch forming and acceleration are presented. We discuss the results of experimental study of temporal and spatial beam characteristics on the linac output. At the beam pulse current of 0.5 A, the electron energy is 40 MeV, and transversal emittance is not exceeded 2.5 mm·mrad.

ПОТУЖНИЙ ЛІНІЙНИЙ ПРИСКОРЮВАЧ ЕЛЕКТРОНІВ З ЕНЕРГІЄЮ ДО 40 МэВ

М.І. Айзацкий, В.І. Белоглазов, Є.З. Біллер, В.М. Боріскін, А.М. Довбня, Р.М. Дронов, В.Ф. Жигло, О.В. Івахненко, О.І. Косой, В.А. Кушнір, В.О. Мац, В.В. Митроченко, В.О. Момот, Л.К. М'якушко, Т.Ф. Нікітіна, А.М. Опанасенко, С.О. Пережогін, В.О. Попенко, О.О. Репіхов, Л.В. Репринцев, Д.Л. Стєпін, В.І. Татанов, Г.Е. Тарасов, Ю.Д. Тур

Дано опис лінійного прискорювача електронів десятисантиметрового діапазону, призначеного для проведення робіт в області радіаційного матеріалознавства і виробництва ізотопів медичного призначення. Наведено результати чисельного моделювання процесів формування і прискорення електронних згустків. Представлено результати експериментального дослідження часових і просторових характеристик пучка на виході прискорювача. При імпульсному струмі пучка 0,5 А енергія електронів є 40 МэВ, а поперечний емітанс пучка не перевищує 2.5 мм·мрад.