

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ПРОТОННЫХ ПУЧКОВ ПЕРЕМЕННОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ ЭЛЕКТРОНИКИ И ДРУГИХ ПРИЛОЖЕНИЙ НА СИНХРОЦИКЛОТРОНЕ ПИЯФ

С. А. Артамонов, В. А. Тонких

Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова

Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Гатчина, Россия

На основе метода Монте-Карло выполнено моделирование дополнительных протонных пучков переменной энергии для испытаний радиационной стойкости электроники и других приложений на синхроциклотроне SC-1000 ПИЯФ. Установлено, что реализованный ранее на SC-1000 спектр пучков переменной энергии $\sim 62, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000$ МэВ может быть расширен в два раза новыми пучками с энергиями $\sim 75, 150, 250, 350, 450, 550, 650, 750, 850, 950$ МэВ с использованием существующего медного поглотителя без его механической переделки. Проведены детальные исследования, позволяющие придать новым пучкам свойства, необходимые для выполнения испытаний. Получены основные теоретические параметры для каждого нового пучка. Показана возможность проведения испытаний на SC-1000 с шагом 50 МэВ по энергии.

Based on the Monte Carlo method, additional proton beams have been simulated by variable energy for testing the radiation resistance of electronics and other applications at the SC-1000 PNPI synchrocyclotron. It was established that the spectrum of beams of variable energy, realized earlier at SC-1000, $\sim 62, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000$ MeV, can be doubled by new beams with energies $\sim 75, 150, 250, 350, 450, 550, 650, 750, 850, 950$ MeV, using the existing copper absorber without mechanical alteration. Detailed studies have been carried out to give the new beams the properties necessary for testing. The basic theoretical parameters for each new beam are obtained. The possibility of conducting tests at the SC-1000 with a step of 50 MeV in energy is shown.

PACS: 29.20.dg

ВВЕДЕНИЕ

Протонный синхроциклотрон SC-1000 с энергией протонов 1 ГэВ и интенсивностью выведенного пучка 1 мкА является одной из базовых экспериментальных установок ПИЯФ НИЦ «Курчатовский институт». Синхроциклотрон введен в эксплуатацию в 1970 г. и за это время был значительно модернизирован и дополнен большим набором уникальных физических устройств [1]. В настоящее время экспериментальный

комплекс SC-1000 активно используется для фундаментальных исследований в области физики элементарных частиц, для изучения строения атомного ядра и механизмов ядерных реакций, а также физики твердого тела. Весьма широко SC-1000 привлекается и для решения разнообразных проблем прикладной физики, ядерной медицины и биологии.

Относительно недавно на базе SC-1000 в ПИЯФ НИЦ КИ совместно с НИИ космического приборостроения был создан универсальный центр испытаний электронных компонентов для нужд авиации, космоса и других приложений [2]. Центр состоит из одного нейтронного (IS NP/GNEIS) и двух протонных стендов (IS SC-1000 и IS OP-1000). На первом испытательном стенде IS SC-1000 энергия протонов фиксирована и равна 1000 МэВ. На нем выполнено огромное число фундаментальных и прикладных работ [1].

На втором, достаточно новом стенде IS OP-1000 [3], энергию протонов можно устанавливать равной $\sim 62, 100, 200, \dots, 1000$ МэВ с шагом 100 МэВ с помощью дистанционно управляемого медного деградера (поглотителя) переменной длины. Этот наборный поглотитель сначала был рассчитан [3], а затем изготовлен и испытан в работе. При необходимости испытаний он может быстро устанавливаться на соответствующий тракт транспортировки пучка. Поглотитель состоит из 11 медных дисков диаметром 80 мм с различными толщинами. Комбинируя эти диски, можно дистанционно устанавливать требуемую энергию протонного пучка из указанного набора с точностью менее чем 3%. Таким образом на стенде IS OP-1000, благодаря разработанной в ПИЯФ максимально автоматизированной процедуре облучения ЭКБ, удалось создать быстро настраиваемые пучки переменной энергии из указанного перечня (с шагом 100 МэВ) и с целым набором наперед заданных свойств. В частности, для радиационных испытаний удалось обеспечить ток пучков с плотностью потоков $10^5\text{--}10^8 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ и с 10%-й областью однородности пучка не менее чем 25 мм в диаметре. Также удалось обеспечить возможность изменения температуры на объекте испытаний от +25 до +125 °С, создав для этой цели специальную тепловую камеру.

Очевидно, что повышенный интерес к универсальному испытательному центру на SC-1000 связан с тем, что в космическом излучении, падающем на границу земной атмосферы, наиболее многочисленны именно ядра атомов водорода ($\approx 87\%$). Доля других ядер относительно невелика, например, ядер гелия $\approx 12\%$, а более тяжелых ядер $\approx 1\%$ [4]. При этом вблизи Земли, на границе земной атмосферы, подавляющую часть потока космического излучения, включая и протоны, составляют частицы с энергиями от десятков электронвольт до 10^9 эВ и выше. И эти энергии меняются непрерывно. В связи с этим шаг по энергии в 100 МэВ на стенде IS OP-1000 представляется достаточно большим, поскольку накладывает дополнительные жесткие требования на свойства ЭКБ при проведении массовых радиационных испытаний.

В настоящей работе на основе монте-карло-моделирования исследована возможность увеличения в два раза количества пучков протонов переменной энергии практически без переделки чего-либо на испытательном стенде IS OP-1000 в механическом смысле. В качестве новых дополнительных энергий пучков переменной энергии были выбраны значения $\sim 75, 150, 250, 350, 450, 550, 650, 750, 850, 950$ МэВ (шаг по энергии 100 МэВ). Для этих энергий необходимо выполнить оптимизационные расчеты, аналогичные расчетам, представленным в работе [3]. Тогда, объединяя данные новых

расчетов с прошлыми [3], получим спектр пучков переменной энергии с шагом уже 50 МэВ, что открывает новые горизонты для различных исследований на SC-1000.

Таким образом, для достижения поставленной цели предлагается по-прежнему использовать уже работающий медный деградер и существующий тракт транспортировки. На первом шаге решения этой задачи потребуются по программе Geant4 определить для каждой требуемой новой энергии E_k необходимые длины поглотителя L_k и подобрать такую же длину (или же максимально близкую) из комбинации имеющихся медных дисков деградера. Затем потребуются дополнить существующую базу данных по реализованным пучкам протонов переменной энергии [3] новыми оптимальными параметрами магнитных элементов тракта транспортировки для новых значений энергий. Причем все новые пучки должны удовлетворять сформулированным выше требованиям для испытательных протонных стендов. Эту часть проблемы можно решить, опираясь на программы Optimum и Meson [3]. Следовательно, полученные на этом пути и встроенные в систему управления новые оптимальные параметры новых пучков и магнитных элементов тракта РЗ позволят сохранить функцию по автоматическому переходу с одного значения энергии пучка на требуемый другой максимально быстро, т.е. без излишних потерь ускорительного времени и с минимальной дозовой нагрузкой на обслуживающий персонал.

Таким образом, на стенде IS OP-1000 можно будет проводить контроль стойкости всех функциональных классов ЭКБ и модулей радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) к специфическим проявлениям дозовых эффектов уже для 21 значения энергии протонного пучка: 62, 75, 100, 150, 200, ..., 1000 МэВ с шагом 50 МэВ.

ПРОТОННЫЕ ИСПЫТАТЕЛЬНЫЕ СТЕНДЫ

В настоящее время два из трех протонных трактов транспортировки SC-1000 могут быть использованы для радиационных испытаний электроники. Испытательный стенд IS SC-1000 имеет фиксированную энергию протонов 1000 МэВ и расположен на тракте Р2. На испытательном стенде IS OP-1000, расположенном на тракте транспортировки РЗ, энергию протонов можно варьировать от 1000 до 62 МэВ с шагом 100 МэВ с помощью медного поглотителя переменной длины, который управляется дистанционно. Схема протонных пучков и рабочих станций облучения, размещенных в экспериментальном зале ускорителя, показана на рис.1.

Общая длина тракта РЗ ~ 26 м, он состоит из деградера, двух дублетов квадрупольных линз и отклоняющего пучок на 18° магнита СП-40 и трех коллиматоров. Тракт РЗ обеспечивает протонный пучок для лаборатории IRIS, где исследуются короткоживущие изотопы с использованием масс-сепаратора и лазерной техники [5]. Поэтому его геометрия не может быть изменена при использовании в качестве испытательного стенда IS OP-1000.

Расчеты, выполненные в работе [3], показали, что техническая реализация наборного поглотителя из меди с $\rho_m = 8,8$ г/см³ вполне возможна. Деградер был сконструирован, изготовлен и эксплуатируется. Он имеет 11 базовых дисков диаметром 80 мм с толщинами: 1, 2, 2, 5, 10, 50, 20, 20, 100, 150, 200 мм. У поглотителя также имеется собственный коллиматор длиной 132 мм, с оптимальным радиусом отверстия 35 мм.

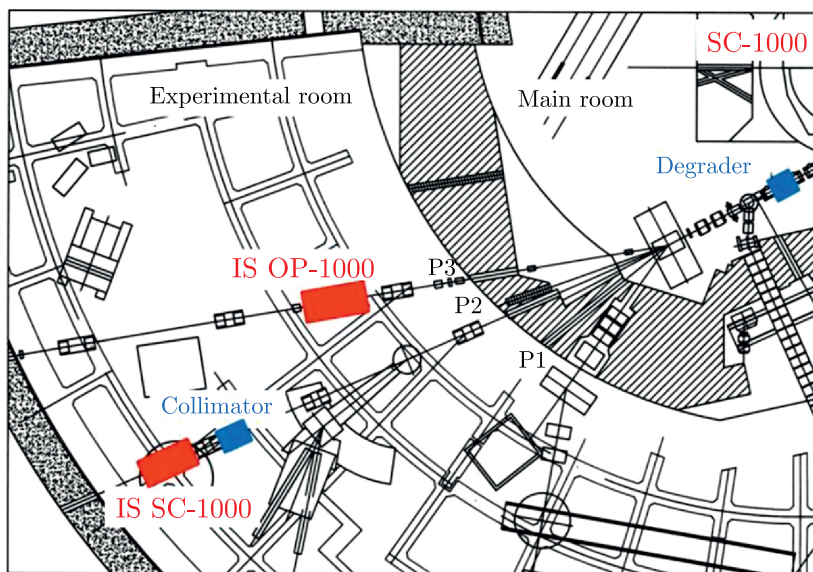


Рис. 1. Схема трактов транспортировки протонных пучков: P2 — протоны с энергией 1000 МэВ; P3 — протоны с переменной энергией 62, 100, 200, ..., 1000 МэВ с шагом 100 МэВ

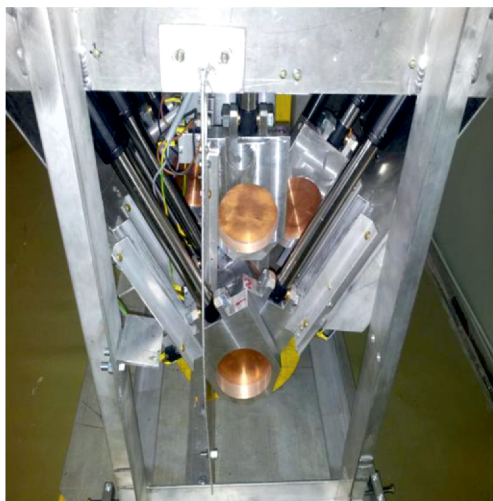


Рис. 2. Общий вид медного деградера для тракта транспортировки P3

Деградер при необходимости может быть расположен в главном зале ускорителя. Он показан на рис. 2.

Для увеличения интенсивности пучков низких энергий при проведении радиационных испытаний ЭКБ поглотитель удалось расположить максимально близко к фокусирующим линзам в главном зале ускорителя. При этом поглотитель был спрое-



Рис. 3. Медный деградер при работе на тракте транспортировки P3

ектирован таким образом, чтобы он поместился в существующий зазор ~ 90 см, что показано на рис. 3.

Следует подчеркнуть, что поглотитель устанавливается на тракте P3 лишь при проведении работ на испытательном стенде IS OP-1000. После их завершения он снимается с тракта и перемещается в хранилище.

Испытательный стенд IS SC-1000 с фиксированной энергией протонов 1000 МэВ расположен на тракте P2. Он эксплуатируется с 1970 г. Тракт P2 непрерывно совершенствуется, является базовым, и на нем выполнены многочисленные исследовательские и медицинские работы [1]. Здесь его проблемы не обсуждаются.

Отметим, что протонные испытательные центры функционируют в условиях нормального атмосферного давления.

РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ И ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Расчетная модель объединяет 3 этапа:

- Моделирование по программе Geant4 прохождения протонов высокой энергии в 1000 МэВ через медный деградер с целью определения длины L_k деградера для получения необходимой энергии E_k из требуемого набора энергий.

- Моделирование по программе Optimum прохождения пучка протонов необходимой энергии E_k , преодолевших деградер, по тракту транспортировки P3 до мишени фиксированного диаметра. Эта процедура позволяет получить оптимальные параметры магнитных элементов тракта, соответствующие максимальному числу протонов, достигших данной мишени.

- Моделирование по программе Meson прохождения протонов, преодолевших деградер, по тракту транспортировки P3 с оптимальными параметрами магнитных элементов тракта, полученными по программе Optimum. Эта процедура позволяет получить основные теоретические параметры каждого исследуемого пучка. Дальнейший дополнительный анализ параметров связки программ Meson и Optimum позволяет

добиться того, чтобы выполнялись наперед заданные условия, накладываемые на частицы этого пучка на испытательном стенде IS OP-1000.

Все эти этапы моделирования выполняются для каждого нового значения требуемой энергии 75, 150, 250, 350, 450, 550, 650, 750, 850, 950 МэВ.

Geant4. Взаимодействие высокоэнергетических частиц с веществом представляет собой весьма сложный процесс с участием большого числа взаимодействующих частиц [6]. Наиболее достоверным методом для исследования процессов прохождения излучения через вещество является моделирование методом Монте-Карло. Поэтому будем применять для наших целей широко известную программу Geant4 [7], а также программу SRIM [8].

В данной работе, как и в предыдущей [3], в программе Geant4 перед поглотителем генерировался пучок протонов (от десятков миллионов до нескольких миллионов), вышедших из некоторого вакуумного объема тракта ускорителя. При этом предполагалось, что пучок имеет гауссову форму с параметрами $\sigma_x = \sigma_z = 0,64$ см (x, z — поперечные размеры) и с энергией 1000 МэВ ($\sigma_E = 3,84$ МэВ), которые соответствуют экспериментальным результатам. То есть полагалось, что плотности распределения вероятностей соответствующих величин имеют вид

$$p(y) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(y-a)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (1)$$

где σ — среднее квадратичное отклонение; a — математическое ожидание.

При моделировании прохождения пучка сквозь поглотитель для каждого значения требуемой энергии E_k задавалась заранее определенная наборная длина L_k деградера [7, 8]. При этом в Geant4 был задействован набор физических взаимодействий (Physics List), описывающий электромагнитные процессы, emstandard_opt3. Были учтены потери энергии на ионизацию, рождение δ -электронов, комптоновское рассеяние, тормозное излучение, фотоэффект, рождение пар, многократное рассеяние, e^+e^- -аннигиляция. Были также подключены все адронные взаимодействия (упругое рассеяние, образование мезонов, распады частиц, возбуждение ядер и излучение фотонов, деление ядер, захват нейтронов, расщепление ядер). Для расчета неупругих взаимодействий была использована модель Binary cascade, которая хорошо работает в области интересующих нас энергий.

В расчетах по программе Geant4 для каждого требуемого значения энергии пучка E_k на выходной плоскости поглотителя длиной L_k , соответствующей этой энергии, записывались в отдельный файл значения координат, импульса и энергии каждого трека. В дополнительных файлах записывалась информация о первичных протонах (не испытывавших неупругих взаимодействий при торможении в поглотителе) и о вторичных частицах (продуктах неупругих взаимодействий), а также другие данные, необходимые для дальнейшего анализа.

На рис. 4 представлены энергетические распределения протонов, полученные для разных значений требуемых новых энергий E_k на выходе из поглотителя.

Также на рис. 4 хорошо видно, что с уменьшением энергии пучки становятся все шире. При этом для каждого значения энергии после поглотителя заметен вклад неупругих соударений в суммарное распределение в виде некоторого фона. Geant4 позволяет извлечь распределения вторичных частиц (неупругие соударения). Они представлены на рис. 5.

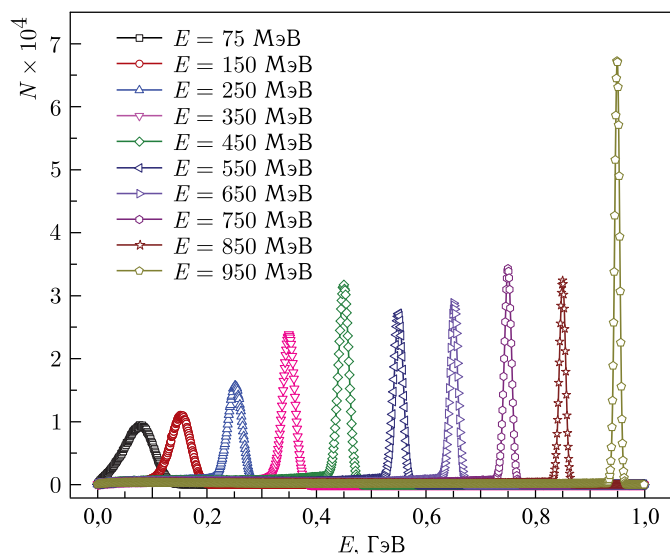


Рис. 4. Ненормированные распределения пучков разных энергий на выходной плоскости соответствующего поглотителя

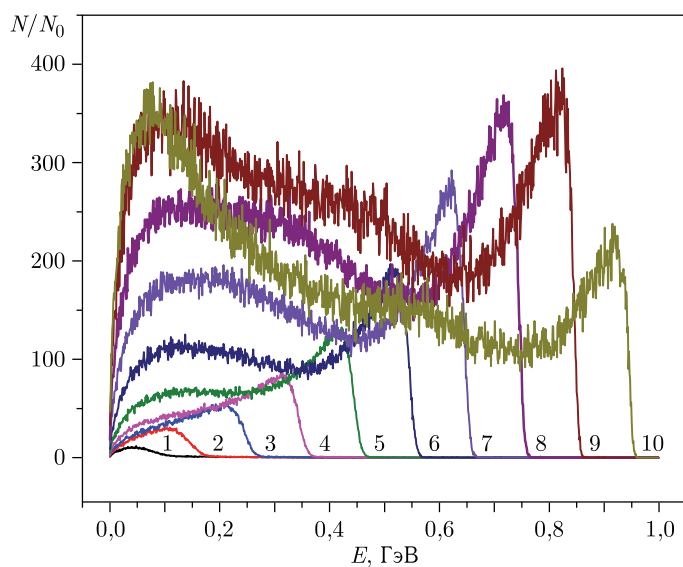


Рис. 5. Нормированные распределения вторичных пучков разных энергий на выходной плоскости соответствующих поглотителей длиной L_k ($N_0 = 10^6$). Числа $k = 1, 2, 3, \dots, 10$ обозначают энергии 75, 150, 250, ..., 950 МэВ соответственно

На рис.5 видно, что вторичные протоны образуют широко размазанный энергетический фон для каждого пучка из рассматриваемого набора энергий E_k . Причем максимум распределения вторичных частиц расположен при более низкой энергии, чем энергия первичного пучка E_k .

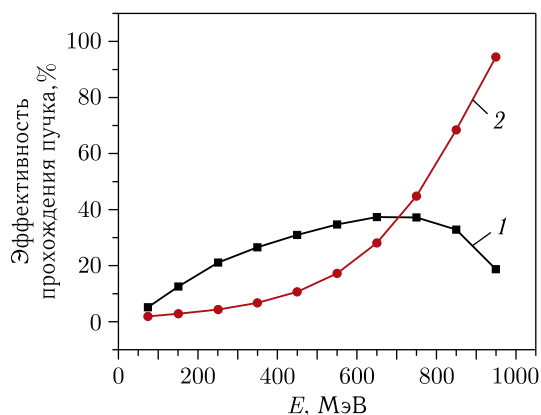


Рис. 6. Для каждой рассмотренной энергии: кривая 1 соответствует отношению числа вторичных частиц к общему числу частиц (первичных и вторичных), прошедших деградер; кривая 2 есть отношение общего числа частиц, прошедших деградер, к исходному числу частиц, сгенерированных перед деградером (эффективность прохождения пучка через поглотитель)

Таким образом, расчеты демонстрируют, что исходный компактный пучок в результате прохождения через поглотитель теряет свою энергию и энергетическую однородность, а также уменьшает свою интенсивность за счет ядерных взаимодействий. Также после поглотителя увеличивается угловая расходимость пучка (см. рис. 4). Представление о масштабах этих процессов дает рис. 6.

Из кривой 1 на рис. 6 видно, что для энергии 75 МэВ число вторичных протонов по отношению к общему числу частиц, прошедших деградер, составляет $\sim 5\%$. Затем это отношение достигает максимума ($\sim 37\%$) при энергиях 650, 750 МэВ и падает до $\sim 19\%$ при энергии 950 МэВ. Из кривой 2 следует, что эффективность прохождения пучка через поглотитель меняется от 1,91 % для энергии 75 МэВ до 94,46 % для энергии 950 МэВ.

В табл. 1 представлены результаты расчетов для всех рассматриваемых энергий E_k .

Таблица 1. Расчетные параметры пучков после поглотителя

E , МэВ	a_E , МэВ	σ_E , МэВ	P , МэВ/с	L , мм	σ_x , см	σ_z , см
75	74,45	27,97	381,120	527	2,568	2,563
150	150,82	19,01	552,963	507	2,443	2,463
250	250,92	13,73	730,634	470	2,070	2,102
350	349,44	11,26	881,959	424	1,758	1,764
450	449,50	9,67	1022,527	370	1,442	1,442
550	550,23	8,53	1155,547	310	1,180	1,180
650	650,32	7,56	1281,904	246	0,960	0,955
750	749,80	6,68	1403,296	179	0,806	0,806
850	849,72	5,73	1522,028	109	0,714	0,714
950	949,30	4,55	1637,859	37	0,661	0,663

В табл. 1: E — ожидаемое значение энергии пучка, a_E — рассчитанное в настоящей работе математическое ожидание (энергия) пучка, σ_E — его среднее квадратичное отклонение, P — значение импульса осевой частицы, L — расчетная длина деградера для получения данной энергии $E(a_E)$, σ_x и σ_z — средние квадратичные отклонения по поперечным размерам x и z пучков после поглотителя (см. формулу (1)).

Здесь уместно напомнить, что длина поглотителя L_k для получения протонов необходимой k -й энергии E_k была определена как разность длин пробегов

$$L_k = P_0 - P_k, \quad (2)$$

где P_0 — длина пробега протонов начальной энергии $E_0 = 1000$ МэВ, а P_k — длина пробега протонов, которая соответствует k -й энергии E_k .

Также отметим, что длины пробегов частиц с одинаковой энергией оказываются несколько отличными друг от друга. Это связано с тем, что при замедлении в веществе потери частицей энергии имеют статистический характер. При этом распределение пробегов вблизи среднего значения достаточно хорошо описывается соответствующим распределением Гаусса типа (1). То есть значения L_k , приведенные в табл. 1 (пятая колонка), представляют собой математические ожидания соответствующих распределений. В расчетах при трассировке протонов в поглотителе фиксировался момент, когда энергия частицы становилась меньше заданной величины E_k . Таким образом, длина поглотителя соответствует потере энергии частицы от 1000 МэВ до фиксированной энергии E_k .

В результате выполненных расчетов было обнаружено, что необходимая расчетная длина деградера L_k для получения требуемой энергии E_k может быть достаточно хорошо набрана из комбинаций медных дисков разной толщины действующего поглотителя на испытательном стенде IS OP-1000. Здесь уместно напомнить, что деградер состоит из 11 медных дисков диаметром 80 мм с толщинами: 1, 2, 2, 5, 10, 50, 20, 20, 100, 150, 200 мм. Отметим также, что величины требуемых энергий E_k определены в настоящих расчетах достаточно хорошо, с погрешностью меньшей чем 3%.

Таким образом, результаты этого раздела убедительно свидетельствуют, что рассчитанный ранее для испытательного стенда IS OP-1000 набор пучков переменной энергии $\sim 62, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000$ МэВ, реализуемый на базе действующего медного деградера [3], может быть дополнен новым набором энергий $\sim 150, 250, 350, 450, 550, 650, 750, 850, 950$ МэВ с использованием того же самого поглотителя без какой-либо его переделки.

Необходимо только определить оптимальные параметры квадрупольных линз тракта транспортировки для каждого значения новых энергий, которые позволят реализовать новый набор пучков переменной энергии с необходимыми свойствами.

Optimum. Программы Optimum [9] и Meson [10] могут работать в двух режимах. Первый позволяет рассчитывать параметры первичных и вторичных, например, π^\pm -мезонов, пучков частиц методом Монте-Карло. Метод состоит в розыгрыше большого числа траекторий частиц, проходящих заданную магнитооптическую систему. Второй режим заключается в том, что частицы пучка на входе в магнитооптическую систему задаются для этих программ извне отдельным файлом, содержащим информацию о количестве треков, для которых производится расчет, и параметры, характеризующие каждую частицу: координаты, компоненты вектора импульса, модуль вектора импульса и энергию. Такой файл генерируется программой Geant4, при этом количество треков должно быть не менее статистически значимой величины такой, чтобы после прохождения деградера в пучке оставалось $\geq 500\,000$ частиц. В обоих режимах расчеты проводятся в системе координат x, z, s , связанной с осевой траекторией. Ось s направлена по касательной к осевой траектории, ось x располо-

жена в плоскости траектории справа по ходу траектории, а ось z перпендикулярна плоскости xs . В настоящей работе используется второй режим.

Meson. Программа Meson использует тот же файл, что генерируется программой Geant4, и оптимальные параметры магнитных элементов исследуемого тракта транспортировки, полученные в программе Optimum. Код Meson позволяет, в отличие от программы Optimum, получить в этом тракте различные характеристики пучка, например, потери частиц на отдельных элементах тракта, пространственное распределение плотности пучка, временную его структуру, импульсный спектр, абсолютную интенсивность и т. д. Моделирование по этой программе позволяет учитывать и менять параметры мишени. В программе Meson нет ограничений частиц по импульсу. При отклонении траектории частицы от оси тракта на наперед заданную величину эта частица выбывает из рассмотрения.

Методы и алгоритмы расчета по программам Optimum и Meson достаточно полно отражены в предыдущей работе [3] (см. там формулы (3)–(10)). Поэтому здесь они приводиться не будут. Кроме того, поскольку новый набор переменных энергий представляет собой по сути дела сдвиг энергетической шкалы на 50 МэВ вправо, то можно воспользоваться следующими результатами исследований, выполненных в [3]:

1) для снижения радиационной нагрузки на первый дублет квадрупольных линз канала РЗ выберем коллиматор деградера с радиусом отверстия $R = 3,5$ см;

2) для снижения потерь частиц в тракте транспортировки РЗ выберем оптимальное для него чередование полярностей — горизонтальная фокусировка (ГФ) — горизонтальная дефокусировка (ГД) для двух дублетов квадрупольных линз.

Оптимизируемый канал транспортировки пучка РЗ имеет длину ~ 26 м и состоит из деградера, двух дублетов квадрупольных линз, отклоняющего магнита и естественного коллиматора диаметром 110 мм в стене между главным и экспериментальными залами (см. рис. 1). Имеется возможность использовать при необходимости еще и два основных коллиматора [3]. Отклоняющий магнит и первый дублет линз расположены в главном зале. Второй дублет находится после коллиматора в экспериментальном зале. От второго дублета до места испытаний имеется воздушный зазор длиной ~ 580 см. Вакуумный тракт на всем своем протяжении имеет диаметр 180 мм. Здесь уместно напомнить, что при оптимизации все расстояния между магнитными элементами тракта фиксировались, поскольку канал РЗ используется и для других целей, а не только для контроля стойкости различных классов ЭКБ и модулей РЭА к специфическим проявлениям дозовых эффектов.

Сама процедура оптимизации трассировки пучка в канале РЗ выглядит следующим образом. По программе Optimum определяем оптимальные градиенты магнитных полей в четырех линзах тракта РЗ для фиксированного значения энергии и фиксированного диаметра мишени. При этом обеспечиваем получение пучка с максимальной интенсивностью и с минимальной шириной импульсного распределения на мишени для каждого требуемого значения энергии. Полученные оптимальные параметры магнитных элементов тракта вставляем в программу Meson, где детально определяем теоретические свойства полученного пучка. Если в результате анализа оказывается, что эти свойства пучка не удовлетворяют наперед заданным условиям, то производим изменение диаметра мишени, с которым возвращаемся в программу Optimum, где снова проводим оптимизацию параметров линз. С ними снова переходим в программу Meson и т. д. Такая итерационная процедура выполнялась для каждого значения

энергии из рассматриваемого набора и оказалась достаточно надежной, но и весьма трудоемкой.

При этом в этой процедуре для каждой конкретной энергии E_k из рассматриваемого набора энергий выполнялся поиск такого размера мишени $d_{k, \text{opt}}$, при котором средние квадратичные отклонения σ_x и σ_z пучка были бы примерно равными при неких оптимальных параметрах магнитных элементов тракта. То есть для каждого d_k выполнялся довольно длительный расчет по программе Optimum, где осуществлялся поиск оптимальных параметров для всех магнитных элементов. Затем с этими параметрами в программе Meson для каждого d_k определялось, в частности, максимальное число частиц N_k , достигших мишени. Полученные таким образом параметры не дадут, вообще говоря, совсем уж круглого пучка, т.е. его средние квадратичные отклонения σ_x и σ_z могут каким-то образом различаться. Однако на этом пути в экспериментальный зал удается провести максимально возможное число частиц N_k для данной энергии E_k .

Оптимальные градиенты магнитных полей в линзах тракта РЗ для всех новых значений энергий E_k и соответствующих им $d_{k, \text{opt}}$ представлены на рис. 7.

Следует отметить, что для линзы HF11 из первого дублета, как и в более ранней работе [3], не допускалось превышение ее предельного значения градиента магнитного поля в 625 Гс/см. Такое ограничение соответствует ее техническим возможностям и наступает, начиная с энергии ~ 500 МэВ. То есть фокусирующие возможности линзы HF11 для энергий больших чем 500 МэВ оказались существенно ограниченными. Из рис. 7 видно, что оптимальные градиенты магнитных полей первого дублета растут с ростом энергии довольно-таки монотонно. Обращает на себя внимание существенно нелинейный характер поведения кривых HF21 и HD22 второго дублета линз при различных энергиях из требуемого набора.

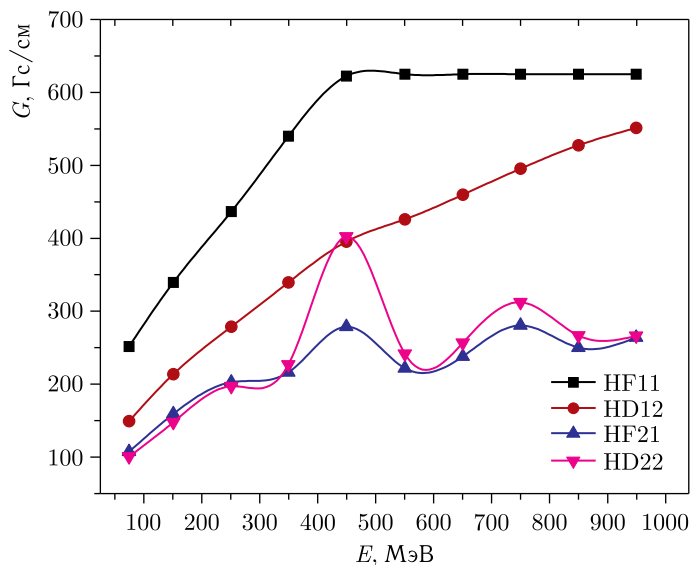


Рис. 7. Оптимальные градиенты первого (HF11-ГФ, HD12-ГД) и второго (HF21-ГФ, HD22-ГД) дублетов линз для всех новых энергий $E_k = 75, 150, 250, \dots, 950$ МэВ

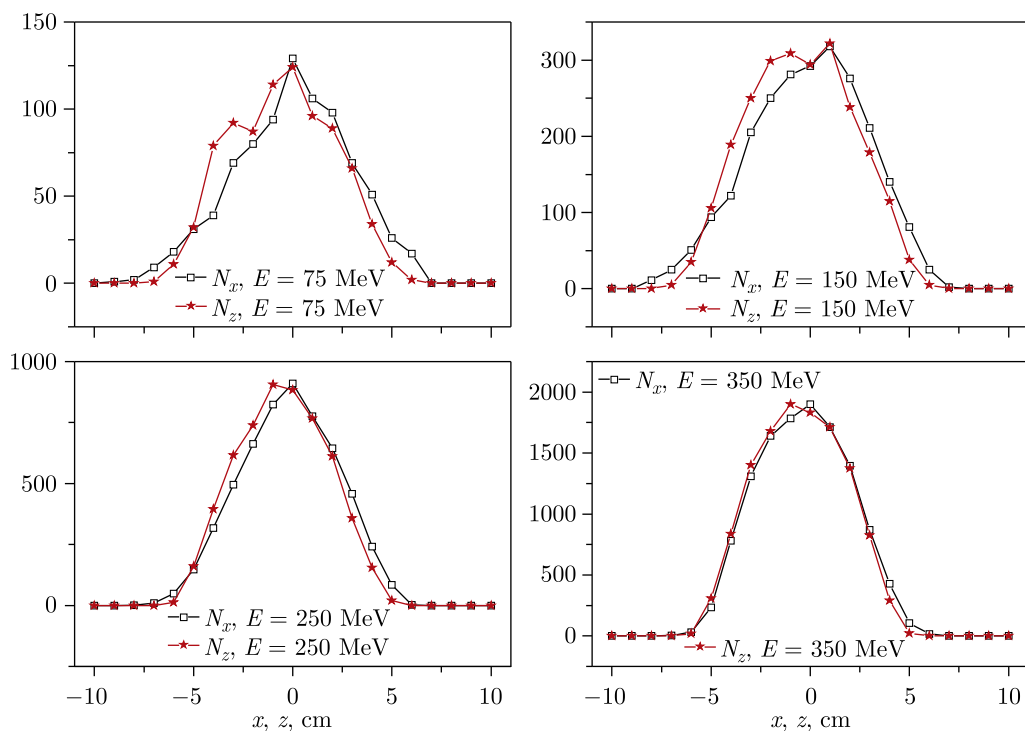


Рис. 8. Расчетные распределения по поперечным координатам x и z пучков протонов с энергиями 75, 150, 250 и 350 МэВ

Напомним, что при поиске по программе Optimum этих параметров требовалось, чтобы пучки каждой энергии E_k имели максимально возможную интенсивность с минимальной шириной импульсного распределения на мишени диаметром $d_{k, \text{opt}}$. Кроме того, для каждого значения энергии из исследуемого набора по программе Mesop, вслед за программой Optimum, проводился анализ на удовлетворение наперед заданных свойств пучка.

Представление о форме и качестве полученных новых пучков переменной энергии на мишени для всех энергий $E_k = 75, 150, 250, \dots, 950$ МэВ дают следующие рис. 8–10, где приведены их расчетные распределения по поперечным координатам x и z . Видно, что при моделировании удастся сформировать такие новые пучки, чтобы пространственные распределения частиц в них по поперечным координатам x и z для каждого значения из рассматриваемого набора энергий E_k были достаточно близки к максимуму.

Данные табл. 2 обнаруживают, что полученные в результате моделирования средние квадратичные отклонения σ_x и σ_z для каждой конкретной энергии E_k не очень сильно отличаются друг от друга. При этом если судить по величинам x и z , то до энергии ≤ 450 МэВ эти пучки практически круглые, при энергии $E_k \approx 550$ МэВ — это слабо выраженный вертикальный эллипс, а при энергиях $E_k \approx 850, 950$ МэВ — это четкие горизонтальные эллипсы.

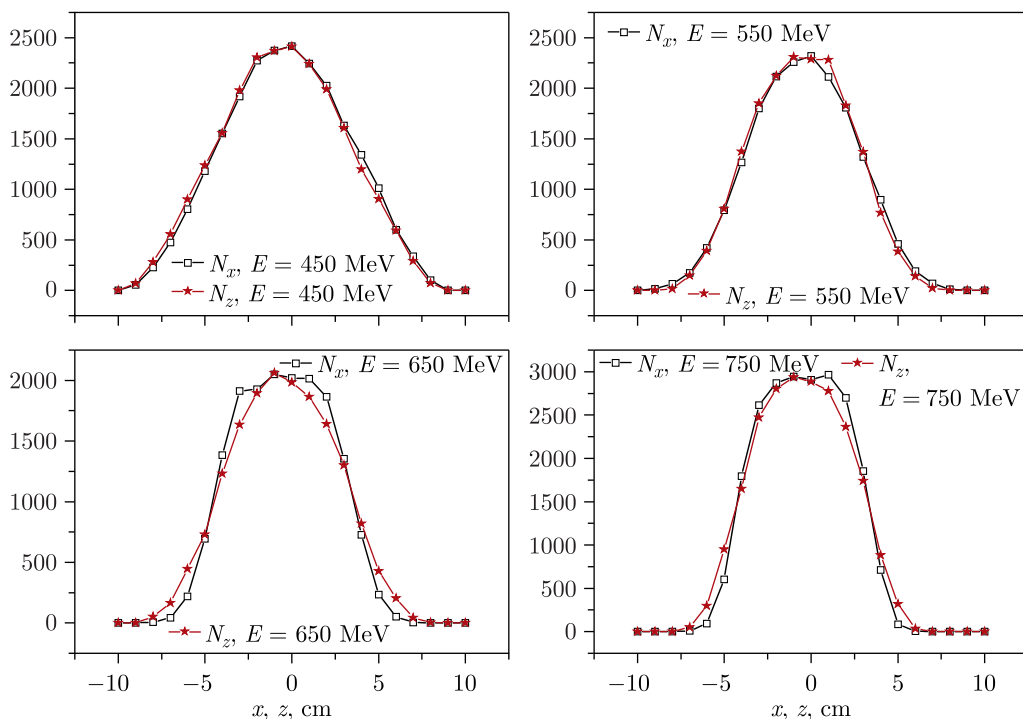


Рис. 9. Расчетные распределения по поперечным координатам x и z пучков протонов с энергиями 450, 550, 650 и 750 МэВ

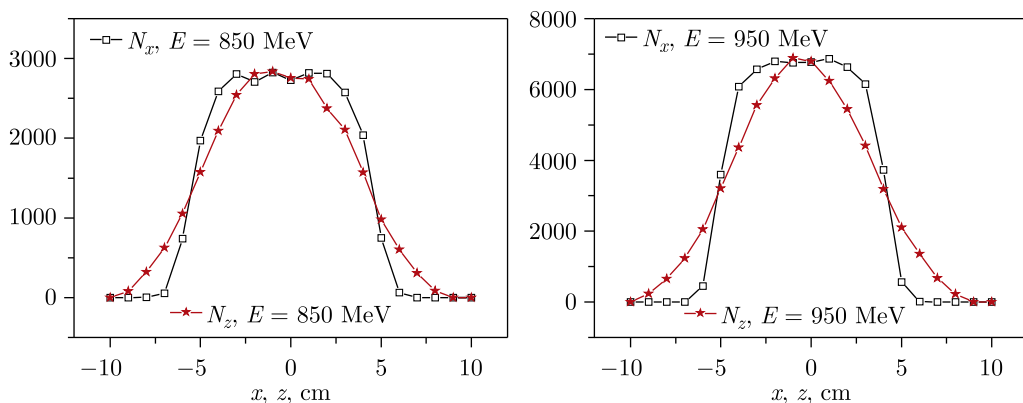


Рис. 10. Расчетные распределения по поперечным координатам x и z пучков протонов с энергиями 850 и 950 МэВ

На рис. 11 представлены расчетные интенсивности для новых и старых пучков переменной энергии E_k на синхротроне ПИЯФ. Видно, что данные находятся в хорошем соответствии друг с другом.

В дополнение к приведенным выше данным были также получены расчетные изменения количества протонов в пучках 75–950 МэВ при прохождении каждого из них

Таблица 2. Расчетные параметры новых пучков при их поперечных размерах x и z , бóльших чем 25 мм

E , МэВ (теор.)	E , МэВ (расчет)	σ_x , см	X , мм	σ_z , см	Z , мм	$\Delta P/P$, %
75	74,45	2,938	25,17	2,904	26,46	13,95
150	150,82	3,062	28,25	2,939	34,40	9,46
250	250,92	2,569	25,11	2,485	25,87	6,21
350	349,44	2,540	28,86	2,506	29,48	3,93
450	449,50	3,744	35,63	3,738	36,24	2,75
550	550,23	3,074	30,09	3,009	37,48	2,23
650	650,32	3,015	38,33	3,168	31,94	1,79
750	749,80	2,775	36,86	2,882	38,09	1,43
850	849,72	3,638	70,04	3,718	44,79	1,13
950	949,30	3,259	61,17	3,546	31,94	0,86

Примечание. Здесь ΔP — ширина импульсного распределения пучка на его полувысоте (FWHM); X , Z — величина 10%-й области однородности пучков по их поперечным размерам x и z соответственно.

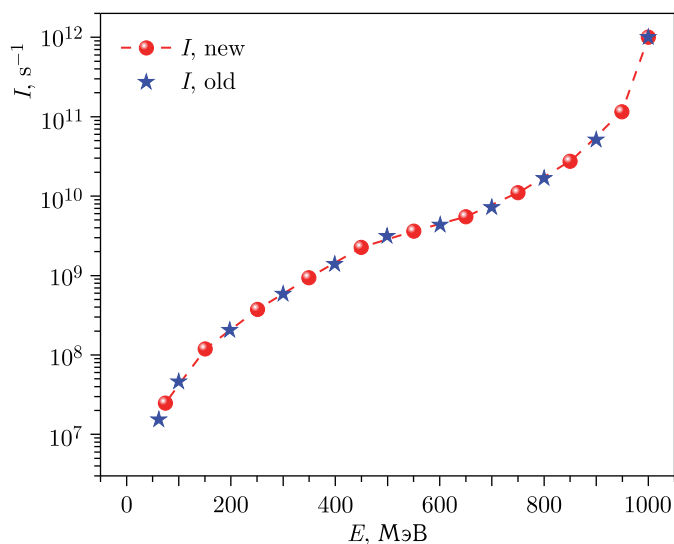


Рис. 11. Расчетные интенсивности для новых и старых [3] пучков переменной энергии на синхротроне ПИЯФ

в канале транспортировки РЗ. Результаты оптимизации показывают, что для каждой энергии наблюдается значительное уменьшение числа протонов в пучке сначала в главном зале ускорителя, а затем при прохождении пучком как отклоняющего магнита СП-40, так и отверстия в стене между главным и экспериментальным залом, которое является естественным коллиматором диаметром 110 мм. При транспортировке пучка в экспериментальном зале потери интенсивности пучков протонов незначительны.

Таким образом, данные настоящей работы убедительно свидетельствуют, что благодаря проведенному всестороннему компьютерному моделированию удалось реализовать требуемые параметры для всех новых пучков. Следовательно, эти пучки могут быть использованы для расширения возможностей испытательного стенда протонов переменной энергии IS OP-1000.

Предполагается, что в дальнейшем расчетные параметры новых пучков будут уточнены с опорой на соответствующие необходимые эксперименты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе на основе моделирования методом Монте-Карло по программе Geant4 прохождения пучка протонов 1000 МэВ сквозь существующий медный деградер на испытательном стенде IS OP-1000 синхротрона ПИЯФ исследована возможность получения новых дополнительных пучков переменной энергии $\sim 75, 150, 250, 350, 450, 550, 650, 750, 850, 950$ МэВ.

Выявлено, что рассчитанные по программе Geant4 длины поглотителя $L_{k, \text{theor}}$ для каждой новой энергии E_k могут быть заменены с существенно лучшей точностью по энергии, чем требуемая $< 3\%$, на наборные длины поглотителя $L_{k, \text{exp}}$, состоящие только из имеющихся его дисков. То есть деградер может быть использован для получения новых пучков без какой-либо его механической переделки. При этом для каждого нового пучка E_k , прошедшего поглотитель $L_{k, \text{exp}}$, были вычислены по Geant4 необходимые для дальнейших исследований параметры пучка, т. е. на выходной плоскости поглотителя, соответствующей этой энергии, записывались в отдельный файл значения координат, импульса и энергии каждого трека пучка. В дополнительных файлах записывалась информация о первичных протонах и о вторичных частицах, а также другие данные, необходимые для дальнейшего анализа.

Определены оптимальные параметры всех магнитных элементов тракта РЗ для каждой новой энергии E_k из приведенного выше перечня. На основе данных моделирования по программе Geant4, являющихся входными для программ Meson и Optimum, получены основные наперед заданные теоретические параметры для каждого пучка E_k , такие как интенсивность, энергетическая неоднородность, размеры пучка, однородность его пространственного распределения и т. д.

Поиск оптимальных параметров всех магнитных элементов тракта для каждой энергии E_k проводился с наложенным условием: моделируемые пучки должны были иметь максимально возможную интенсивность с минимальной шириной импульсного распределения на мишени оптимального диаметра для этой энергии. При этом полученные в результате моделирования средние квадратичные отклонения σ_x и σ_z для каждой конкретной энергии E_k должны соответствовать друг другу.

Полученные по программам Meson и Optimum оптимальные параметры магнитных элементов тракта РЗ для новых пучков, обсуждаемых в данной работе, легко могут быть встроены в существующую систему управления на испытательном стенде IS OP-1000. Это позволит расширить и сохранить функцию по автоматическому переходу с одного значения энергии пучка на требуемое другое максимально быстро и с минимальной дозовой нагрузкой на обслуживающий персонал.

В результате показано, что на испытательном стенде IS OP-1000 SC-1000 можно в два раза расширить существующий набор быстро настраиваемых пучков переменной энергии новым набором пучков с наперед заданными свойствами. В частности, вычисления демонстрируют, что для радиационных испытаний можно обеспечить необходимые интенсивности пучков с 10%-й областью их однородности на мишени не менее чем 25 мм в диаметре.

Таким образом, теперь на испытательном стенде IS OP-1000 можно будет проводить контроль стойкости всех функциональных классов ЭКБ и модулей РЭА к специфическим проявлениям дозовых эффектов уже для 21 значения энергии протонного пучка: 62, 75, 100, 150, 200, ..., 1000 МэВ с шагом 50 МэВ.

В заключение отметим, что такой широкий спектр пучков переменной энергии открывает новые возможности для фундаментальных и прикладных исследований на SC-1000, например, в ядерной медицине, радиобиологии и физике твердого тела.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Artamonov S. A., Amerkanov D. A., Ivanov E. M., Maximov V. I., Mikheev G. F., Riabov G. A., Tonkikh V. A.* The Status of the Accelerator Complex NRC KI-PNPI // XXVI Russ. Particle Accelerator Conf. "RUPAC 2018", Protvino, Russia, Oct. 1–5, 2018. P. 65–67.
2. *Artamonov S. A., Amerkanov D. A., Ivanov E. M., Lebedeva J. S., Mikheev G. F., Riabov G. A., Shcherbakov O. A., Vorobyev A. S., Anashin V. S., Bakirov L. R., Chubunov P. A., Koziukov A. E.* Universal Proton and Neutron Centre for Radiation Resistance of Avionic, Space Electronics and Other Applications at the 1 GeV Synchrocyclotron in PNPI // XXV Russ. Particle Accelerator Conf. "RUPAC 2016", St. Petersburg, Russia, Nov. 21–25, 2016. P. 105–107.
3. *Артамонов С. А., Иванов Е. М., Иванов Н. А., Лебедева Ж. С., Рябов Г. А.* Расчет и оптимизация пучков протонов переменной энергии 60–1000 МэВ на синхротроне ПИЯФ для испытаний радиационной стойкости электроники // Письма в ЭЧАЯ. 2017. Т. 14, № 1(206). С. 144–163.
4. *Simpson J. A.* Elemental and Isotopic Composition of the Galactic Cosmic Rays // Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. 1983. V. 33. P. 323–382.
5. *Molkanov P. L., Barzakh A. E., Fedorov D. V., Ivanov V. S., Moroz F. V., Orlov S. Yu., Panteleev V. N., Seliverstov M. D., Volkov Yu. M.* Shape Evolution for Neutron-Deficient Bismuth Isotopes Studied by Resonance Laser Ionization Spectroscopy // Phys. Part. Nucl. 2017. V. 48, No. 6. P. 914–916.
6. *Барашенков В. С., Тонеев В. Д.* Взаимодействие высокоэнергетических частиц и атомных ядер с ядрами. М.: Атомиздат, 1972. 648 с.
7. <https://geant4.cern.ch/>
8. <http://srim.org>
9. *Абросимов Н. К., Волченков В. А., Рябов Г. А.* Оптимизация трактов пучков методом Монте-Карло // Тр. VI Всесоюз. совещ. по ускорителям заряженных частиц. М., 1979. Т. 2. С. 175–177.
10. *Абросимов Н. К., Волченков В. А., Рябов Г. А.* Моделирование мезонных пучков методом Монте-Карло // Тр. IV Всесоюз. совещ. по ускорителям заряженных частиц. М., 1975. Т. 1. С. 258–261.

Получено 13 мая 2020 г.