

ПРОЕКТ РЕКОНСТРУКЦИИ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ АРГОНСКОЙ НАЦИОНАЛЬНОЙ ЛАБОРАТОРИИ

Н.И. Айзацкий¹, П.И. Гладких¹, А.Ю. Зелинский¹, Д. Ист², В.А. Кушнир¹, В.В. Митроченко¹, А.Н. Опанасенко¹

¹*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», Харьков, Украина*

²*Аргонская Национальная лаборатория, Чикаго, Иллинойс, США*

E-mail: mitvic@kipt.kharkov.ua

Обсуждается проект реконструкции линейного ускорителя электронов дециметрового диапазона с энергией частиц 20 МэВ Аргонской Национальной лаборатории с целью увеличения энергии электронов. Показано, что предложенная схема модернизации ускорителя на основе рециркуляции пучка обеспечит на его выходе электронный пучок с импульсным током 0.5 А и энергией частиц 45 МэВ.

1. ВВЕДЕНИЕ

Около 30 лет назад в химическом отделе Аргонской национальной лаборатории был создан линейный ускоритель электронов дециметрового диапазона с энергией частиц 20 МэВ для проведения исследований в области импульсного радиолиза [1]. Ускоритель состоит из инжектора и двух коротких ускоряющих секций. В инжекторе используется сильноточная трехэлектродная электронная пушка с током до 45 А и энергией до 135 кэВ, система субгармонических предгруппирователей, предгруппирователь на основной частоте и основной группирователь. Ускоритель может работать как в одногустковом, так и в многугустковом режиме с длительностью импульса тока до 5 мкс. Система СВЧ-питания на основной частоте состоит из двух клистронов с мощностью 16 МВт и регулируемого направленного ответвителя (ответвляемая мощность до 3,5 МВт) для питания предгруппирователя и группирователя. Ускоритель обеспечивает в одногустковом режиме энергию 22 и 15 МэВ в длинноимпульсном режиме при импульсном токе пучка 2 А.

В настоящее время рассматривается возможность реконструкции этого ускорителя с целью увеличения энергии частиц более 40 МэВ при импульсной мощности пучка не менее 20 МВт. Достичь таких параметров пучка при существующей структуре ускорителя невозможно. В АНЛ есть в наличии еще одна секция, аналогичная установленным на ускорителе, однако ее установка не позволит достичь требуемой энергии.

Данная работа посвящена рассмотрению возможных путей решения поставленной задачи. Наиболее детально изучены схемы с рециркуляцией пучка.

Одной из существенных проблем, которая осложняет решение поставленной задачи, является то, что создаваемая машина должна работать в импульсном режиме с достаточно короткой длительностью импульса тока (около 5 мкс) и сравнительно высоким импульсным током ($\geq 0,5$ А). В связи с этим понадобилась разработка методик, которые бы позволили моделировать влияние переходных процессов, вызванных эффектом нагрузки током, на параметры пучка. При таких больших импульсных токах

пучка возможность развития поперечной неустойчивости пучка является определяющим фактором при выборе структуры ускорителя. Поэтому необходимо было разработать соответствующие средства для моделирования развития этой неустойчивости.

Моделирование динамики пучка выполнялось с использованием двух разных подходов. Один из них основан на математической модели, которая представляет диафрагмированный волновод как цепочку связанных резонаторов (ЦСР). Движение частиц моделируется в самосогласованном поле как в основной полосе, так и в полосе дипольной моды с учетом влияния входного и выходного трансформаторов типа волн [2]. Для моделирования динамики частиц в рециркуляторе модель была дополнена блоком рециркуляции пучка.

Второй подход к моделированию самосогласованной динамики частиц в ускорителях, состоящих из резонаторов на стоячей волне и ускоряющих секций на бегущей волне, базировался на методике [3]. Методика рассматривает только процессы, имеющие узкий частный спектр, вблизи рабочей частоты ускорителя. Пакет программ SUPERFISH [4] и методика [5] используются для вычисления параметров аксиально-симметричных резонансных структур. Для моделирования динамики частиц и вычисления необходимых данных при решении самосогласованной задачи возбуждения полей используется программа PARMELA [6].

Для моделирования нестационарной динамики частиц в рециркуляторах методика была доработана. В частности, был добавлен алгоритм «слияния» пучков, поступающих на вход ускоряющей системы из магнитной системы рециркулятора и инжектора.

Расчет и оптимизация оптики кольца рециркуляции проводилась с помощью программ TRANSPORT [7] и MAD [8].

2. ВЫБОР СТРУКТУРЫ УСКОРИТЕЛЯ

Очевидным путем повышения энергии частиц на выходе ускорителя является применение ускоряющих секций с большим набором энергии. Нами были проведены оценочные расчеты возможной структуры таких секций. Мы исходили из следующих исходных данных: мощность СВЧ-питания –

16 МВт на секцию, тип секции – диафрагмированный волновод с видом колебаний $2/3\pi$, толщина дисков – $5,562 \cdot 10^{-2} \cdot \lambda$, где λ – длина волны, радиус скругления – половина толщины диска. Параметры секции вычислялись с использованием методики [5]. Поля определялись из решения уравнения диффузии мощности [7]. Оценки показали, что оптимальной является секция, состоящая из 40 ячеек, имеющая линейный закон изменения радиуса центрального отверстия от 22 до 18 мм. При токе 0.6 А секция обеспечивает прирост энергии 20,3 МэВ. Таким образом, при установке двух таких секций энергия пучка будет более 40 МэВ при импульсной мощности пучка более 24 МВт. К недостаткам такой структуры ускорителя следует отнести большое время заполнения секций (около 2 мкс). Поэтому, мы обратились к схемам с рециркуляцией пучка.

Предварительный анализ показал, что схемы с многократным прохождением пучка малоперспективны из-за проблем, вызванных значительной токовой нагрузкой и импульсным характером пучка. Таким образом, к рассмотрению были приняты две схемы построения рециркулятора: с двукратным прохождением пучка через три секции (вариант 1 на Рис.1) и с двукратным прохождением пучка через две секции (вариант 2 на Рис.1). Для выбора оптимальной схемы нами была промоделирована динамика пучка для этих двух случаев с помощью ЦСР методики. На этом этапе была применена простая матрица кольца, а именно, пучок после первого прохода через секции передавался с соответствующей задержкой на вход секций без изменения параметров.

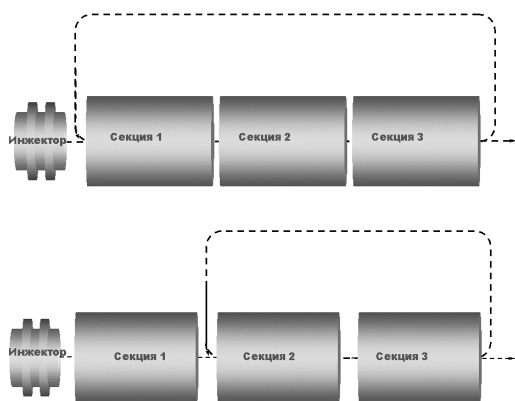


Рис.1. Схемы рециркуляции пучка.
Вверху – вариант 1; внизу – вариант 2

Параметры, которые были использованы при моделировании, приведены в Табл.1.

После настройки фазовых соотношений между сигналами питания элементов ускорителя и моноэнергетизации частиц пучка с помощью подбора взаимного расположения во временной области импульса тока и импульсов СВЧ-питания секций были получены устойчивые режимы рециркуляции пучка для обоих вариантов. Энергетические спектры частиц на выходе третьей секции для двух вариантов рециркуляции пучка приведены на Рис.2 и Рис.3. Параметры пучка для обоих вариантов рециркуляции пучка приведены в Табл.2.

Таблица 1. Параметры моделирования

Начальная энергия частиц, кэВ	135
Начальный ток, А	1,2
Частота следования сгустков, МГц	1300
Мощность питания первой секции, МВт	13
Мощность питания секций 2и 3, МВт	16
Энергия центральной орбиты, вар. 1, МэВ	29
Энергия центральной орбиты, вар. 2, МэВ	30
Ширина аксептанса кольца по энергиям, %	± 5
Длина орбиты, вар. 1, λ	60
Длина орбиты, вар. 2, λ	40

Следует заметить, что при некоторых соотношениях энергии частиц после первого прохождения секций и энергии W_0 равновесной орбиты кольца рециркуляции, устойчивого режима работы ускорителя можно и не достигнуть. Расчеты показали, что изменение равновесной энергии более чем на 3% приводит к неустойчивому режиму работы.

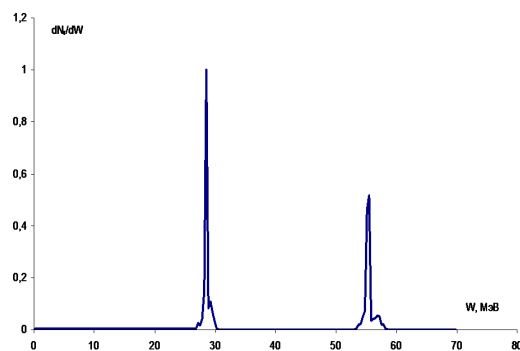


Рис.2. Энергетический спектр, вариант 1

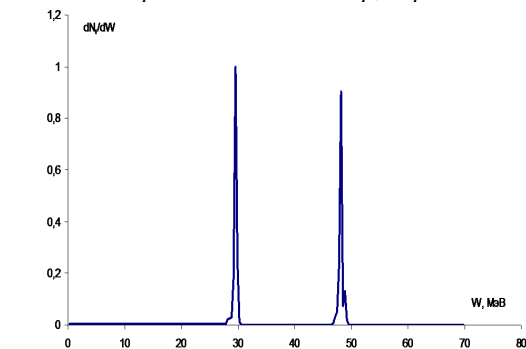


Рис.3. Энергетический спектр, вариант 2

Таблица 2. Параметры пучка

	Вар.1	Вар.2
Энергия частиц после первого прохождения секций, МэВ	28,5	29,5
Энергия частиц после второго прохождения секций, МэВ	55,5	48,1
Ток выходного пучка, А	0,49	0,49
Импульсная мощность пучка, МВт	27,1	23,5

Таким образом, обе рассмотренные схемы рециркуляции обеспечат получение средней энергии пучка в диапазоне 45...60 МэВ. Тем не менее, более детальный анализ показал, что первый вариант рециркуляции имеет ряд недостатков. В частности, из-за большего изменения прироста энергии при измене-

нии тока пучка за счет рециркуляции, первый вариант имеет меньший диапазон устойчивости. Кроме того, эта схема значительно сложнее для реализации с точки зрения инжекции начального пучка. Действительно, в первом варианте в магнитную систему необходимо ввести пучок с энергией несколько мегэлектронвольт, что является сложной задачей. Кроме того, в силу наличия интенсивного фазового скольжения первого пучка в первой секции усложняется процедура фазирования второго пучка. Однако основной проблемой при использовании варианта 1 оказался низкий пороговый ток возникновения поперечной неустойчивости пучка. Проведенное моделирование динамики пучка, с учетом влияния возбуждения пучком колебаний в полосе дипольной моды, показало, что пороговый ток $I_{пор}$ развития неустойчивости для первого варианта лежит в диапазоне $0,2 \text{ A} < I_{пор} < 0,3 \text{ A}$, а для второго варианта – $I_{пор} > 0,5 \text{ A}$. Следует заметить, что $I_{пор}$ при выключенной рециркуляции, по крайней мере, на порядок выше.

Приняв во внимание все приведенные выше результаты, в качестве рабочей была выбрана схема рециркулятора с повторным прохождением пучка через две последние секции.

3. СТРУКТУРА РЕЦИРКУЛЯТОРА

К оптической системе рециркулятора предъявляется ряд требований. Магнитная система должна поворачивать пучок с потенциально большим энергетическим разбросом с минимальными потерями частиц. Конструкция кольца должна позволять подстройку длины орбиты. Магнитная система кольца должна обеспечивать почти изохронное движение частиц, чтобы избежать расплывания ступков с большим энергетическим разбросом. Кольцо должно быть компактным. Кроме того, как показали исследования, транспортная матрица магнитной системы от выхода третьей к входу второй секции должны иметь малое значение коэффициентов R_{12} и R_{34} , чтобы в кольце не произошло усиление отклонений частиц, вызванных действием полей дипольных мод колебаний в секциях.

Удовлетворить этим требованиям оказалось достаточно сложно, особенно из-за жестких требований к габаритам устройства. Были промоделированы с помощью программ TRANSPORT и MAD многочисленные варианты дуг рециркулятора. За основу были приняты дуги на основе дипольных магнитов с углом поворота, близким к 90° , как наиболее компактные. В результате, мы пришли к структуре, изображенной на Рис.4. Цифрами на рисунке обозначены: 1 – первая ускоряющая секция; 2 – элементы инжекционного двойного параллельного переноса; 3 и 4 – вторая и третья ускоряющие секции; 5 – 12° -дипольный магнит, 6 и 9 – 102° -дипольные магниты, 7 – квадрупольные линзы, 8 – 90° -поворотные магниты. Изменение длины орбиты кольца осуществляется за счет увеличения расстояния между магнитами дуг по координате X.

Угол поворота 102° необходим для того, чтобы в дальнейшем обеспечить слияние пучка, поступаю-

щего из первой секции, и рециркулирующего пучка. Это происходит в последнем магните двойного параллельного переноса. На выходе этого магнита траектории обоих пучков совпадают с осью ускоряющих секций. Для обеспечения симметрии кольца, правая дуга (см. Рис.4) выполнена аналогичным образом, как и левая. Вывод пучка (на рисунке не показан) осуществляется из 102° -магнита правой дуги 6. Квадрупольные линзы, установленные посередине дуг, обеспечивают ахроматичность поворота. Так как на прямом участке, в котором установлены ускоряющие секции, проходит два пучка с разными энергиями, то фокусирующие элементы там не установлены. Фокусировка пучка осуществляется за счет неоднородного поля в магнитах дуг. Транспортировка пучка на прямом участке, свободном от ускоряющих секций, осуществляется шестью квадрупольными линзами. Оптические функции кольца при выключенных ускоряющих секциях показаны на Рис.5.

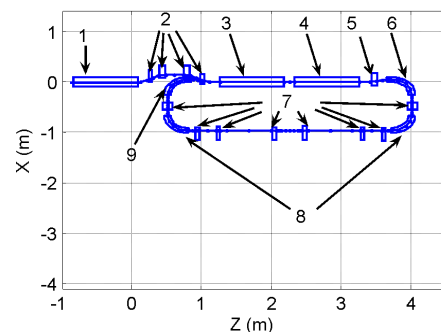


Рис.4. Структура рециркулятора

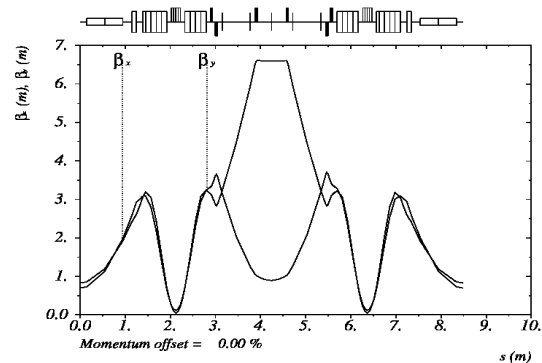


Рис.5. Оптические функции кольца

Одной из сложных процедур является согласование тракта инжекции пучка с оптикой кольца. Для моделирования и оптимизации движения частиц от выхода первой ускоряющей секции через двойной параллельный перенос, две ускоряющие секции и магнитную систему рециркулятора с учетом ускорения, был использован полиморфный код, входящий в программу MAD. К сожалению, из-за ограниченности места, где должен быть установлен рециркулятор, нам не удалось найти такую структуру ввода пучка, при которой полностью согласовываются тракты инжекции и кольца при сохранении ахроматичности системы ввода. Как показало моделирование кольца с использованием модернизированной методики [3], при отсутствии ахроматичности системы ввода не удастся получить устойчивого режима ра-

боты. Изменение энергии частиц на входе в кольцо за счет токовой нагрузки приводит к сильному смещению равновесной орбиты и, как следствие, к большим потерям частиц в кольце.

Бета-функции для однократного прохождения пучка через кольцо с учетом ускорения при ахроматичной системе ввода показаны на Рис.6. Энергия равновесной орбиты равна 27 МэВ.

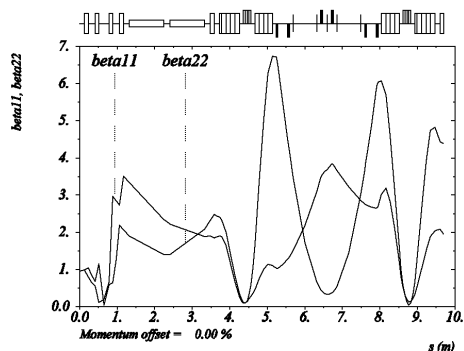


Рис.6. Бета-функции

После разработки системы инжекции была промоделирована нестационарная динамика частиц в рециркуляторе с использованием модернизированной методики [3]. Так как в кольце используются дипольные магниты с неоднородным полем, то изменение координат частиц при их движении через магнитную систему вычислялось с помощью транспортных матриц (программа PARMELA может моделировать динамику только в однородных магнитах). Для упрощения моделирования структура кольца разбивалась на 40 участков. После подбора фаз сигналов питания секций для получения максимального прироста энергии был произведен поиск стационарного режима. Он был получен путем выбора временного положения импульса тока пучка относительно СВЧ-импульсов и мощности питания секций. Система обладает небольшим запасом устойчивости. При изменении мощности питания более чем на $\pm 2\%$ режим становится неустойчивым. Ниже приведены результаты моделирования. На Рис.7 показаны импульсы тока в критических точках рециркулятора.

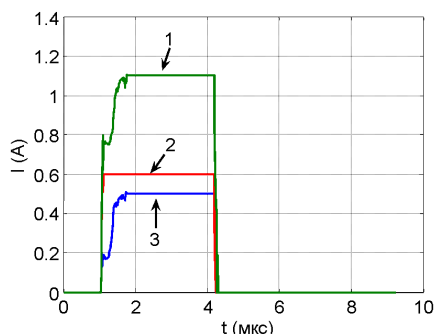


Рис.7. Импульсы тока

Цифрами обозначены: 1 – ток на выходе третьей секции; 2 – ток на выходе первой секции; 3 – ток, прошедший через магнитную систему кольца. Как видно из рисунка, после завершения переходного процесса устанавливается стационарный режим. В

этом режиме на первом проходе через кольцо теряется 1/6 тока, инжектированного из первой секции. На втором проходе пучка через ускоряющие секции частицы практически не теряются. Энергетические спектры частиц на входе во вторую секцию и на выходе третьей секции показаны на Рис.8 и Рис.9 соответственно.

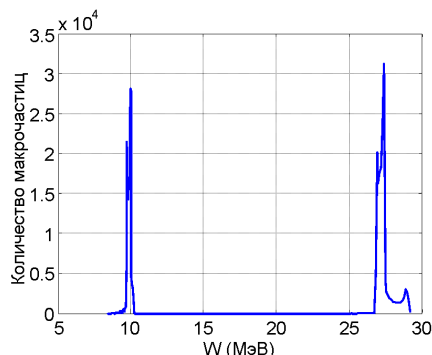


Рис.8. Энергетический спектр на входе второй секции

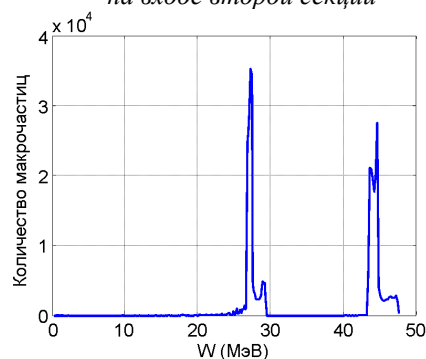


Рис.9. Энергетический спектр на выходе третьей секции

С помощью модели ЦСР были проведены исследования зависимости стартового тока I_{th} поперечной неустойчивости от длины кольца при реальной матрице передачи магнитной системы. Результаты приведены на Рис.10.

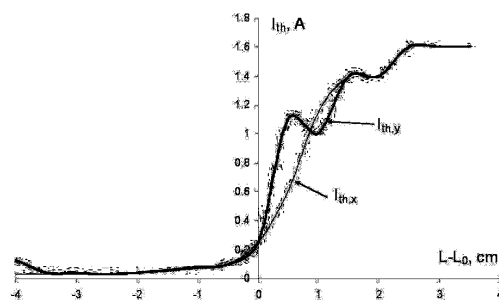


Рис.10. Зависимость стартового тока I_{th} поперечной неустойчивости от длины кольца

Величина L_0 соответствует периметру кольца, равному 38λ . Видно, что величины стартового тока для вертикальной $I_{th,y}$ и горизонтальной поляризации $I_{th,x}$ близки друг к другу и могут быть сделаны выше рабочего тока рециркулятора путем подстройки длины орбиты. Анализ продольного движения показал, что при I_{th} около 1 А уменьшение набора энергии за

счет нарушения оптимального фазирования не превышает 4%.

Параметры пучка рециркулятора приведены в Табл.3.

Таблица 3. Параметры пучка рециркулятора

Энергия на входе, МэВ	10
Ток на входе, А	0,6
Энергия после первого прохода, МэВ	27,4
Ток после первого прохода, А	0,5
Энергия после второго прохода, МэВ	44,7
Ток после второго прохода, А	0,5

ВЫВОДЫ

Разработана структура рециркулятора, которая позволит увеличить энергию частиц Аргонского линейного ускорителя электронов до 45 МэВ при токе пучка 0,5 А. Показано, что при импульсных токах пучка до 0,5 А может быть достигнуто устойчивое ускорение частиц.

Работа выполнена при финансовой поддержке партнерского проекта УНТЦ №P228.

ЛИТЕРАТУРА

1. W. Gallagher, K. Johnson, G. Mavrgenes and W. Ranler. A High Current Electron Linac // *IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-18(3)*. 1971, p.584-587.

2. M.I. Aizatsky, E.U. Kramarenko, I.V. Khodak, et al. On Transversal Instability of Beam in Powerful S-band Linear Electron Accelerators // *Problems of Atomic Science and Technology. Series "Nuclear Physics Investigations" (46)*. 2006, N2, p.131-133.

3. V.V. Mytrochenko, A. Opanasenko, Study of transient self-consistent beam dynamics in RF linacs using a particle tracing code // *NIM A*. 2006, v.558, p.235-239.

4. J.H. Billen and L.M. Young. *POISSON/SUPERFISH on PC compatibles*. Proc. Of the PAC1993, Washington (USA), 1993, p.790-792.

5. G.A. Loew, R.H. Miller, R.A. Early, and K.L. Bane. Computer Calculations of Traveling Wave Periodic Structure Properties // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 1979, NS-26, p.3701.

6. L.M. Young. *PARMELA*. Los Alamos National Laboratory, LA-UR-96-1835, 1996.

7. D.C. Carey, K.L. Brown and F. Rothacker. *Third-Order TRANSPORT with MAD Input A Computer Program for Designing Charged Particle Beam Transport Systems*. FERMILAB-Pub-98/310, Fermi National Accelerator Laboratory, Batavia, Illinois, 1998, p.316.

8. F. Schmidt. MAD-X PTC integration // *Proc. of the PAC2005*, Knoxville, Tennessee, 2005, p.1272-1274.

Статья поступила в редакцию 10.09.2007 г.

PROPOSALS FOR UPGRADING ANL ELECTRON LINAC

N.I. Ayzatsky, P.I. Gladkikh, A.Yu. Zelinsky, David Ehst, V.A. Kushnir, V.V. Mytrochenko, A.N. Opanasenko

We discuss the project of upgrading existent 20 MeV L-band electron linac at Argonne National Laboratory. The main purpose of reconstruction is increasing energy of electrons. It is shown that the proposed version of modernization on the base of beam recalculation will provide on the accelerator output an electron beam with a pulse current 0.5 A and by energy of particles 45 MeV.

ПРОЕКТ РЕКОНСТРУКЦІЇ ЛІНІЙНОГО ПРИСКОРЮВАЧА ЕЛЕКТРОНІВ АРГОНСЬКОЇ НАЦІОНАЛЬНОЇ ЛАБОРАТОРІЇ

М.І. Айзацький, П.І. Гладких, А.Ю. Зелінський, Д. Ест, В.А. Кушнір, В.В. Митроченко, А.Н. Опанасенко

Обговорюється проект реконструкції лінійного прискорювача електронів дециметрового діапазону з енергією частинок 20 МеВ Аргонської Національної лабораторії з метою збільшення енергії електронів. Показано, що запропонована схема модернізації прискорювача на основі рециркуляції пучка забезпечить на його виході електронний пучок з імпульсним струмом 0.5 А і енергією частинок 45 МеВ.