

P18-2006-44

М. Райчан^{1,2}

РАСЧЕТ ВЛИЯНИЯ КОЛЛИМАТОРА
НА ПРОФИЛЬ ПРОТОННОГО ПУЧКА

¹Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

²Словацкий технический университет, Братислава

Райчан М.

P18-2006-44

Расчет влияния коллиматора на профиль протонного пучка

Для лечения онкологических и некоторых других заболеваний успешно используются терапевтические протонные пучки. Параметры пучков для терапевтических целей необходимо модифицировать. Моделировать прохождение протонного пучка через систему формирования позволяет созданная компьютерная программа «Track». Рассеяние протонов моделировалось на основе теории Мольера, потери энергии — на основе теории Вавилова. Коллиматор, являясь одним из конечных элементов системы формирования пучка, ограничивает протонное поле, необходимое для облучения пациента. При коллимации протоны сталкиваются со стенками коллиматора, рассеиваются и вызывают неоднородность поля пучка. Экспериментально и с помощью моделирования было исследовано влияние коллиматоров из сплава Cerrobend, меди и железа на протонное поле пучка. Экспериментально измеренные и смоделированные профили пучка хорошо совпадают.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2006

Rajcan M.

P18-2006-44

Calculation of Collimator Effect on the Proton Beam Profile

Proton therapeutic beams are successfully used for treating cancer diseases. Beam parameters need to be modified for the purpose of proton therapy. In order to model the proton beam transport through the beam forming system, the computer code «Track» has been developed. Proton scattering has been simulated on the basis of the Molière theory and energy losses on the basis of the Vavilov theory. The collimator, usually the last component of the beam forming system, shapes the proton field used to irradiate the patient. While being collimated, protons hit the collimator walls, scatter and contribute to the proton field inhomogeneity. The simulation of the collimator influence on the proton field has been performed and its results have been compared with the experimental data. Cerrobend, copper and iron collimators have been examined. Experimental and simulated beam profiles are in a good agreement.

The investigation has been performed at the Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2006

ВВЕДЕНИЕ

В процессе лечения некоторых видов онкологических заболеваний успешно используют терапевтические протонные пучки. К выведенным из ускорителя пучкам предъявляются специальные требования, регламентированные их медицинским назначением. При формировании терапевтического пучка используют рассеивающие материалы, замедлители, дрейфовые промежутки, коллиматоры. С целью моделирования этих систем разработана компьютерная программа «Track» [1, 2]. Программа позволяет моделировать прохождение протонного пучка через систему формирования и оптимизировать эту систему. Программа дополнена вычислением энергетического спектра пучка в результате его замедления в среде. В работе проведена экспериментальная проверка результатов моделирования. Исследовалось влияние коллиматора на форму профиля протонного пучка.

Параметры входящего протонного пучка определяют диаграммы эмиттанса в горизонтальной и вертикальной плоскости. Пучок в алгоритме программы представлен ансамблем частиц, каждая с координатами позиции и угловыми отклонениями. Профиль пучка имеет форму распределения Гаусса.

Программа моделирует угловое рассеяние протонов на основе теории многократного кулоновского рассеяния Мольера. В результате рассеяния частица отклоняется относительно предыдущего направления движения на угол θ . В программе вычисляется инверсионная кумулятивная функция распределения Мольера, из которой каждой частице присвоен угол отклонения θ [1, 2].

Разброс потери энергии моделировался в программе на основе теории Вавилова [3]. В работе описан алгоритм вычисления функции распределения энергетических потерь. Заряженная частица при прохождении через вещество испытывает многократное взаимодействие с атомами вещества, в результате чего возникают статистические флуктуации энергетических потерь частиц. Функция распределения энергетических потерь f_v является функцией параметров β , κ и параметра Вавилова λ_v [4]:

$$f_v(t, \Delta) = \frac{1}{\pi E_{\max}} \exp(\kappa(1 + 0,5772\beta^2)) \int_0^{\infty} \exp(\kappa \cdot f_1(y)) \times \\ \times \cos(y\lambda_v + \kappa \cdot f_2(y)) dy, \quad (1a)$$

$$f_1(y) = \beta^2 [\ln(y) - Ci(y)] - \cos(y) - y \cdot Si(y), \quad (1б)$$

$$f_2(y) = y [\ln(y) - Ci(y)] + \sin(y) + \beta^2 \cdot Si(y), \quad (1в)$$

$$Si(y) = \int_0^y \frac{\sin x}{x} dx, \quad Ci(y) = 0,5772 + \ln y + \int_0^y \frac{\cos x - 1}{x} dx, \quad (1r)$$

где β — отношение скорости заряженной частицы к скорости света в вакууме; E_{\max} — максимальная энергия, переданная налетающей частицей свободному электрону в одном столкновении. Параметр κ определяет режим столкновения:

$$\kappa = \frac{\xi}{E_{\max}}, \quad (2)$$

$$\xi = 0,1534 \frac{z^2 Z}{\beta^2 A} t \text{ [МэВ]}, \quad (3)$$

где z — заряд налетающей частицы; Z — атомный номер и A — атомный вес среды толщиной t , через которую проникает частица. Параметр Вавилова λ_v включает в себя актуальную Δ и среднюю $\bar{\Delta}$ потерю энергии частицы при прохождении через вещество:

$$\lambda_v = \kappa \left(\frac{\Delta - \bar{\Delta}}{\xi} - 1 + 0,5772 - \beta^2 \right). \quad (4)$$

Для $\kappa \ll 1$ распределение энергии имеет «хвост» в направлении к большим потерям энергии, распределение описано теорией Ландау [5]. Для $\kappa > 1$ распределение энергии приближают распределением Гаусса. Расширенная теория Вавилова включает в себя распределения Ландау и Гаусса в краевых областях [6].

В данной работе изучалось влияние материала коллиматора на форму поперечного распределения пучка. Влияние коллиматора промоделировано при помощи актуализированной версии программы «Track». В работе описывается методика расчета, примененная в программе. Результаты моделирования сравнены с экспериментом.

1. АЛГОРИТМ ВЫЧИСЛЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВАВИЛОВА

В зависимости от значения величины κ определен интервал значений параметров Вавилова λ_v , для которых вычисляются энергетические распределения (1a). Программа вычисляет энергетические распределения для энергии протонов от 0,1 до 300 МэВ. Эквивалент значения β от 0,015 до 0,65.

1.1. Верхняя граница интегрирования. Интегрируемая функция анализирована численными методами. Интеграл (1a) вычислен до значения верхней границы интегрирования $y_{\max} \approx 2,1 + 4,4/\kappa$, при котором значение выражения $\exp(\kappa f_1(y_{\max}))$ меньше чем 1/1000 от максимального значения $\exp(\kappa f_1(0))$. Верхняя граница интегрирования y_{\max} нелинейно возрастает с уменьшением параметра κ .

1.2. Шаг интегрирования. В вычислении интеграла (1а) применен метод Симпсона. Интеграл (1а) можно вычислить с большой точностью, если значения интегрируемой функции известны в достаточном количестве точек. В методе Симпсона интегрируемая функция приближается параболическими кривыми между каждыми по очереди идущими вычисленными тремя точками функции. Необходимо узнать плотность вычисленных точек. Интегрируемую функцию в выражении (1а) запишем следующим образом:

$$\exp(\kappa \cdot f_1(y)) \cdot \cos(y\lambda_v + \kappa \cdot f_2(y)) = \exp(\kappa \cdot f_1(y)) \cdot \cos(\omega(y) \cdot y), \quad (5a)$$

$$\omega(y) = \lambda_v + \kappa \cdot g(y), \quad (5б)$$

$$g(y) = \ln y - Ci(y) + \frac{\sin y}{y} + \beta^2 \frac{Si(y)}{y}. \quad (5в)$$

Функция $\exp(\kappa \cdot f_1(y))$ не меняет резко значения. Функция $\cos(\omega(y) \cdot y)$ — наиболее существенно изменяющаяся при больших значениях функции $|\omega(y)|$, которая зависит от параметра λ_v и выражения $\kappa \cdot g(y)$. Функция $g(y)$ возрастающая, максимального значения на интервале $(0; y_{\max})$ достигает при $y = y_{\max}$. Максимум функции $|\omega(y)|$ на интервале $(0; y_{\max})$, при котором подынтегральная функция наиболее колеблется,

$$|\omega(y)|_{\max} = \lambda_v + \kappa \cdot g(y_{\max}) \quad \text{для } \lambda_v \geq -\frac{\kappa \cdot g(0) + \kappa \cdot g(y_{\max})}{2}, \quad (6a)$$

$$|\omega(y)|_{\max} = |\lambda_v + \kappa \cdot g(0)| \quad \text{для } \lambda_v < -\frac{\kappa \cdot g(0) + \kappa \cdot g(y_{\max})}{2}, \quad (6б)$$

где $g(0) \cong 1 - 0,5772 + \beta^2$.

Оценка наименьшего периода колебаний подынтегральной функции

$$T_{\min} = \frac{2\pi}{|\omega(y)|_{\max}}. \quad (7)$$

Подынтегральная функция вычислена на интервале $(0; y_{\max})$ в отдельных точках с шагом $T_{\min}/40$. Значения $[\ln(y) - Ci(y)]$ и $Si(y)$ (см. (1г)) с целью ускорить вычисление определены в табличной форме и сохранены в файлах.

2. РАЗДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРА ПУЧКА

Процесс вычисления распределения для энергии каждого протона очень продолжительный, с чем связаны потери преимуществ быстрого моделирования. Поэтому энергетический спектр пучка разделен на интервалы. Энергетический спектр пучка протонов анализировался на входе в каждый элемент. Распределения Мольера (угловые распределения) и Вавилова (энергетические распределения) определены для всех энергетических интервалов

спектра пучка при конкретном элементе. Вычисление распределения выполнено только для средней энергии интервала с шириной 0,1 МэВ. Например, протон с энергией 70,33 МэВ лежит в интервале (70,3–70,4) МэВ, и распределения вычислены для энергии 70,35 МэВ (см. рис. 1). При прохождении элемента системы протон приобретает новое значение энергии и углового отклонения посредством инверсионной кумулятивной функции распределения [7] и генератора случайных чисел [8].

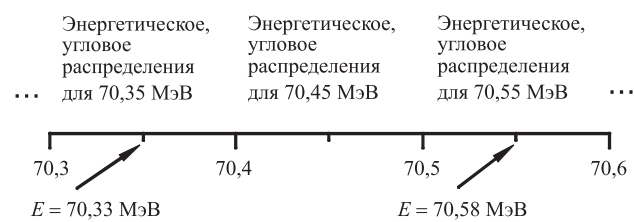


Рис. 1. Интервалы энергетического спектра протонного пучка с шириной 0,1 МэВ и сопряжение энергетических и угловых распределений к протону в зависимости от его кинетической энергии

Посредством программы «Track» моделировались энергетические спектры протонного пучка. Моноэнергетический пучок протонов с энергией 175 МэВ проходит через слой плексигласа разной толщины. Проанализированные энергии 200 000 протонов образуют энергетические спектры, которые показаны на рис. 2.

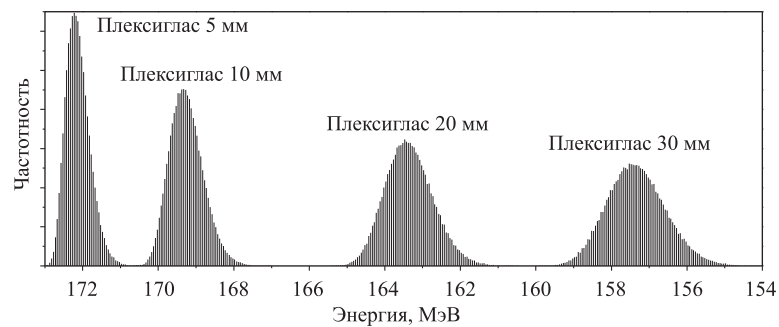


Рис. 2. Результат моделирования по программе «Track» энергетических спектров моноэнергетического пучка протонов с энергией 175 МэВ после прохождения через слой плексигласа толщиной 5, 10, 20, 30 мм

3. ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММЫ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ЭФФЕКТА КОЛЛИМАТОРА

Программа «Track» моделирует прохождение протонного терапевтического пучка через систему формирования. Формированием достигается необходимое пространственное дозное распределение пучка в теле пациента. На пути пучка находятся разные материалы, вызывающие в основном эффект углового рассеяния и энергетических потерь протонов, моделирование которых включено в программу «Track».

Коллиматоры на пути пучка выполняют несколько функций. Поглощают часть пучка, не попадающую в апертуру коллиматора, которая не вносит вклад в терапевтическое поле в изоцентре, на расстоянии от пациента. Поглощенные частицы активируют материал коллиматора, поэтому количество частиц, захваченных коллиматором в близости от пациента, должно быть минимальным. Последний коллиматор на пути пучка называют формирующим. Он определяет размер и форму протонного пучка на облучаемой мишени. Толщина коллиматора должна быть достаточной для полного замедления пучка [9]. В качестве материала для коллиматора обычно используются медь, железо и легкоплавкий сплав Cerrobend, который состоит из 50 % Bi, 26,7 % Pb, 13,3 % Sn, 10 % Cd.

Влияние узкого коллиматора на профиль протонного пучка с энергией 150 МэВ было измерено на фазотроне в Лаборатории ядерных проблем им. В. П. Дзелепова ОИЯИ. Схема экспериментальной установки показана на рис. 3. Протонный пучок проходил через вакуумное окно, два монитора

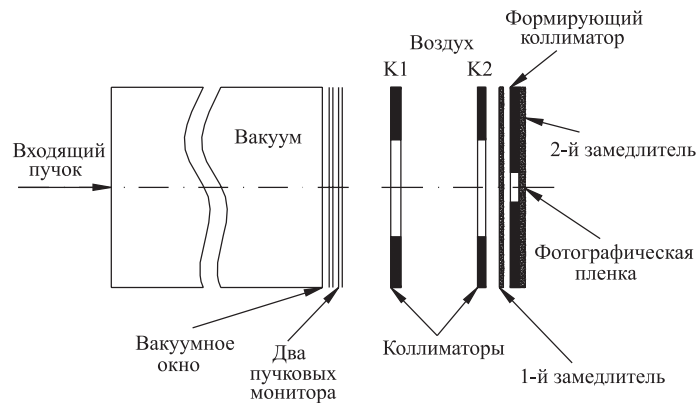


Рис. 3. Экспериментальное измерение влияния коллиматора на проходящий протонный пучок

пучка, воздух, первый замедлитель из плексигласа толщиной 40 мм. Коллимацию пучка обеспечивают коллиматоры K1, K2 размерами 95 × 95 мм

и последний коллиматор, формирующий поле диаметром 30 мм, который изготовлен из сплава Cerrobend. Измерения поперечных дозных распределений пучка проводились рентгеновскими фотопленками «KODAK X-Omat V» [10]. Между облучаемыми пленками и формирующим коллиматором устанавливался замедлитель из плексигласа толщиной 0, 2, 14, 54 мм. Величины поглощенных доз на входе пучка в коллиматор во всех измерениях были 20 сГр. В результате обработки получены численные значения вертикальных и горизонтальных профилей пучка.

Этот же эксперимент влияния коллиматора на профиль пучка был промоделирован программой «Task». Моделирование начато в месте, где известны фазовые диаграммы эмиттанта пучка. Формирующий коллиматор представлен в модели последовательностью рассеивающих элементов с круглой апертурой диаметром 30 мм и толщиной 1 мм, как показано на рис. 4.

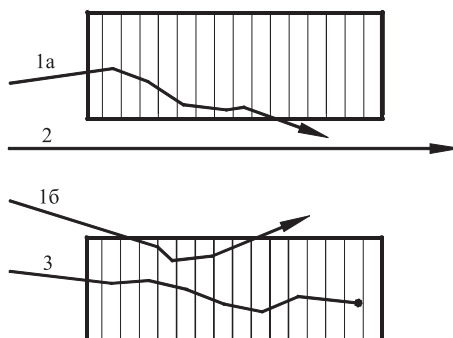


Рис. 4. Коллиматор смоделирован последовательностью слоев одинаковой толщины. Протоны в стенках коллиматора подтормаживаются и рассеиваются обратно в центральную область пучка (1а, 1б), проходят через апертуру коллиматора (2) и останавливаются в стенках коллиматора (3)

Интенсивность протонного поля в краевой области повышают протоны, рассеянные и подторможенные в стенках коллиматора (рис. 5). Эти протоны направлены в сторону центральной области поля.

Профили пучка, полученные в результате симуляции по программе «Task», сравнивались с измеренными профилями (рис. 6). С увеличением расстояния от выхода формирующего коллиматора неоднородность пучка уменьшается из-за двух эффектов:

- рассеянные в стенках коллиматора протоны имеют меньшую энергию по сравнению с протонами в центральной области поля пучка и быстрее замедляются в плексигласе;
- рассеянные в стенках протоны направлены в сторону центральной области пучка, что снижает краевую интенсивность пучка.

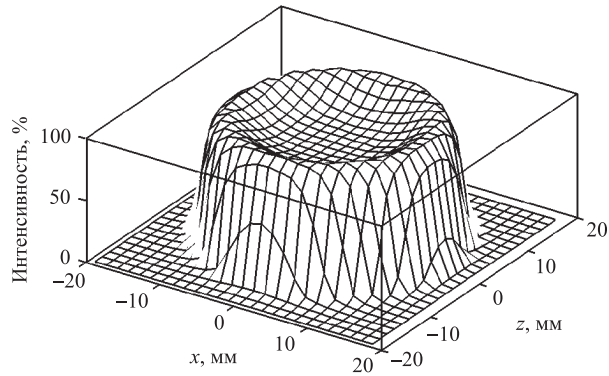


Рис. 5. Интенсивность протонного пучка после коллимации непосредственно за коллиматором. Результат моделирования по программе «Track»

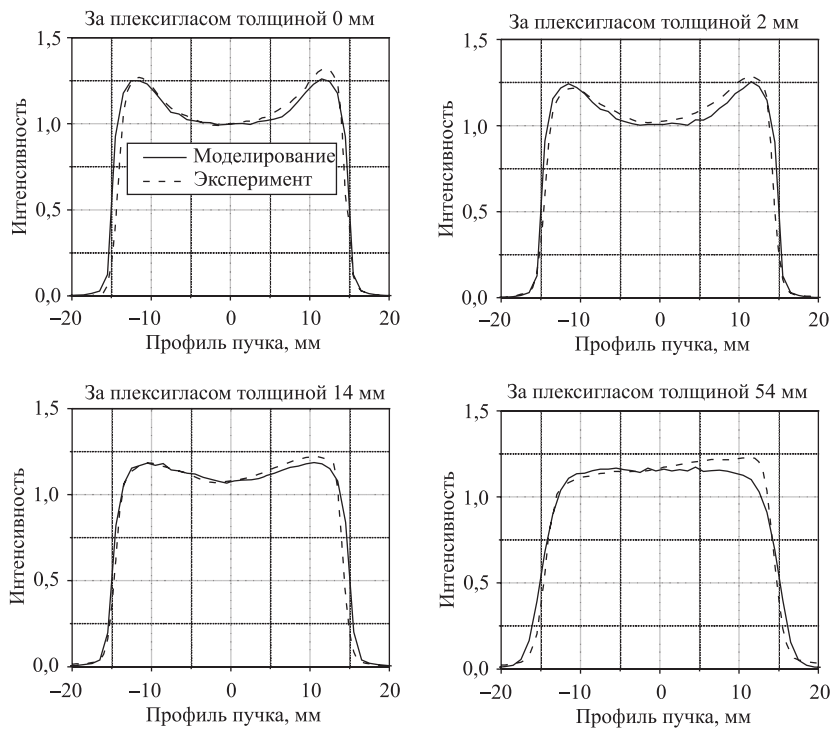


Рис. 6. Сравнение профилей протонного пучка, проходящего через коллиматор из сплава Сеггобэнд, полученных экспериментально и моделированием в программе «Track». За формирующим коллиматором устанавливался замедлитель из плексигласа толщиной 0, 2, 14, 54 мм

На всех графиках симулированные и измеренные профили пучка нормированы в точке на оси пучка.

Из рис. 6 видно хорошее совпадение измеренных и рассчитанных по программе «Track» профилей пучка. С увеличением расстояния от стенки коллиматора улучшается однородность пучка. Отношение максимальной интенсивности на краях профиля пучка к центральной интенсивности с увеличением расстояния от коллиматора падает (см. таблицу).

Сравнение моделированных и экспериментально измеренных профилей протонного пучка после коллимации за замедлителями разной толщины. Показано отношение среднего значения двух максимальных интенсивностей на краях профиля к центральной интенсивности

t, мм	Отношение максимальной интенсивности к центральной	
	«Track»	Эксперимент
0	1,26	1,29
2	1,24	1,22
14	1,11	1,11
54	—	—

Меньшую неоднородность профиля пучка получаем с коллиматорами из меди или железа. При условиях, таких же, как в вышеописанном эксперименте, были симулированы профили пучка, проходящего через медный и железный коллиматор (рис. 7, 8). Железо и медь имеют похожее влияние на

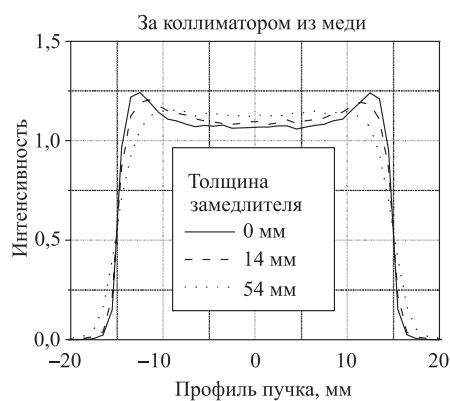


Рис. 7. Профили протонного пучка после коллимации, полученные моделированием по программе «Track». За формирующим коллиматором из меди устанавливался замедлитель из плексигласа толщиной 0, 14, 54 мм

проходящий пучок. Отношение максимальной интенсивности к центральной сразу на выходе коллиматора составляет 1,16 для меди, 1,19 — для железа и 1,26 — для сплава Cerrobend.

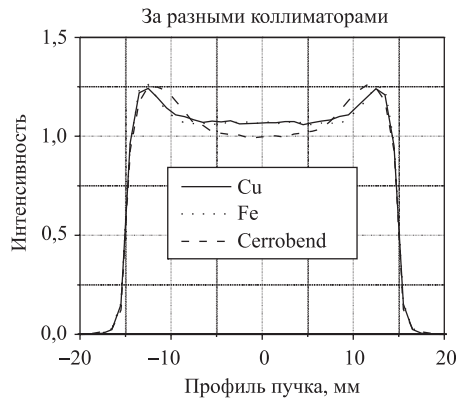


Рис. 8. Сравнение профилей протонного пучка непосредственно за коллиматором из меди, железа и сплава Cerrobend. Профили получены моделированием по программе «Track»

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Программа «Track», моделирующая транспортировку (формирование) терапевтического протонного пучка, дополнена алгоритмом, вычисляющим распределения энергетических потерь. Расчет основан на теории Вавилова. Энергетический спектр пучка вдоль системы сначала проанализирован и разделен на интервалы шириной 0,1 МэВ. Для каждого интервала вычислены распределения энергетических потерь и угловых отклонений протонов. Угловые отклонения вычислены на основе теории многократного кулоновского рассеяния Мольера. При расчете методом Монте-Карло каждый протон при прохождении через вещество замедляется и приобретает новое угловое отклонение.

Одним из применений программы «Track» является моделирование профилей пучка. Выбран эксперимент влияния коллиматора на профиль проходящего пучка. Эффект коллиматора, отражение протонов от стенок коллиматора в поле пучка, приводит к появлению неоднородности профиля пучка. Моделированные профили хорошо совпадают с экспериментально измеренными профилями. В симуляции сравнены коллиматоры из меди, железа и сплава Cerrobend. Наибольшая неоднородность профиля пучка за коллиматором из сплава Cerrobend. Неоднородность профиля пучка увеличивается

с ростом заряда Z материала коллиматора. Возрастание дозы на границе апертуры коллиматора обусловлено частицами, рассеянными в стенках коллиматора и имеющими энергию ниже, чем в основном пучке. Краевая доза быстро уменьшается с глубиной вещества.

Благодарности. Поддержка в инициализации этой работы была оказана ОИЯИ и Словацким министерством образования. Особенно хотелось бы выразить благодарность А. Г. Молоканову и И. В. Мирохину за помощь автору при проведении этой работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Райчан М. «TRACK» — монте-карло-код, моделирующий системы формирования протонного терапевтического пучка. Сообщение ОИЯИ Р18-2005-30. Дубна, 2005.
2. Rajcan M., Pavlovic M. Track – a Monte Carlo computer code to assist design of scattering and collimating systems for proton therapy beams // Rep. Pract. Oncol. Radiother. 2004. V. 9, No. 6. P. 235–241.
3. Вавилов П. В. Ионизационные потери тяжелых частиц больших энергий // ЖЭТФ. 1957. Т. 32, № 4. С. 920–923.
4. Bichsel H., Saxon R. P. Comparison of calculational methods for straggling in thin absorbers // Phys. Rev. A. 1975. V. 11. P. 1286–1296.
5. Ландау Л. Д. О потерях энергии быстрыми частицами на ионизацию // J. Phys. (USSR). 1944. V. 8. P. 201.
6. Rotondi A., Montagna P. Fast Calculation of Vavilov Distribution // Nucl. Instr. Meth. B. 1990. V. 74. P. 215–223.
7. Bielajew A. F. Fundamentals of Monte Carlo Method for Neutral and Charged Particle Transport. The University of Michigan, 2001.
8. L'Ecuyer P. Good Parameter Sets for Combined Multiple Recursive Random Number Generators // Shorter Version in Operations Research. 1999. V. 47, No. 1. P. 159–164.
9. Chu W. T., Ludewigt B. A., Renner T. R. Instrumentation for Treatment of Cancer Using Proton and Light-Ion Beams // Reviews of Scientific Instrument. 1993. V. 64. P. 2055–2122.
10. Gaevsky V. N. et al. The Dose Distribution Measurements of Clinical Proton Beams // Radiotherapy and Oncology. 2002. V. 64, Suppl. 1. P. S204.

Получено 3 апреля 2006 г.

Редактор *Е. В. Сабеева*

Подписано в печать 16.06.2006.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,63. Уч.-изд. л. 0,73. Тираж 260 экз. Заказ № 55375.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@pds.jinr.ru

www.jinr.ru/publish/