

ЛИНЕЙНЫЙ ДЕЙТРОННЫЙ УСКОРИТЕЛЬ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

В.А. Воронко, Е.В. Гусев, П.А. Демченко, А.Г. Лымарь, В.В. Сотников, Н.Г. Шулика, О.Н. Шулика

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

E-mail: demchenko@kipt.kharkov.ua

Исследуется возможность создания линейного дейтронного ускорителя непрерывного действия с выходной энергией частиц 23 МэВ, током пучка 3 мА, энергией инжекции 100 кэВ и рабочей частотой 152 МГц. Поперечная и продольная устойчивости динамики пучка в канале обеспечиваются использованием комбинации переменного-фазовой фокусировки в ускоряющих секциях и магнитной фокусировки на переходах между ними. Ускоритель может быть использован для генерации интенсивных потоков быстрых нейтронов и как драйвер подкритической сборки. Конвертером нейтронов служит бериллиевая мишень.

ВВЕДЕНИЕ

В 2005 г. в ННЦ ХФТИ были начаты работы над концептуальным проектом электроядерного источника нейтронов [1]. Один из вариантов драйверов, предложенных для получения первичных нейтронов, представлял собой дейтронный ускоритель, работающий в непрерывном режиме, с выходной энергией 23 МэВ и током 3 мА. При использовании бериллиевого конвертера выход быстрых нейтронов составляет $6 \cdot 10^{14}$ нейтр./с.

Основными требованиями технического задания к ускорителю-драйверу были:

- непрерывный режим работы ускорителя;
- максимально возможное использование существующих производственных площадей, электрофизического оборудования, технологической инфраструктуры;
- применение проверенных инженерно-физических и конструкторских решений, чтобы свести к минимуму этап научно-исследовательских разработок (НИР) (консервативный подход).

В настоящей статье приведены основные характеристики концептуальной версии линейного ускорителя дейтронов непрерывного действия, предложенного в качестве драйвера подкритической сборки.

Вопросы, которые решались при разработке дейтронного ускорителя непрерывного действия, включали:

- выбор типа ускоряющей структуры и секционирование ускоряющего канала;
- выбор способов обеспечения радиальной и продольной устойчивости движения ансамбля частиц в процессе ускорения;
- способы согласования параметров пучка на переходах между ускоряющими секциями;
- принцип построения начальной части ускорителя;
- выбор инжектора и способа согласования параметров инжектируемого пучка с начальной частью;
- определение основных электродинамических характеристик ускоряющих секций и требуемой для их питания высокочастотной мощности;

- выбор высокочастотных генераторов непрерывного режима работы для питания ускоряющих секций;
- минимизацию величины потерь тока дейтронов вдоль ускорителя и оценку уровня активации элементов его конструкции.

1. УСКОРЯЮЩИЙ КАНАЛ

Исходные параметры для расчёта и выбора конструкции узлов ускорителя приведены в Табл.1. В качестве ускоряющих секций используются цилиндрические H -резонаторы с трубками дрейфа. Трубки дрейфа внутри резонаторов укреплены на держателях типа “гребёнка” и образуют π -волну электрического поля вдоль оси ускоряющей секции.

Таблица 1. Исходные параметры для разработки ускорителя

Ускоряемые ионы	дейтроны
Режим работы	непрерывный
Рабочая частота, МГц	152.0
Энергия инжекции, МэВ	0.1
Выходная энергия, МэВ	23
Ток ускоренного пучка, мА	3.0
Мощность пучка, кВт	69

Таким образом, длина ускоряющего периода равнялась $\beta\lambda/2$, где $\beta=v/c$ (v – скорость дейтронов; c – скорость света; λ – длина волны электромагнитного поля). В рассматриваемом интервале энергий $0,1 \leq W \leq 23$ МэВ приведенная скорость дейтронов изменяется в пределах $1,03 \cdot 10^{-2} \leq \beta \leq 1,55 \cdot 10^{-1}$. В этой области скоростей H -структуры обладают максимальным шунтовым сопротивлением ($R_{sh} \geq 50$ МОм/м), что позволяет снизить мощность ВЧ-питания секций. Одновременно, при выбранной рабочей частоте ($f=152$ МГц) существенно уменьшается диаметр резонаторов (приблизительно в 4 раза по сравнению с вариантом E -резонатора), что снижает затраты на изготовление структур.

На Рис.1 приведен опытный образец одной из ускоряющих секций с модифицированной

переменно-фазовой фокусировкой, рассчитанной и изготовленной для ускорения протонов в интервале энергий 0,1...2,4 МэВ. Аналогичная конструкция секций была выбрана и для дейтронного линака.

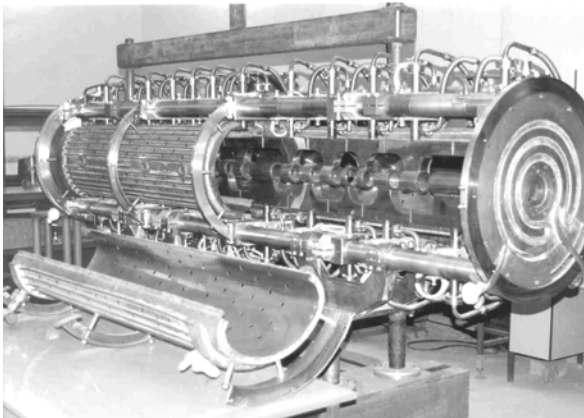


Рис.1. Опытный образец ускоряющей секции с модифицированной переменнo-фазовой фокусировкой, разработанной для протонного линака

Устойчивость продольного и поперечного движений дейтронов в пределах каждой секции достигается использованием модифицированной переменнo-фазовой фокусировки (МПФФ) [2]. Фазировка пучка и радиальная фокусировка осуществляются одним и тем же ускоряющим высокочастотным полем. Решение задачи устойчивости движения пучка состоит в выборе закона чередования числа ускоряющих зазоров, которые частица проходит при отрицательных фазах ВЧ-поля, и значений этих фаз φ_s (фазировка пучка и радиальная дефокусировка), и числа зазоров с соответствующими значениями положительных фаз (дебанчировка и радиальная фокусировка).

Разбиение ускоряющего канала на отдельные секции осуществлялось исходя из требований технологичности изготовления, удобства настройки, требований согласования параметров пучка на переходах между секциями, и с учётом мощности существующих генераторов ВЧ-питания непрерывного режима. Для уменьшения мощности ВЧ-питания максимальные значения напряженности электрического поля в ускоряющих зазорах были выбраны не более 45 кВ/см. Так как уменьшение напряженности электрического поля снижает жёсткость динамики пучка, то принимались меры по оптимизации ускоряющее-фокусирующего канала с целью минимизации потерь дейтронов, особенно в последних секциях ускорителя.

Основные характеристики рассчитанных секций дейтронного линейного ускорителя приведены в Табл.2. Число ускоряющих секций равно 9, их полная длина приблизительно 29 м, суммарная мощность, требуемая для возбуждения резонаторов ~774 кВт. Диаметры резонаторов изменяются от 34 до 45 см, что связано с изменением погонной ёмкости ускоряющей структуры с ростом скорости частиц. Радиусы апертур изменяются от 0,45 см в начале ускоряющего тракта до 2,5 см в конце. Нормализованный эмиттанс пучка на выходе

ускорителя равен $\varepsilon_n=1,2$ мм-мрад, а энергетический разброс $\Delta W/W=0,2\%$. Максимальная погонная мощность, рассеиваемая в ускоряющих секциях, не превышает 30 кВт/м.

Таблица 2. Основные характеристики ускоряющих секций

№ секции	Интервал энергий, МэВ	Число периодов ускорения	Число периодов фокусировки	Темп ускорения, МэВ/м	Мощность возбуждения, кВт	Длина секции, м
1	0.1...1.197	69	8	0.535	20.0	2.02
2	1.197...2.45	22	2	1.03	35.3	1.21
3	2.45...4.05	25	2	0.89	37.8	1.81
4	4.05...6.05	27	2	0.85	56.5	2.35
5	6.05...8.71	31	2	0.84	86.2	3.16
6	8.71...12.19	36	2	0.82	122.0	4.24
7	12.19...15.43	33	2	0.72	130.0	4.49
8	15.43...19.76	39	2	0.74	166.0	5.85
9	19.76...22.8	25	1	0.75	120.0	4.05
Всего					773.8	29.18

Для рассматриваемого дейтронного ускорителя полная мощность ВЧ-питания, с учётом затрат на ускорение пучка, составляет около 845 кВт. Для питания ускорителя могут быть использованы одномодульные варианты генераторов метрового диапазона, разработанные в Институте ядерной физики Сибирского отделения РАН (Новосибирск, Россия) [3].

2. МЕЖСЕКЦИОННОЕ СОГЛАСОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПУЧКА

На переходах между секциями ускоряющего канала необходимо осуществлять согласование фазовых характеристик пучка, получаемых на выходе одной секции, с аксептансом и сепаратрисой последующей.

Согласование поперечных характеристик фазового объёма пучка и их симметризация в плоскостях (x, x') и (y, y') достигались использованием магнитных квадрупольных триплетов.

Продольное согласование осуществлялось за счёт двух факторов: выбора длины участка дрейфа между секциями и формированием на выходе секций банчей, сходящихся в продольном направлении. Для этого последние ускоряющие периоды каждой секции были фазированными, т.е. синхронная частица проходила ускоряющие зазоры при отрицательных значениях фаз электрического поля. После прохождения участков дрейфа банчи имели минимальную фазовую протяжённость при входе в последующую секцию. Естественно, что дефокусирующее действие последних зазоров формирует расходящийся в радиальном направлении пучок. Этот эффект соответственно компенсируется магнитным квадрупольным триплетом.

Рис.2 иллюстрирует этот принцип

трансформации фазового объёма пучка на переходах между секциями.

Использование данного подхода при моделировании динамики пучка позволило упростить построение ускоряюще-фокусирующего канала ускорителя и существенно уменьшить потери дейтронов в высокоэнергетических секциях.

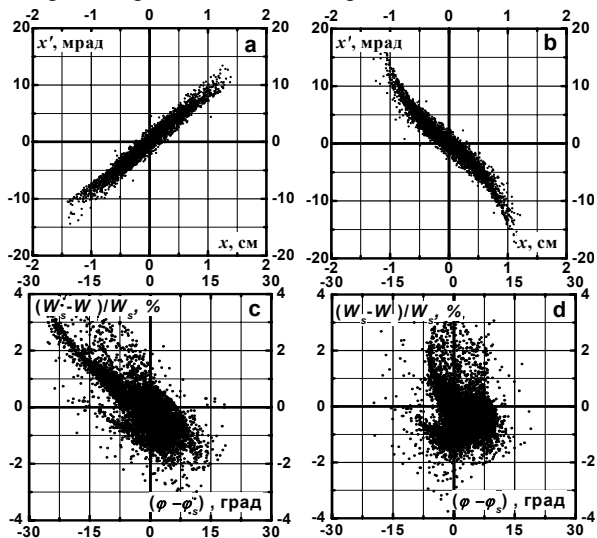


Рис.2. Проекция фазового объёма пучка:

- на плоскость $x-x'$ на выходе секции №5 (а)
и на входе в секцию №6 (б);

- на продольную плоскость на выходе секции №5 (с)
и на входе в секцию №6 (д)

Таблица 3. Параметры квадрупольных триплетов

№ п/л	Длина крайних полюсов, см	Длина средних полюсов, см	Зазор между полюсами, см	Эффективная длина линзы, см	Радиус апертуры, см	Максимальная индукция на полюсах, кГс	Градиент, кГс/см
1	5.0	10.0	3.0	37.0	1.2	3.6	2.23
2	7.0	14.0	4.0	51.0	1.8	3.75	1.53
3	11.0	22.0	7.0	83.0	3.0	3.48	0.86
4	14.0	28.0	8.0	102.0	3.5	3.1	0.66
5	14.0	28.0	8.0	102.0	3.5	3.4	0.72
6	14.0	28.0	8.0	102.0	3.5	3.56	0.76
7	14.0	28.0	8.0	102.0	3.5	3.76	0.81
8	14.0	28.0	8.0	102.0	3.5	4.18	0.9

В Табл.3 приведены основные характеристики фокусирующих триплетов, используемых в ускоряющем канале. Всего используется 8 линз, с максимальными значениями, соответственно: индукции на полюсах 4,18 кГс, апертуры 3,5 см и градиента магнитного поля 2,23 кГс/см.

3. НАЧАЛЬНАЯ ЧАСТЬ УСКОРИТЕЛЯ

В данной разработке, учитывая сравнительно умеренные значения тока пучка ($I_b \leq 5$ мА), рассматривается вариант начальной части, состоящей из группирователя (банчера) и первой ускоряющей секции с переменнo-фазовой фокусировкой.

Группирователь представляет собой короткий H -резонатор, нагруженный трубками дрейфа и настроенный на рабочую частоту 152 МГц. Основная проблема при расчете группирователя состоит в обеспечении радиальной устойчивости пучка. Так как энергия инъекции дейтронов составляла $W_0=100$ кэВ, то для фокусировки пучка в группирователе было использовано знакопеременное электростатическое поле между трубками дрейфа. Таким образом, на трубках дрейфа, кроме высокочастотной составляющей поля, имелось постоянное смещение, знак потенциала которого чередовался при переходе от трубки к трубке.

Чётные и нечётные трубки дрейфа были изолированы друг от друга и резонатора, связь с которым осуществлялась через высоковольтные разделительные конденсаторы. Электростатические потенциалы смещения подавались на эти группы трубок через дроссели высокочастотной развязки.

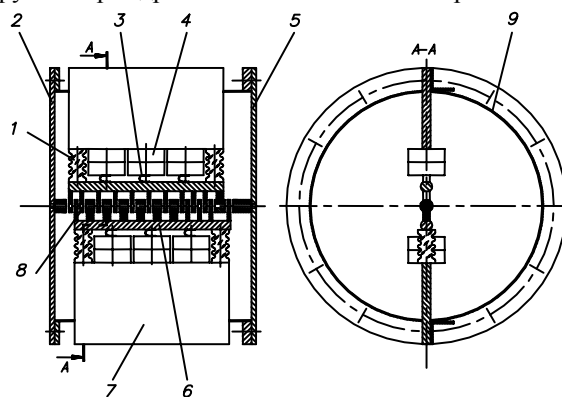


Рис.3. Группирователь:

1 - изолятор; 2,5 - днище резонатора; 3- контактная пластина; 4 - высокочастотный конденсатор; 6 - гребенчатый держатель; 7 - пластинчатый держатель; 8 - трубка дрейфа; 9 - обечайка резонатора

Рассчитанный вариант конструкции группирователя схематично показан на Рис.3. Общая длина группирователя 35 см, диаметр резонатора 40 см.

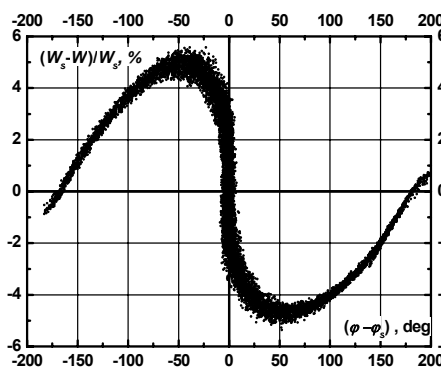


Рис.4. Продольный фазовый портрет пучка на выходе группирователя

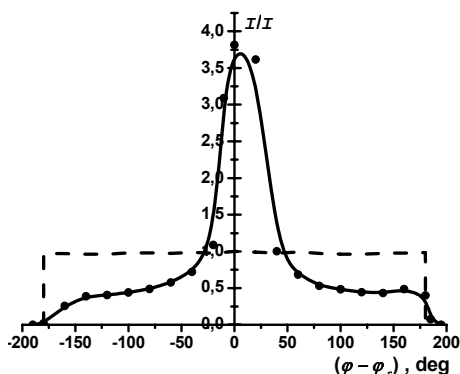


Рис.5. Временной профиль тока на входе (пунктир) и выходе группирователя

На Рис.4 и Рис.5, соответственно, приведены продольный фазовый портрет пучка и распределение тока вдоль формируемых сгустков на выходе группирователя (пунктир, Рис.5, показывает величину тока I_0 , инжектируемого в устройство).

Коэффициент захвата частиц начальной частью ускорителя более 70% был получен при постоянном смещении на соседних трубках +18 кВ и -18 кВ соответственно.

Начальная часть ускорителя, состоящая из рассмотренного группирователя и секции с переменнo-фазовой фокусировкой, обеспечивала на выходе пучок дейтронов с энергией 1,2 МэВ, током ~3,5 мА, при энергии инжекции и токе, соответственно, 100 кэВ и 5 мА.

4. ИНЖЕКТОР

Инжектор включает плазменный источник газообразных ионов и систему электродов для формирования пучка дейтронов. Он должен обеспечивать стационарный пучок с током $I_0=5$ мА, энергией дейтронов $W_0=100$ кэВ и нормализованным эмиттансом $\varepsilon_n = 0,2\pi$ мм×мрад.

В связи с умеренными значениями тока инжекции, рассматривается возможность использования плазменного источника на основе разряда с осцилляцией электронов. Одновременно в НИЦ ХФТИ ведутся разработки ионного источника на основе электронно-циклотронного резонанса. Компоновка инжектора представлена на Рис.6.

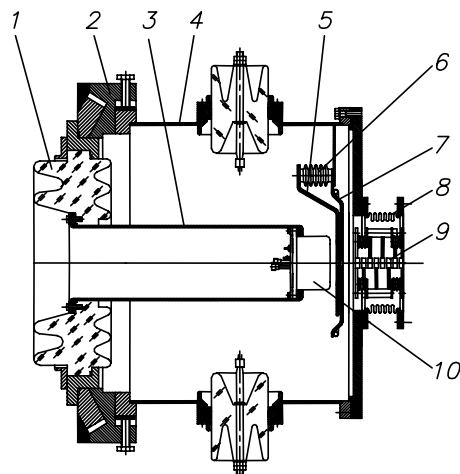


Рис.6. Инжектор дейтронов: 1 - изолятор; 2 - устройство юстировки; 3 - держатель;

4 - вакуумная камера; 5 - экстракционный электрод; 6 - изолятор; 7 - заземленный электрод; 8 - сильфон; 9 - согласователь; 10 - ионный источник

Трёхэлектродная оптика, используемая в инжекторе, не позволяет в необходимых пределах регулировать расходимость и диаметр пучка на входе в группирователь начальной части ускорителя. Для достижения максимального коэффициента захвата необходимо на входе в группирователь иметь пучок радиусом $r_0=1,2$ мм и углом сходимости $r'_0=10$ мрад.

Для этой цели между инжектором и группирователем располагалось согласующее устройство (согласователь). Согласователь представляет собой многоэлектродную аксиально-симметричную электростатическую линзу с чередующимися знакопеременными потенциалами электродов. Схематично конструкция согласователя представлена на Рис.7.

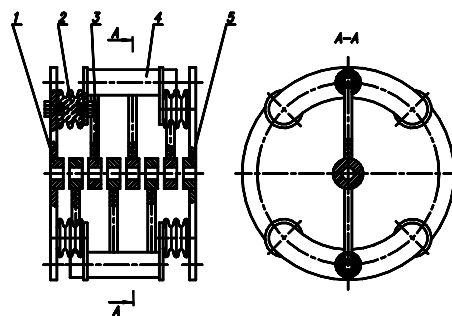


Рис.7. Согласователь:

1,5 - заземленные электроды; 2 - изолятор; 3 - потенциальные электроды; 4 - держатель

Для согласования фазового объёма пучка с аксептансом начальной части на чётные и нечётные электроды, Рис.7, необходимо симметрично подавать фокусирующее напряжение ± 22 кВ, относительно заземлённых входного и выходного электродов. Общая длина согласователя 120 мм, диаметр апертуры электродов 10 мм.

5. РАДИАЦИОННЫЕ ПОТЕРИ И АКТИВАЦИЯ УСКОРИТЕЛЯ

Важной характеристикой, определяющей возможность обслуживания ускорителя, является его радиационная чистота. На практике она определяется допустимой мощностью дозы для персонала K_p , на расстоянии 1 м от оси ускорителя через 1 час после его выключения, при условии длительной предварительной работы $t \geq 1$ года (в Украине $K_p \approx 12$ мкЗв/ч).

Величиной, определяющей уровень активации работающего ускорителя, являются удельные потери тока дейтронов dI/dz на единицу длины z-канала.

На Рис.8 приведены результаты расчета распределения мощности дозы K вдоль ускорителя на расстоянии $r=1$ м от его оси, после непрерывной работы в течение $t_a=1$ года и времени остывания $t_c=1$ час.

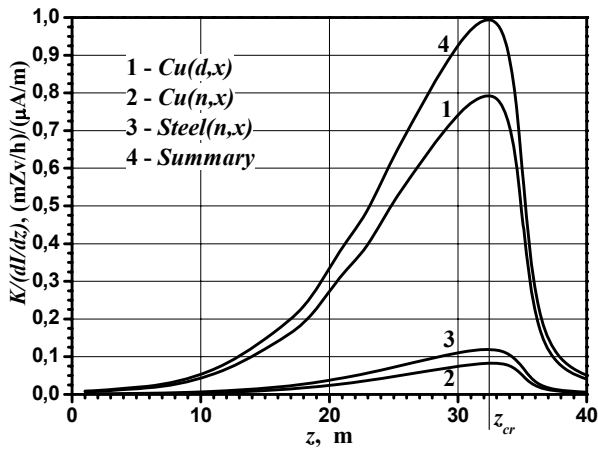


Рис.8. Распределение мощности дозы вдоль ускорителя на расстоянии 1 м от оси при постоянной величине удельных потерь

Мощность дозы K приведена к току удельных потерь пучка dl/dz в предположении, что величина потерь постоянна вдоль ускоряющего канала. Зависимости 1-4, Рис.8, соответствуют вкладу в полную мощность дозы (кривая 4) радионуклидов, нарабатываемых вследствие активации медных трубок дрейфа непосредственно дейтронами (кривая 1), трубок дрейфа вторичными нейтронами (кривая 2), вакуумного лайнера из нержавеющей стали вторичными нейтронами (кривая 3). Как следует из рисунков, основной вклад в мощность дозы создает активация медных трубок дрейфа непосредственно бомбардировкой дейтронами $Cu(d,x)$.

Оценки показывают, что при больших временах активации мощность дозы K может быть уменьшена до допустимого значения K_p в критической точке z_{cr} (участок наибольшей мощности дозы), если удельные потери пучка не превышают $dl/dz \leq (20 \dots 10)$ нА/м на участке канала, где энергия дейтронов изменяется от 14 до 23 МэВ. В начальной части ускорителя при энергиях дейтронов ниже порогов реакций, вызывающих наработку долгоживущих радионуклидов, удельные потери пучка могут быть на несколько порядков выше.

Расчёт распределения удельных потерь тока пучка dl/dz вдоль ускоряющего канала проводился

непосредственно в процессе моделирования динамики пучка методом макрочастиц. Максимальное число частиц в моделирующем ансамбле составляло 10^4 . Таким образом, при токе инжекции 5 мА потеря одной частицы была эквивалентна 500 нА потерь тока пучка.

Оптимизация канала выполнялась таким образом, чтобы основные потери происходили в низкоэнергетических секциях, где энергия дейтронов $W \leq 2 \dots 2,5$ МэВ, и резко уменьшались с ростом их энергии. В результате удалось исключить потери макрочастиц в выходных секциях ускорителя, что давало верхнюю оценку уровня потерь в этих секциях $\Delta I < 500$ нА или, соответственно, среднее значение $\Delta I / I \leq 20$ нА/м.

Проведенный анализ показывает, что при выбранной концепции ускоряющего канала, можно добиться приемлемой радиационной чистоты ускорителя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты разработки концептуальной схемы линейного дейтронного ускорителя непрерывного действия свидетельствуют, что использование комбинации переменного-фазовой и магнитной фокусировок позволяют построить радиационно чистый драйвер относительно простой конструкции на средние параметры пучка.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ukraine-USA Meeting "Accelerator Driven Subcritical Assembly Facility"*. Україна, Харків, 24-25 лютого 2005 / Під ред. А.М. Довбні. Харків, ННЦ ХФТІ, 2005. 246 с.
2. P.O. Demchenko, A.S. Beley, Ye.V. Gussev, M.G. Shulika. An Alternating Phase Focusing Channel for Low Energy Proton Therapy // *Proceedings of EPAC'2000*. Vienna, June 2000, p.1477-1479.
3. В.С. Арбузов, А.А. Бушуев, Э.И. Горникер и др. Мощный УКВ-генератор модульной конструкции для накопителей и ускорителей // *XVI Совецание по ускорителям заряженных частиц*. Протвино, 22-29 октября 1998, с.43-45.

Статья поступила в редакцию 12.10.2007 г.

CONTINUOUS MODE LINEAR DEUTERON ACCELERATOR

V.A. Voronko, Ye.V. Gussev, P.A. Demchenko, A.G. Lymar, V.V. Sotnikov, N.G. Shulika, O.N. Shulika

Considered is the possibility to construct a continuous mode deuteron linac with the following parameters: output energy of 23 MeV, an average beam current of 3 mA, operating frequency of 152 MHz, and injection energy of 100 keV. The usage of combination of alternating-phase focusing in accelerating sections and magnetic focusing at the passages between them ensures the stability of beam dynamics. The accelerator can be used as a generator of intense fast neutron beams and as a subcritical assembly driver. A beryllium target serves as a neutron converter.

ЛІНІЙНИЙ ДЕЙТРОННИЙ ПРИСКОРЮВАЧ БЕЗПЕРЕРВНОЇ ДІЇ

В.О. Воронко, Є.В. Гусєв, П.О. Демченко, А.Г. Лимар, В.В. Сотніков, М.Г. Шуліка, О.М. Шуліка

Досліджується можливість створення лінійного дейтронного прискорювача безперервної дії з вихідною енергією 23 МєВ, струмом пучка 3 мА, робочою частотою 152 МГц, енергією інжекції 100 кєВ. Поперечна та повздовжня стійкості динаміки пучка у каналі забезпечуються використанням комбінації змінно-фазового фокусування у прискорюючих секціях та магнітного фокусування на ділянках переходів між ними. Прискорювач може бути використаний для генерації інтенсивних потоків швидких нейтронів та як драйвер підкритичної збірки. Конвертером нейтронів може бути мішень з берилію.