

P16-2009-180

Л. Н. Зайцев

**РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ
РАДИАЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ НУКЛОТРОНА-М
НА СТАДИИ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗАДАНИЯ
НА ПРОЕКТИРОВАНИЕ**

Направлено в оргкомитет XXII Всероссийской конференции
по ускорителям заряженных частиц (RUPAC-2010, Протвино,
октябрь 2010 г.)

Зайцев Л. Н.

P16-2009-180

Расчет и конструирование радиационной защиты нуклотрона-М на стадии технического задания на проектирование

Представлен предельно простой и универсальный способ защиты любой конфигурации (кроме ловушек) по заданным потерям ускоренных частиц. Способ можно использовать при оперативном решении вопросов компоновки защиты и прогнозирования радиационной обстановки. Погрешность при вычислениях толщины защиты менее 10 %. Радиационная обстановка вокруг модернизированного нуклотрона будет определяться многократно рассеянными в воздухе и грунте нейтронами утечки из защиты. Предложен вариант конструктивного решения верхней защиты туннеля с использованием элементов магнита синхрофазотрона.

Работа выполнена в Лаборатории физики высоких энергий им. В. И. Векслера и А. М. Балдина ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2009

Zaytcev L. N.

P16-2009-180

The Calculation and Construction of the Nuclotron-M Radiation Shielding for the Operative Design

An extremely simple and universal method has been suggested for calculation of the shielding of any configuration (except the traps) over the given losses of accelerated particles. The method is comfortable when operatively solving the problems of shielding and predicting the radiation situation. The error of the shielding thickness calculations is less than 10%. The neutrons escaped from the Nuclotron shielding and multiscattered in air and ground will form the radiation situation around the modernized Nuclotron-M. A variant of the Nuclotron shielding design using the synchrophasotron magnet elements is proposed.

The investigation has been performed at the Veksler and Baldin Laboratory of High Energy Physics, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2009

Реконструкция ускорительного комплекса ЛФВЭ преследует две цели. Первая — обеспечить возможность работы традиционных физических установок на выведенном пучке протонов, дейтронов и других легких ядер с максимальной энергией 13–6А ГэВ и интенсивностью до 10^{12} протонов за цикл ($2,5 \cdot 10^{11}$ прот. \cdot с $^{-1}$). Вторая цель состоит в том, чтобы к бустеру и нуклотрону-М добавить коллайдер на встречных пучках ионов урана или золота на энергию 4,5А ГэВ и со светимостью не ниже 10^{27} см $^{-2}$ ·с $^{-1}$.

При разработке проекта, особенно его узлов, где потери частиц неизбежны: систем ввода и вывода пучка, внутренних перехватчиков, перезарядных мишеней и др., необходимы расчеты радиационных нагрузок методом Монте-Карло. Однако для оценок глобальной радиационной обстановки, объемов защиты и ее стоимости можно ограничиться инженерными методами расчета, особенно когда требуется сравнивать несколько вариантов компоновочных решений на стадии технического задания на проектирование.

В настоящей работе показано применение одного из полуэмпирических (инженерных) методов к оценке защиты нуклотрона-М и даны рекомендации по ее конструктивному решению.

Инженерный метод расчета подробно описан в монографии [1]. Суть метода состоит в идеализации геометрии «источник–защита», принятии ряда физически обоснованных упрощающих предположений о потерях частиц, энергетических спектрах нуклонов в актах неупругого взаимодействия, а также энергетических и угловых распределениях нейтронов, выходящих из защиты (нейтроны утечки). При этом используется систематизация в виде готовых графиков или номограмм результатов аналитических или численных решений системы уравнений переноса нейтронов в защите или воздушной среде.

Основные расчетные формулы следующие:

$$L_i = (\xi \cdot N_0 A \cdot E_0) / \Delta Z_i, \quad (1)$$

где L_i — квазипотери на участке ΔZ_i (или периметре $2\pi R_0$, ГэВ/(см·с); ξ — относительные потери от интенсивности пучка; N_0 — интенсивность, част. \cdot с $^{-1}$; E_0 — энергия пучка, ГэВ; A — атомная масса ускоряемого иона;

$$D(x) = (7 \cdot 10^{-7} D_{\text{доп}}^* \cdot x) L_i, \quad (2)$$

где $D(x)$ — мощность дозы на единичные квазипотери, (мкЗв·ч $^{-1}$)/(ГэВ·см $^{-2}$); $D_{\text{доп}}^*$ — средняя (допустимая) мощность дозы на поверхности

S верхней защиты ($7 \cdot 10^{-7}$ — размерный коэффициент, см. [1]);

$$D(r) = D_{\text{доп}} / (4,5 \cdot D_{\text{доп}}^* \cdot S), \quad (3)$$

где $D(r)$ — мощность дозы в воздушной среде на единичный выход нейтронов, (мкЗв \cdot ч $^{-1}$)/(нейтр. \cdot с $^{-1}$); 4,5 — числовой коэффициент, согласующий мощность дозы $D_{\text{доп}}^*$ и выход нейтронов; $D_{\text{доп}}$ — допустимая мощность дозы на границе санитарно-защитной зоны (СЗЗ), мкЗв \cdot ч $^{-1}$.

Пример расчета. Требуется определить толщину верхней защиты нукло-трона-М при максимальной энергии протонов 13 ГэВ и интенсивности пучка $2,5 \cdot 10^{11}$ прот. \cdot с $^{-1}$. При работе ускорителя в данном режиме 4000 ч в год $D_{\text{доп}}$ (СЗЗ) должна быть не более 0,125 мкЗв \cdot ч $^{-1}$. (Коэффициент запаса 2 в связи с возможным вкладом в $D_{\text{доп}}$ от других источников.)

Делим периметр кольца 250 м на 32 участка: $\Delta Z_i = 7,8$ м. Считаем, что на участке ΔZ_3 находится септум-магнит (мишень). На нем теряется локально 5% интенсивности $N_0 = 2,5 \cdot 10^{11}$ прот. \cdot с $^{-1}$ с учетом того, что квази-потери по ходу пучка уменьшаются по экспоненте с показателем ($Q_{xy} \cdot z / 2R$), где Q_{xy} — число бетатронных колебаний за оборот (в нашем случае 6,75). По всему периметру равномерно дополнительно теряется также 5% от N_0 с энергией от 1 до 13 ГэВ.

По формуле (1) $L_i = (5 \cdot 10^{-2} \cdot 2,5 \cdot 10^{11} \cdot 13) / 2,5 \cdot 10^4 = 3,3 \cdot 10^6$; по (2) $D(x) = (7 \cdot 10^{-7} \cdot 1,3^* \cdot 4 \cdot 10^2) / 3,3 \cdot 10^6 \cong 9 \cdot 10^{-11}$. По номограмме (рис. 1) определяем толщину защиты $x = 950$ г/см 2 или при $\rho_{\text{бет}} = 2,3$ г/см 3 $x_{\text{бет}} = 400$ см.

Примечание: мощность дозы $D_{\text{доп}}^* = 1,3^*$ мкЗв \cdot ч $^{-1}$ определена методом последовательного приближения к основному критерию $D_{\text{доп}}$ (СЗЗ) при площади верхней защиты кольца $S = 1,3 \cdot 10^7$ см 2 . По формуле (3) $D(r) = 0,125 / (4,5 \cdot 1,3 \cdot 1,3 \cdot 10^7) = 10^{-9}$. По рис. 2 определяем радиус СЗЗ (от центра кольца) $r = 100$ м, что удовлетворяет условию поставленной задачи: $D_{\text{доп}}$ (СЗЗ) = 0,125 мкЗв \cdot ч $^{-1}$ или $0,5 < 1$ мЗв в год согласно требованиям ОСПОРБ [2].

С учетом локального источника (мишени) это требование можно выполнить только при соответствующем увеличении толщины радиационной защиты на участках от 1 до 7. Расчет аналогичный — по (1) и (2), например:

$$L_3 = (5 \cdot 10^2 \cdot 2,5 \cdot 10^{11} \cdot 13) / 7,8 \cdot 10^2 = 2 \cdot 10^8;$$

$$D(x) = 7 \cdot 10^{-7} \cdot 1,3 \cdot 5 \cdot 10^2 / 2 \cdot 10^8 = 2 \cdot 10^{-12}.$$

По рис. 1 $x = 1300$ г/см 2 или 5,70 см бетона. Для других участков ΔZ_i данные приведены в табл. 1.

Расчет по GEANT4 радиального распределения эффективной дозы в воздушной среде показал [3], что на границе СЗЗ при толщине бетонной защиты 300 см $D_{\text{доп}} = 0,32$ мЗв (у нас 0,5 мЗв). Проверим, согласуются ли

наши расчеты при $N_j = 2,5 \cdot 10^7$ ионов $U^{238}/с$, $= 5 \cdot 10^{-2}$, $E_0 = 4,5A$ ГэВ.
 По (1) $L_i = (5 \cdot 10^{-2} \cdot 2,5 \cdot 10^7 \cdot 238 \cdot 4,5) / 2,5 \cdot 10^4 = 5,6 \cdot 10^4$; $D(x) = (7 \cdot 10^{-7} \cdot 1^* \cdot 2 \cdot 10^2) / 5,6 \cdot 10^4 = 2,5 \cdot 10^{-9}$. По рис. 1 $x = 650$ г/см² или 280 см бетона согласуется с [3].

Примечание: 1* вместо 1,3* обоснована, поскольку разные $D_{доп}$ на границе СЗЗ приняты в сравниваемых расчетах.

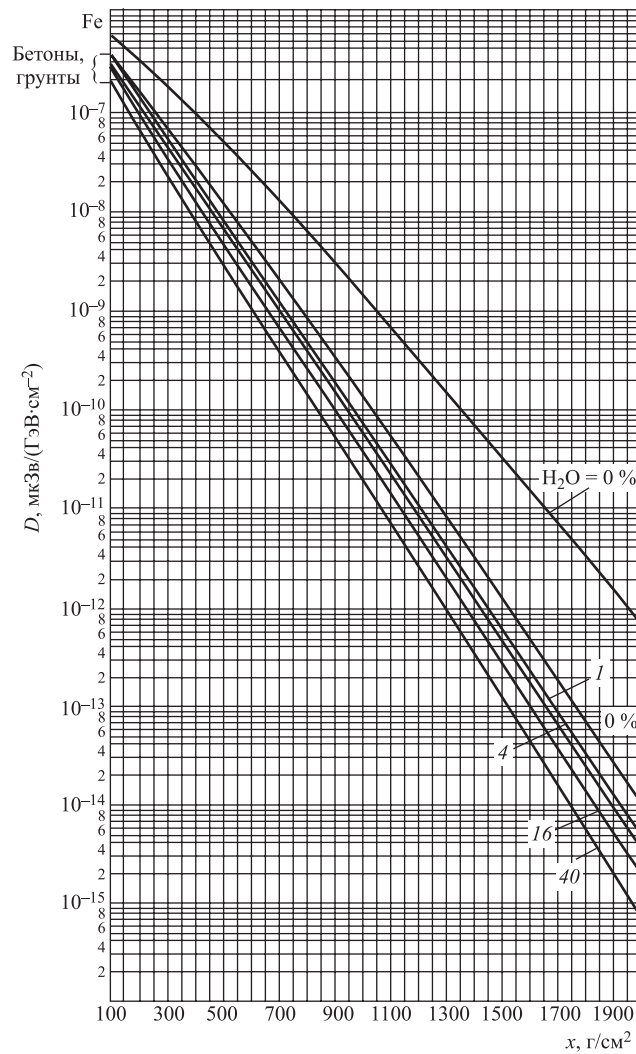


Рис. 1. Номограмма для определения толщины защиты ускорителей

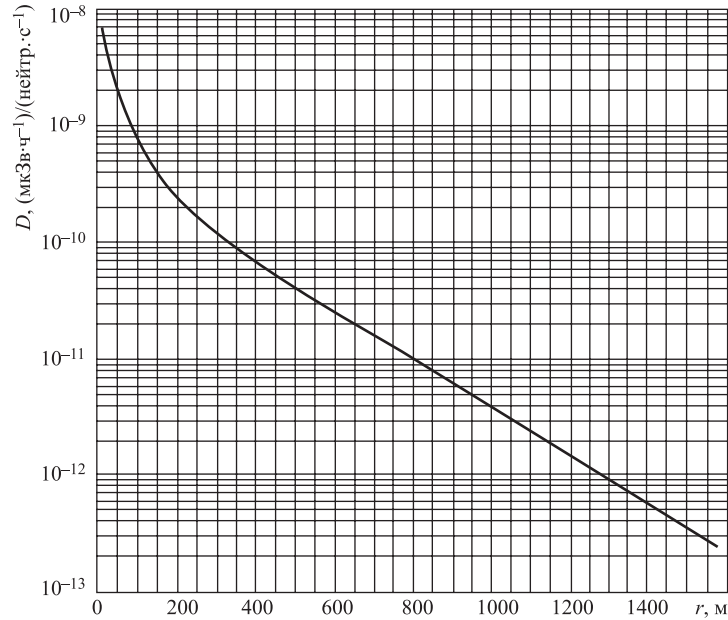


Рис. 2. Радиальное распределение мощности дозы от нейтронов, рассеянных в воздухе

Таблица 1. Исходные данные и результаты расчетов защиты

Номер участка	L_i , ГэВ/(см·с)	$D(x)$, мкЗв·ч ⁻¹	x , г/см ²	$x_{\text{бет}}$, см	$x(\text{Fe+бетон})$, см
1	$6,6 \cdot 10^6$	$3,2 \cdot 10^{-11}$	1000	430	150 + 10
2	$5,2 \cdot 10^7$	$5,3 \cdot 10^{-12}$	1200	520	150 + 30
3	$2,0 \cdot 10^8$	$1,4 \cdot 10^{-12}$	1300	570	150 + 70
4	$6,6 \cdot 10^7$	$4,2 \cdot 10^{-12}$	1250	540	150 + 50
5	$2,7 \cdot 10^7$	$1,0 \cdot 10^{-11}$	1200	520	150 + 30
6	$1,4 \cdot 10^7$	$2,0 \cdot 10^{-11}$	1150	500	150 + 20
7	$6,8 \cdot 10^6$	$4,0 \cdot 10^{-11}$	1000	430	150 + 10
От 8 до 32	$3,3 \cdot 10^6$	$8,4 \cdot 10^{-11}$	950	400	77* + 153

*Металлические балки сечением 150×77 см укладываются на бок.

Таким образом, размеры и объем радиационной защиты нуклотрона-М в рассмотренном протонном режиме существенно больше, чем в режиме работы с коллайдером при указанных выше параметрах.

Конструирование рассчитанной защиты нуклотрона-М представляет собой очень сложную проблему. Это вызвано тем, что защита вписывается в существующее здание (корп. 1), где несущие способности конструкций почти исчерпаны. Решение разместить бустер внутри магнитных квадрантов без перекомпоновки синхрофазотрона [4] нельзя признать удовлетворительным. Без ущерба для защиты бустера (возможно, и коллайдера) необходимо использовать балки блока магнита для верхней защиты туннеля нуклотрона-М, как показано на рис. 3.

Перекомпоновка квадрантов синхрофазотрона (СФ) не представляет никакой сложности и стоит недорого (~ 1 млн руб.). Стоимость комбинированной защиты из Fe + бетон (табл. 1) по оценкам $C_{\text{комб}} \approx C_{\text{бет}}/k + 1$, где $C_{\text{бет}}$ в млн руб.; k — от 3 до 5 в зависимости от объема защиты.

При конструировании защиты кольца нуклотрона-М следует учитывать следующий важный фактор. Масса защиты не должна создавать значимой дополнительной нагрузки на грунт под фундаментом СФ во избежание просадки элементов нуклотрона-М. Уменьшение нагрузки на фундамент СФ за счет сдвига балок на туннель нуклотрона (рис. 3), а также изъятия полюсов и медных обмоток компенсируется ее увеличением за счет бетона, необходимого по условиям защиты (табл. 2), с другой стороны, фундамент здания (корп. 1) не может служить опорой для массивной защиты. Балки, перекрывающие туннель нуклотрона, «зажаты» массой элементов туннеля бустера и могут существовать в виде консоли (фактически без опоры на фундамент зда-

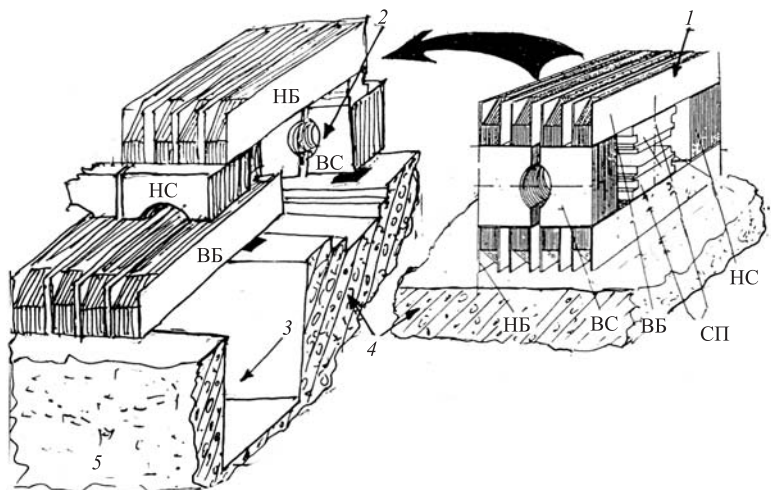


Рис. 3. Эскиз перекомпоновки магнита синхрофазотрона (обозначения элементов блока магнита см. в табл. 2): 1 — блок магнита; 2 — туннель 6×4 м для бустера (и коллайдера); 3 — туннель нуклотрона; 4 — фундамент синхрофазотрона; 5 — фундамент здания корп. 1

Таблица 2. Магнитный блок (48 шт.)

Обозначение на рис. 3	Наименование элемента	Количество в блоке	Масса элемента, т	Размеры, мм	Масса общая, т
НБ	Нижняя балка	4	58,3	770 × 1500 × 7500	233
ВБ	Верхняя балка	4	57,7	770 × 1500 × 7500	230
НС	Наружная стойка	2	37,6	1480 × 2300 × 1750	75
ВС	Внутренняя стойка	2	37	1550 × 2300 × 1750	74
СП	Сердечник полюса	8	9,8	730 × 800 × 2500	78

ния) только при определенной массе дополнительного бетона (толщиной не более 100 см). Поэтому защита, рассчитанная при максимальных параметрах протонного режима (табл. 1), вряд ли реализуема.

Инженерный метод расчета защиты и радиационной обстановки позволяет достаточно просто оценить возможные варианты уменьшения толщины и объема защиты:

- снижение E_0 с 13 до 6 ГэВ по протонам уменьшает толщину защиты на 8 % (в г/см²);
- снижение потерь пучка (локальных и равномерных) с 5 до 2 % уменьшает толщину на 11 %;
- ограничение интенсивности протонного пучка до $2 \cdot 10^9$ прот. · с⁻¹ приводит к снижению толщины защиты с 950 до 700 г/см² на всем кольце нуклотрона-М при соответствующем увеличении толщины защиты на участках 1–7;
- ограничение времени работы с 4000 до 2000 ч в год уменьшает толщину защиты на 6 %;
- увеличение радиуса С33 со 100 до 400 м (см. рис. 4) уменьшает все величины x , г/см² (в табл 1.), в 1,5 раза.

Эти данные получены изменением одного из параметров при прочих равных условиях. Путем приемлемой комбинации нескольких параметров, а также использования вместо дополнительного бетона иных легких водородосодержащих материалов (полимерцемента, полиэтилена, парафина и др.) можно оптимизировать массу радиационной защиты и реализовать предлагаемое конструктивное решение.

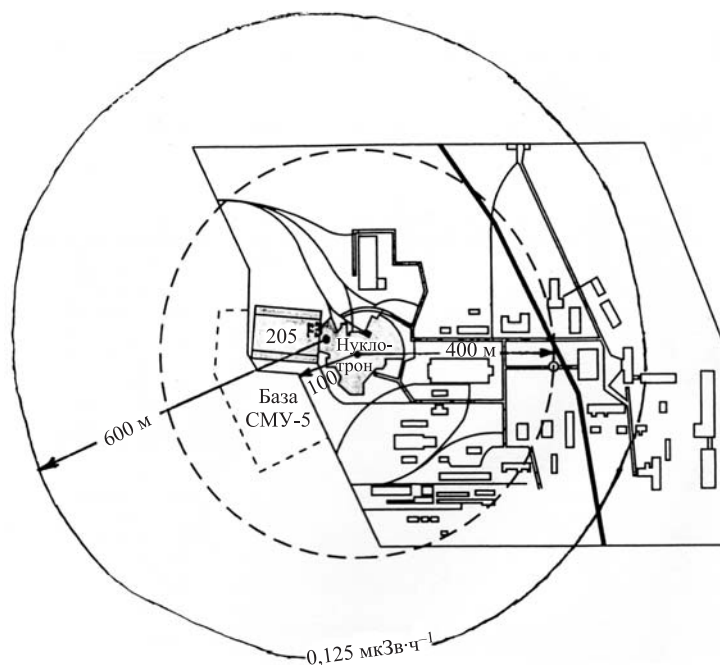


Рис. 4. План площадки ЛФВЭ и размеры санитарно-защитных зон: 100 и 400 м только от нуклотрона-М (см. текст); 600 м от всех возможных источников (нуклотрона-М, бустера, коллайдера, трактов пучков, ловушек и др.) при минимальном объеме защиты

ЛИТЕРАТУРА

1. *Зайцев Л. Н.* Радиационные эффекты в структурах ускорителей. М.: Энергоатомиздат, 1987.
2. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности ОСПОРБ-99. М.: НКП «АПРОХИМ», 2000.
3. *Тимошенко Г. Н. и др.* Препринт ОИЯИ Р16-2008-42. Дубна, 2008.
4. Design and Construction of Nuclotron-based NICA, Conceptual Design Report / Eds.: I. Meshkov, A. Sidorin. JINR, Dubna, 2008.

Получено 23 ноября 2009 г.

Редактор *Е. В. Сабеева*

Подписано в печать 12.03.2010.

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

Усл. печ. л. 0,62. Уч.-изд. л. 0,74. Тираж 230 экз. Заказ № 56923.

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

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/