

РАЗВИТИЕ МЕТОДА ФОРМИРОВАНИЯ И КОНТРОЛЯ ПУЧКА НА МИШЕНИ ИЗОТОПНОГО КОМПЛЕКСА ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ИЯИ РАН

С.Е. Брагин, О.М. Володкевич, О.В. Грехов, Ю.В. Киселев, А.Н. Мирзоян,
В.Н. Михайлов, В.А. Мусеев, А.В. Фещенко

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт ядерных исследований» Российской академии наук (ИЯИ РАН), Москва, Россия

E-mail: volodkev@inr.ru

Оптимизация параметров пучка протонов на участке согласования непосредственно перед отводом пучка в канал транспортировки изотопного комплекса линейного ускорителя ИЯИ РАН позволяет получить на входе в канал контролируемые параметры пучка в поперечных фазовых плоскостях с целью дальнейшей оптимизации для формирования требуемых линейных и угловых размеров пучка на изотопной мишени. Использование многопроволочного профилометра и отдельного управления линзами последнего квадрупольного дублета на канале дает возможность формировать пучок протонов на мишени в широком диапазоне его параметров в поперечном фазовом пространстве. Представлены расчетно-экспериментальные результаты современного метода формирования и контроля характеристик пучка на мишени.

ВВЕДЕНИЕ

Применение разработанной ранее программы согласования характеристических параметров пучка в поперечных фазовых плоскостях между двумя продольными координатами ускоряюще-фокусирующего канала транспортировки и использование рассчитанных топокарт для двух переменных позволяет формировать на выходе исследуемой системы пучки в поперечных фазовых плоскостях в широком диапазоне характеристических параметров. Предлагаемая методика применена к согласующему участку на 160 МэВ и каналу транспортировки изотопного комплекса (ИК) линейного ускорителя ИЯИ РАН. Результаты моделирования динамики пучка на исследуемом участке позволяют оптимизировать поперечные характеристики пучка при заданных его параметрах в поперечных фазовых плоскостях на изотопной мишени и организовать надежные измерения на многопроволочном профилометре, расположенном перед мишенью.

1. СТРУКТУРА ЗОНЫ ФОРМИРОВАНИЯ И КОНТРОЛЯ ПУЧКА

1.1. УЧАСТОК СОГЛАСОВАНИЯ

На Рис.1 приведены схемы двух частей участка формирования и контроля пучка. Участок вывода пучка в канал ИК показан на Рис.1,а. Согласование выполняется на участке от начала квадрупольного дублета после третьей секции восьмого резонатора до входа в первый импульсный поворотный магнит ИМ1-160 отвода пучка на изотопный комплекс. Регулирующими элементами являются квадрупольные дублеты: Д11÷Д12, Д13÷Д14, Д15÷Д16 (каждая пара питается от одного источника тока) и дублеты Д17, Д18 (питаются от отдельных источников тока) – итого пять регулирующих элементов. Наличие только двух профилометров на участке согласования требует проведения нескольких серий измерений при разных токах в любом регулирующем элементе до профилометра ДПП9-1.

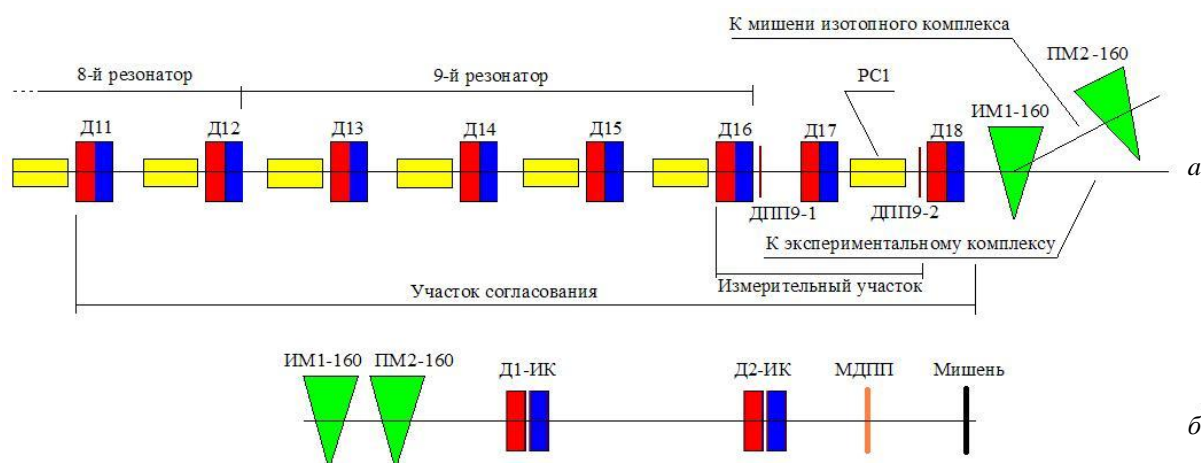


Рис.1. Схемы: а) участка вывода пучка в канал ИК; б) канала транспортировки ИК. Д11, ..., Д18, Д1-ИК, Д2-ИК – квадрупольные дублеты; ИМ1-160, ПМ2-160 – поворотные магниты; МДПП – многопроволочный профилометр; ДПП9-1, ДПП9-2 – проволочные сканеры; РС1 – первая секция согласующего резонатора

По результатам нескольких серий измерений поперечных профилей пучка, рассчитываются характеристические параметры пучка в двух поперечных фазовых плоскостях на входе участка согласования (перед дублетом Д11). Характеристические параметры пучка на выходе участка согласования определяются расчетным образом на входе в поворотный магнит ИМ1-160 по желаемым параметрам пучка на мишени изотопного комплекса.

Основное назначение данного участка по измерениям на профилометрах ДПП9-1 и ДПП9-2:

- определение характеристических параметров пучка в поперечных фазовых плоскостях в начале участка;
- выполнение согласования характеристических параметров пучка в поперечных фазовых плоскостях между начальной и конечной (перед поворотным магнитом ИМ1-160) точками участка;
- определение оптимальной динамики пучка на данном участке по минимизации потерь частиц или размеров пучка.

Согласующие участки на линейном ускорителе ИЯИ РАН были определены по принципу достаточного количества регулирующих элементов, размещенных на них. По результатам ряда расчетов было решено остановиться на пяти регулирующих элементах на каждом согласующем участке. При этом один любой из регулирующих элементов задается интерактивно и используется как параметр при нахождении согласующего решения для остальных четырех неизвестных значений регулирующих элементов.

Отметим, что при наличии на участке согласования ускоряющих элементов, расчеты выполняются при независимой временной переменной t , а не продольной координате s . В этом случае поперечными фазовыми координатами частиц пучка будут (x, v_x) и (y, v_y) , где v_x, v_y – поперечные скорости, а не угловые наклоны x', y' . Это позволяет улучшить точность расчетов [2].

1.2. КАНАЛ ТРАНСПОРТИРОВКИ ИК

На Рис. 1,б изображен канал транспортировки пучка ИК.

Основное назначение данного участка – по найденным характеристическим параметрам пучка в поперечных фазовых плоскостях в начале участка сформировать требуемый пучок на изотопной мишени.

Вследствие действия поворотных магнитов является энергетическая дисперсия в канале транспортировки пучка в ИК (см. Рис. 1,б), которая существует только в горизонтальной плоскости. Поведение дисперсии определяется, в первую очередь, параметрами магнитов, а также величиной полей в линзах дублетов Д1-ИК и Д2-ИК. Учитывая постоянство токов в поворотных магнитах для конкретной центральной энергии пучка, основными переменными будут токи в линзах дублетов Д1-ИК и Д2-ИК. Варьируя одинаковым образом токи в квадрупольных линзах $Q1, Q2$ дублета Д1-ИК и квадрупольных линзах $Q3, Q4$ дублета Д2-ИК в диапазоне

10...100 А, получаем топокарту значений дисперсионной функции на мишени ИК (Рис. 2).

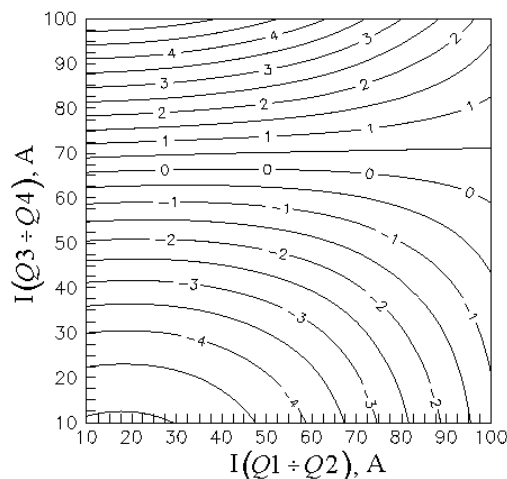


Рис. 2. Уровни постоянных значений дисперсионной функции (m) на изотопной мишени

Из Рис. 2 следует, что в диапазоне токов 68...72 А в каждой линзе дублета Д2-ИК энергетическая дисперсия на изотопной мишени практически отсутствует. В дальнейшем данная топокарта используется для вычисления размеров пучка на изотопной мишени. В [1] применена следующая формула с учетом энергетической дисперсии:

$$x_{rms}^2(s) = \varepsilon_{x rms} \cdot \beta_x(s) + D^2(s) \cdot \left(\frac{\Delta p}{p_0} \right)_{rms}^2, \quad (1)$$

$$y_{rms}^2(s) = \varepsilon_{y rms} \cdot \beta_y(s), \quad (2)$$

где $\varepsilon_{x rms}, \varepsilon_{y rms}$ – ненормализованные поперечные среднеквадратичные эмиттансы пучка, которые определяются по измерениям на участке согласования (см. Рис. 1,а), сохраняются в канале транспортировки ИК (см. Рис. 1,б), так как отсутствует ускорение; $\beta_x(s), \beta_y(s)$ – значения характеристических функций пучка в поперечной плоскости в точке канала транспортировки ИК с продольной координатой s (см. Рис. 1,б). Начальные значения ($s=0$) определяются на входе первого поворотного магнита по измерениям на участке согласования (см. Рис. 1,а); $D(s)$ – значение горизонтальной дисперсии в точке с продольной координатой s в канале ИК; $\left(\frac{\Delta p}{p_0} \right)_{rms}$ – среднеквадратичный относительный импульсный разброс частиц в пучке, который определяется или по отдельным измерениям продольных фазовых параметров пучка на участке согласования, или по специальной обработке горизонтальных профилей пучка на профилометре МДПП в канале ИК [1].

2. СТРАТЕГИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

Разработан новый подход к получению требуемых параметров пучка на мишени при создании значительного массива предложений по характеристическим параметрам пучка в поперечных фазовых

Таблица 1

№	I(Q3), А	I(Q4), А	$x_{экспер}$, мм	$x_{корр}$, мм	$x_{расчет}$, мм	$y_{экспер}$, мм	$y_{расчет}$, мм	$D_{МДПП}$, м
1	57,5	20	1,66	1,40	2,022	6,93	13,921	-0,900
2	57,5	30	1,11	1,09	0,693	6,36	11,714	-0,206
3	57,5	40	1,35	1,25	1,063	5,85	9,471	0,520
4	57,5	50	2,09	1,69	2,488	3,65	7,324	1,235
5	57,5	60	2,92	2,19	3,919	3,02	5,290	1,932
6	57,5	70	3,60	2,41	5,446	1,43	3,190	2,673
7	57,5	80	4,46	2,90	6,919	1,16	1,239	3,385
8	57,5	90	5,50	3,76	8,222	0,56	0,533	4,015

плоскостях перед магнитом ИМ1-160, начинающим отвод пучка на ИК. Расчетно-экспериментальным способом определяется динамика пучка до ИМ1-160 с целью минимизации потерь пучка. При этом находятся параметры пучка из отмеченного массива, позволяющие в зависимости от градиентов магнитного поля в квадрупольных линзах Д1-ИК и Д2-ИК получить требуемые характеристические параметры пучка в фазовых поперечных плоскостях на изотопной мишени.

При изменении токов квадрупольных линз на канале транспортировки пучка в ИК в диапазонах

$$I(Q1) = I(Q2) \in [10, 90] \text{ А,}$$

$$I(Q3) = I(Q4) \in [10, 90] \text{ А}$$

с шагом 0,5 А и учетом дисперсии $D(s)$ рассчитывается массив поперечных фазовых координат пучка на входе в поворотный магнит ИМ1-160, удовлетворяющий заданным параметрам пучка на мишени:

$$\begin{aligned} x_{rms} = y_{rms} = 2,5 \text{ мм}, \\ \alpha_x = \alpha_y = 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Вид данного массива приведен на Рис. 3.

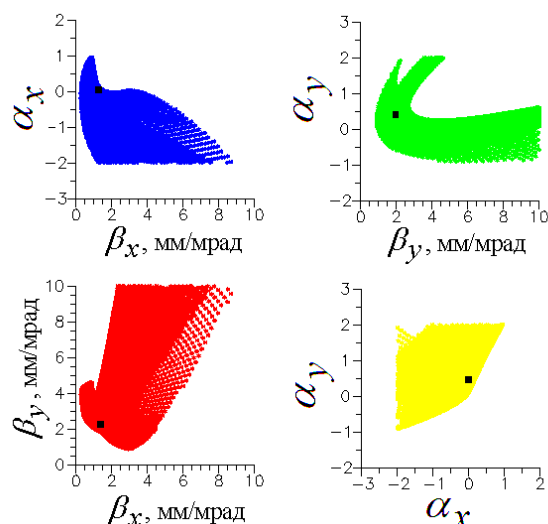


Рис. 3. Вид характеристических параметров пучка в поперечных фазовых плоскостях массива решений на входе магнита ИМ1-160 для параметров (3) пучка на изотопной мишени

На данном рисунке черным маркером отмечено выбранное рабочее решение. Для него была реализована динамика пучка на согласующем участке до

поворотного магнита ИМ1-160 с минимизацией максимального размера пучка на данном участке.

В дальнейшем для расчетов выбраны следующие начальные характеристические параметры пучка в поперечных фазовых плоскостях перед ИМ1-160:

$$\begin{aligned} \alpha_x &= 0,027; \\ \beta_x &= 1,44 \text{ мм/мрад}; \\ \varepsilon_{x rms} &= 1,00 \pi \cdot \text{мм}; \\ \alpha_y &= 0,37; \\ \beta_y &= 2,14 \text{ мм/мрад}; \\ \varepsilon_{y rms} &= 1,01 \pi \cdot \text{мм}. \end{aligned} \quad (4)$$

3. КОНТРОЛЬ И ФОРМИРОВАНИЕ ПУЧКА В КАНАЛЕ ИК

Результаты одной из серий измерений профилей пучка в двух поперечных плоскостях приведены в Табл. 1. При измерениях в квадрупольных линзах первого дублета Д1-ИК устанавливались токи

$$I(Q1) = I(Q2) = 30 \text{ А.}$$

В приведенной таблице используются следующие обозначения: $I(Q3)$ – ток в первой квадрупольной линзе дублета Д2-ИК. Отметим, что данная линза фокусирует в горизонтальном направлении; $I(Q4)$ – ток во второй квадрупольной линзе дублета Д2-ИК. Данная линза фокусирует в вертикальном направлении; $x_{экспер}$ и $y_{экспер}$ – экспериментальные данные среднеквадратичных размеров пучка в поперечных направлениях в точке размещения многопроволочного датчика МДПП; $x_{корр}$ – скорректированный с учетом дисперсии среднеквадратичный размер пучка в точке размещения многопроволочного датчика МДПП:

$$x_{корр} = \sqrt{(x_{экспер})^2 - D_{МДПП}^2 \cdot \delta^2}, \quad (5)$$

где $D_{МДПП}$ – расчетное значение дисперсионной функции в точке размещения датчика МДПП; δ – среднеквадратичный относительный импульсный разброс в пучке (см. (1)). В дальнейших расчетах в первом приближении полагается $\delta \approx 1 \cdot 10^{-3}$; $x_{расчет}$ и $y_{расчет}$ – рассчитанные по формулам (1) и (2) значения среднеквадратичных размеров пучка в двух поперечных направлениях на датчике МДПП с учетом влияния дисперсионной функции, выпол-

ненные при начальных характеристических параметрах пучка (4) в поперечных фазовых плоскостях.

На Рис. 4 приводятся рассчитанные конфигурации эмиттансов пучка в двух поперечных направлениях перед квадрупольным дублетом Д2-ИК по результатам обработки данных из Табл. 1.

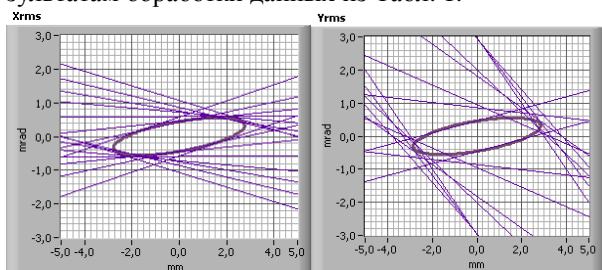


Рис. 4. Восстановленные по экспериментальным данным фазовые эллипсы пучка на входе в Д2-ИК

В Табл. 2 приведены рассчитанные характеристические фазовые параметры пучка для эллипсов, показанных на Рис. 4 в поперечных плоскостях перед дублетом Д2-ИК.

Таблица 2

β_x , мм/мрад	6,2202
α_x	-0,7375
$\varepsilon_{x\text{norm}}$, $\pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$	0,7078
β_y , мм/мрад	6,2306
α_y	-0,6793
$\varepsilon_{y\text{norm}}$, $\pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$	0,7454

По результатам экспериментов строится следующая группа рисунков:

- на Рис. 5 приведены топокарты значения дисперсионной функции на датчике МДПП и изотопной мишени в зависимости от токов в квадрупольных линзах дублета Д2-ИК. Эти данные используются в дальнейшем для получения значений $x_{\text{расчет}}$ на датчике МДПП для параметров пучка (4) на входе первого поворотного магнита ИМ1-160;

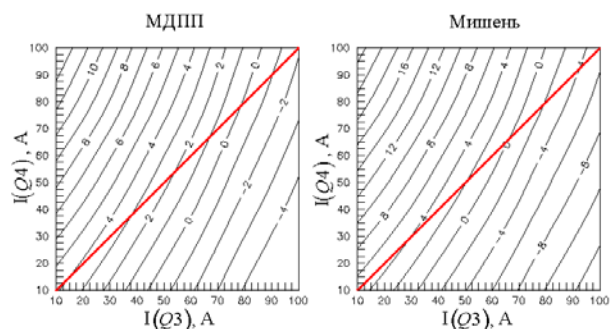


Рис. 5. Уровни постоянных значений дисперсии (м) на датчике МДПП и мишени изотопного комплекса в зависимости от токов $I(Q3)$ и $I(Q4)$ квадрупольных линз дублета Д2-ИК

- на Рис. 6 представлены топокарты постоянных уровней для расчетных значений $x_{\text{расчет}}$ и $y_{\text{расчет}}$ в горизонтальной (а), вертикальной (б) и совмещенной (в) плоскостях.

На Рис. 5 и 6 введена следующая цветовая информация:

- красная линия – работа изотопного канала до разделения питания квадрупольных линз дублета Д2-ИК, т.е. для $I(Q3)=I(Q4)$ [1];

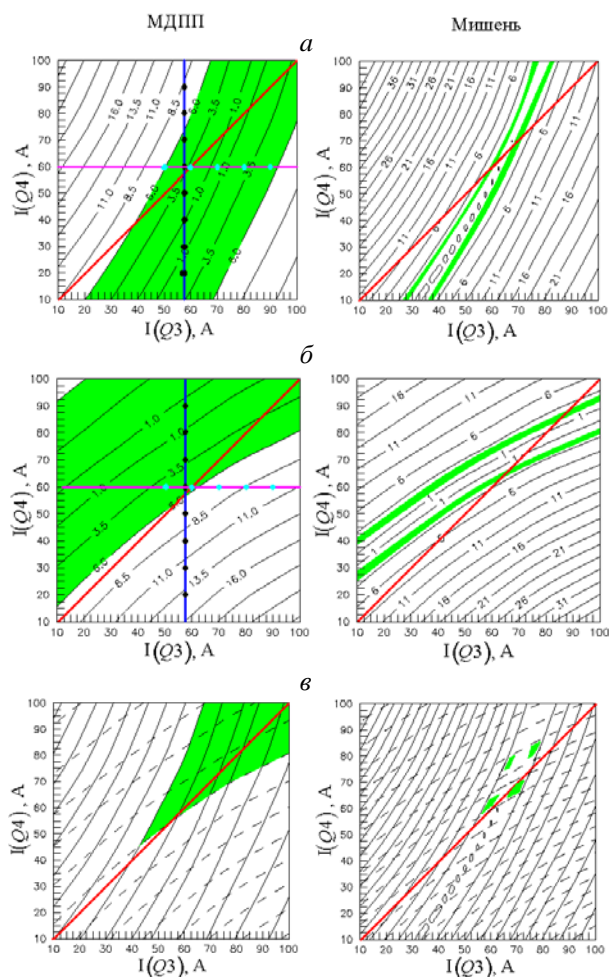


Рис. 6. Уровни постоянных значений среднеквадратичных размеров пучка (мм) в горизонтальной (а) и вертикальной (б) плоскостях и их совмещенный вариант (в) на МДПП и мишени ИК в зависимости от токов квадрупольных линз дублета Д2-ИК

- зеленая зона для топокарт на МДПП –
Рис. 6,а: $x_{rms} \leq 6$ мм;
Рис. 6,б: $y_{rms} \leq 6$ мм;
Рис. 6,в: $x_{rms} \leq 6$ мм, $y_{rms} \leq 6$ мм;
- зеленая зона для топокарт на мишени –
Рис. 6,а: $2 \text{ мм} \leq x_{rms} \leq 3 \text{ мм}$;
Рис. 6,б: $2 \text{ мм} \leq y_{rms} \leq 3 \text{ мм}$;
Рис. 6,в: $2 \text{ мм} \leq x_{rms} \leq 3 \text{ мм}$, $2 \text{ мм} \leq y_{rms} \leq 3 \text{ мм}$;
- вертикальная синяя линия с черными маркерами на Рис. 6,а и Рис. 6,б для МДПП – реализация измерений из Табл. 1.

Наличие однозначного соответствия между данными на МДПП и мишени (см. Рис. 6) позволяет контролировать параметры пучка на изотопной мишени по измерениям на датчике МДПП.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлен современный алгоритм формирования пучка на мишени изотопного комплекса линейного ускорителя ИЯИ РАН, использующий экспериментальные данные и расчетные результаты, позволяющий получать пучки на мишени с желаемыми характеристическими параметрами в поперечных фазовых плоскостях. Алгоритм применим в широком диапазоне желаемых характеристических параметров пучка на изотопной мишени.

Используемый в настоящее время метод формирования и контроля пучка на мишени ИК, в отличие от организации динамики пучка и недостаточного качества измерений ранее [1], имеет следующие новые возможности:

- полный участок исследуемой измерительно-формирующей структуры разбит на две части, каждая из которых имеет свое функциональное назначение;
- участок согласования, который является частью линейного ускорителя, применяется для достижения наилучшей динамики пучка с наименьшими потерями или с малыми поперечными размерами на данном участке, а также получения характеристических параметров пучка в поперечной фазовой плоскости из значительного массива предлагаемых данных на отводе пучка в канал транспортировки ИК;
- формируется массив характеристических параметров пучка в поперечной фазовой плоскости

на отводе пучка в канал транспортировки ИК, любой набор данных из которого позволяет получить заданные характеристические параметры пучка на изотопной мишени;

- участок канала транспортировки ИК дает возможность контролировать параметры пучка на изотопной мишени и изменять их в значительных пределах;
- датчик МДПП на участке ИК позволяет проводить надежные измерения характеристических параметров пучка в обеих поперечных фазовых плоскостях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. С.Е. Брагин, И.А. Васильев, О.М. Володкевич, О.В. Грехов, Ю.В. Киселев, А.Н. Мирзоян, В.А. Моисеев, А.В. Фещенко. Контроль и формирование пучка протонов линейного ускорителя ИЯИ РАН на мишени изотопного комплекса // *Вопросы атомной науки и техники. Серия "Ядерно-физические исследования"* (66). 2010, №2, с. 96-100.
2. S.E. Bragin, V.A. Moiseev. Various Matrix Formalism to Design Ion Linear Accelerators // *Proceedings of XXI Russian Particle Accelerator Conference, Zvenigorod, Russia; accelconf.web.cern.ch/accelconf/RuPAC'08, 2008, p. 57-60.*

Статья поступила в редакцию 04.09.2013

UPGRADED METHOD OF BEAM FORMATION ON THE TARGET OF ISOTOPE COMPLEX AT INR LINAC

S.E. Bragin, O.M. Volodkevich, O.V. Grekhov, Yu.V. Kiselev, A.N. Mirzoyan, V.N. Mikhailov, V.A. Moiseev, A.V. Feschenko

Optimization of the proton beam parameters at the matching area located just before region of beam extraction to the transportation channel of the isotope complex of INR linac permits to get the controllable transverse beam parameters at the entrance of this channel for further beam dynamics optimization and formation of the desired beam configuration on the isotope target. Using of multiwire profilometer and separated control of the lenses in last quadrupole doublet at the transportation channel enables to form a proton beam on the target in wide range of transverse beam parameters. The simulation and experimental results of beam formation and monitoring on the target are presented.

РОЗВИТОК МЕТОДУ ФОРМУВАННЯ ТА КОНТРОЛЮ ПУЧКА НА МІШЕНІ ІЗОТОПНОГО КОМПЛЕКСУ ЛІНІЙНОГО ПРИСКОРЮВАЧА ІЯД РАН

С.Є. Брагін, О.М. Володкевич, О.В. Грехов, Ю.В. Кисельов, А.Н. Мирзоян, В.Н. Михайлов, В.А. Моїсєєв, А.В. Фещенко

Оптимізація параметрів пучка протонів на ділянці узгодження безпосередньо перед відведенням пучка в канал транспортування ізотопного комплексу лінійного прискорювача ІЯД РАН дозволяє отримати на вході в канал контрольовані параметри пучка в поперечних фазових площинах з метою подальшої оптимізації для формування необхідних лінійних і кутових розмірів пучка на ізотопній мішені. Використання багатодітного профілометра і роздільного управління лінзами останнього квадрупольного дублета на каналі дає можливість формувати пучок протонів на мішені в широкому діапазоні його параметрів у поперечному фазовому просторі. Представлені розрахунково-експериментальні результати сучасного методу формування та контролю характеристик пучка на мішені.