

ВОПРОСЫ РАСЧЕТА И ПОСТРОЕНИЯ РАДИАЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ УСКОРИТЕЛЬНО-НАКОПИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА Н-100М

А. В. Мазилев, И. М. Карнаухов, Ю. П. Курило, А. А. Мазилев,
Ф. А. Пеев, Б. Н. Разсукованный

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

Рассматривается перечень вопросов, касающихся расчета и геометрии построения радиационной защиты разрабатываемого в Национальном научном центре «Харьковский физико-технический институт» ускорительно-накопительного комплекса «Генератор рентгеновского излучения Н-100М». В результате выполнения работы предложен метод расчета и геометрия локальной и глобальной радиационной защиты персонала категории «А» от воздействия ионизирующего излучения при работе комплекса в двух наиболее опасных в радиационном отношении режимах: режиме инжекции электронного пучка в накопительный контур и режиме прямого выхода ускорителя. Получены функциональные зависимости толщин защиты, в которых в качестве параметров используются величины потерь мощности электронного пучка в электронопроводе.

1. Введение

В настоящее время одним из многообещающих методов получения короткоимпульсного рентгеновского излучения является комптоновское рассеяние интенсивного лазерного излучения на релятивистском электронном пучке. Интенсивность излучения, получаемая таким способом, обладает рядом преимуществ: перестраиваемость длины волны, квазимонохроматический спектр, острая направленность пространственного распределения излучения и возможность генерирования рентгеновского излучения путем использования низкоэнергетического электронного пучка. В ННЦ ХФТИ при поддержке гранта НАТО «Наука за мир» разрабатывается генератор рентгеновского излучения Н-100М («Нестор») с энергией электронного пучка до 225 МэВ и плотностью фотонного потока до 10^{15} фот/мм²с. Генератором рентгеновского излучения является ускорительный (точнее, ускорительно-накопительный) комплекс, включающий в себя ускоритель электронов ЛУЭ-60 с энергией электронов $E_0 = 60$ МэВ и средней мощностью на выходе (в режиме инжекции) $W_1 = 6,3$ Вт, накопительный контур с каналами синхротронного излучения и канал транспортировки электронного пучка от ускорителя в накопитель (рис. 1).

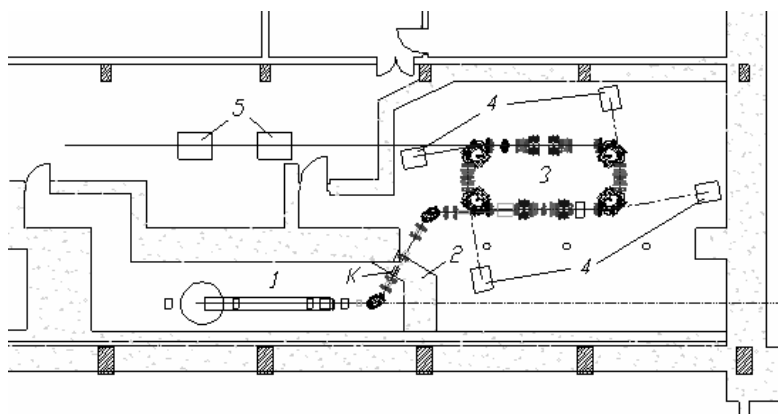


Рис. 1. Общий вид ускорительно-накопительного комплекса Н-100М: 1 – ускоритель-инжектор; 2 – защита; 3 – накопитель; 4 – станции синхротронного излучения; 5 – станции рентгеновского излучения; К – коллиматор.

На рис. 2 показана схема размещения оборудования ускорительного комплекса Н-100М. Согласно проекту размещение генератора планируется осуществить в части здания линейного ускорителя электронов ЛУЭ-300 с существующими стенами Ст. 1 и Ст. 2, уже являющимися радиационной защитой. Накопительный контур (3), детальный вид которого изображен на рис. 3, имеет вид прямоугольника с двумя параллельными стенами защиты сторонами и двумя, соответственно, перпендикулярными. Длина периметра контура $L_1 = 16,28$ м. Линейный ускоритель-инжектор ЛУЭ-60 может эксплуатироваться как в режиме инжекции электронного пучка в накопительный контур, так и в режиме прямого вы-

хода. В последнем случае пучок электронов транспортируется по электронопроводе длиной $L_2 = 14,7$ м, проходящему через помещение накопительного контура параллельно защитной стене Ст. 2. Мощность пучка в режиме прямого выхода составляет $W_2 = 315$ Вт.

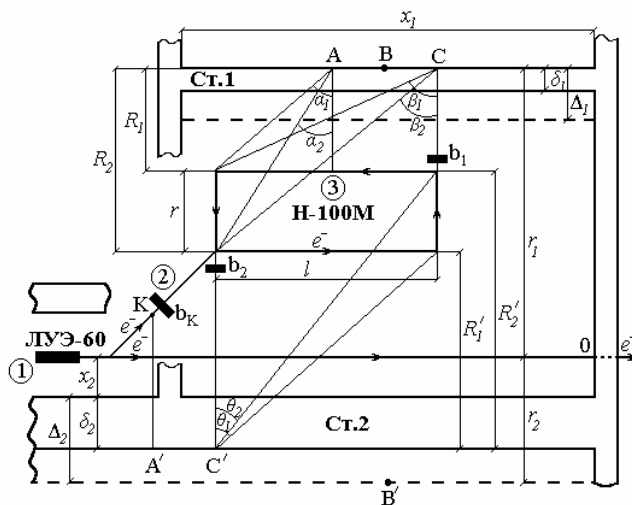


Рис. 2. Схема размещения оборудования ускорительного комплекса Н-100: 1 – ускоритель электронов ЛУЭ-60; 2 – канал транспортировки пучка электронов; 3 – накопительный контур.

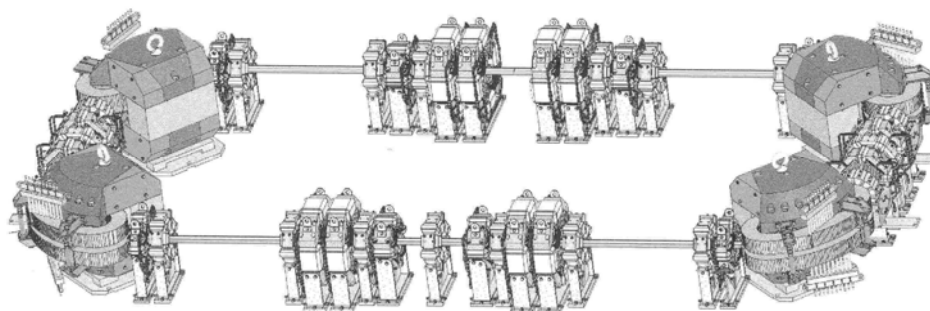


Рис. 3. Накопительное кольцо генератора рентгеновского излучения Н-100М.

В данной работе рассматривается комплекс вопросов, касающихся расчета и геометрии построения радиационной защиты ускорительно-накопительного комплекса Н-100М, как локальной (железо, свинец), так и дополнительной к существующим стенам глобальной (бетон). Помещения постоянного пребывания персонала категории А расположены с внешней стороны стен Ст. 1 и Ст. 2. Радиационная защита должна обеспечить безопасный уровень мощности дозы ионизирующего излучения в этих помещениях при работе ускорителя как в режиме инжекции с последующей работой накопительного контура, так и в режиме прямого выхода.

2. Модель расчета

В последние годы для расчета радиационной защиты успешно используются так называемые правила Свенсона [1], основанные на результатах исследований ливневых процессов, возникающих при взаимодействии электронов, имеющих энергию выше критической, с толстыми мишенями. Согласно этим правилам, расчет радиационной защиты производится с использованием так называемых дозовых эквивалентов S , численно равных мощности эквивалентной дозы, создаваемой образующимися видами излучений на расстоянии 1 м от мишени на 1 кВт мощности падающего пучка электронов. Мощность дозы на расстоянии R м от точечного источника с внешней стороны защиты толщиной Δ см изменяется по закону $\frac{1}{R_2} e^{-\Delta/\lambda}$, где λ – длина ослабления данного вида излучения в материале

защиты в сантиметрах, зависящая от энергии этого излучения. В данной задаче роль мишени выполняет электронопровод. Образование ионизирующего излучения обусловлено взаимодействием электронного пучка со стенками электронопровода, приводящим к развитию электромагнитного каскада

как в самом материале электропровода (железо), так и в конструкционных материалах различных формирующих пучок устройств (железо, медь). Причем максимум электромагнитного каскада в этих материалах при энергии электронов $E_0 = 60$ МэВ достигается на толщине около 1,8 см. В соответствии с правилами Свенсона фотонное излучение электромагнитного каскада имеет, как и следовало ожидать, резкую анизотропию и в основном сосредоточено практически под углом $\Theta = 0^\circ$ к оси пучка. При этом дозовый эквивалент S_γ под углом $\Theta = 0^\circ$ пропорционален энергии падающих электронов E_0 ; другой дозовый эквивалент под углом $\Theta = 90^\circ$ от энергии не зависит:

$$E_\gamma = 300E_0, \frac{3\text{В} \cdot \text{М}^2}{\text{ч} \cdot \text{кВт}} (\Theta = 0^\circ); \quad (1a)$$

$$E_\gamma = 50, \frac{3\text{В} \cdot \text{М}^2}{\text{ч} \cdot \text{кВт}} (\Theta = 90^\circ). \quad (1б)$$

Таким образом, при энергии $E_0 = 60$ МэВ излучение, в основном, сосредоточено в конусе с углом $\approx 0,16^\circ$, поэтому даже самое малое отклонение электронов от оси пучка приводит к их взаимодействию со стенками электропровода практически по всей длине прямолинейных участков. Исключение составляет лишь канал транспортировки (2), где подавляющие потери пучка происходят в коллиматоре K (см. рис. 2). Тогда в качестве первого приближения в модели расчета принимаем следующее.

В режиме инжекции с последующей работой накопительного контура потери мощности пучка электронов происходят равномерно по длине контура накопителя с удельной мощностью

$$\omega(\eta) = \frac{W_1}{100L_1} \eta = 3,9 \cdot 10^{-6} \eta, \frac{\text{кВт}}{\text{м}}, \quad (2a)$$

а в точке расположения коллиматора (точка K) потеря мощности составит

$$\omega_K(\eta) = \frac{W_1(100 - \eta)}{100} = 6,3 \cdot 10^{-5} (100 - \eta), \text{ кВт}; \quad (2б)$$

в режиме прямого выхода потери мощности пучка электронов происходят равномерно по длине электропровода с удельной мощностью

$$\omega(\eta_n) = \frac{W_2}{100L_2} \eta_n = 2,1 \cdot 10^{-4} \eta_n, \frac{\text{кВт}}{\text{м}}, \quad (2в)$$

где η и η_n - процент потери первоначальной мощности пучка соответственно в контур накопителя и электропровод прямого выхода.

Энергетический спектр нейтронного излучения, сопровождающего электромагнитный каскад, можно условно разделить на две энергетические группы: нейтроны гигантского резонанса с энергией $E_{n1} < 25$ МэВ и нейтроны с энергией $E_{n2} > 25$ МэВ. Угловое распределение нейтронов первой группы изотропно. Чтобы определить степень изотропности нейтронов второй группы, воспользуемся работой [2], в которой приведены сведения различных авторов об угловом распределении нейтронов этой группы в зависимости от энергии электронов. Представляет интерес следующий факт. Отношение выхода нейтронов интервале углов от 0 до 30° к аналогичной величине в интервале углов от 30° до 60° составляет значение 1,2 для энергии $E_0 = 400$ МэВ и 3,8 для энергии $E_0 = 1$ ГэВ. Таким образом, распределение нейтронов второй группы для рассматриваемого случая ($E_0 = 60$ МэВ) можно также считать также изотропным.

Для оценки дозового эквивалента нейтронного излучения первой энергетической группы используем результаты исследований выхода нейтронов (n) из толстой медной мишени при облучении электронами (эл) для $E_{n1} < 25$ МэВ [2]:

$$Y_{n1} = 0.35 \frac{n}{\text{ГэВ} \cdot \text{эл}} = 2,2 \cdot 10^{12} \frac{n}{\text{с} \cdot \text{кВт}}, \quad (3a)$$

откуда получим дозовый эквивалент для нейтронов гигантского резонанса

$$S_{n1} = \frac{Y_{n1} \cdot h_m}{4\pi} \cdot 3600 = 27,7 \frac{\text{Зв} \cdot \text{м}^2}{\text{ч} \cdot \text{кВт}},$$

где $h_m = 4,4 \cdot 10^{-14} \frac{\text{Зв} \cdot \text{м}^2}{\text{н}}$ - удельная максимальная эквивалентная доза [3].

Зависимость выхода нейтронов гигантского резонанса зависит от атомного номера мишени: $Y_{n1} \approx Z^{0,66}$ [4], поэтому для железа мы получили бы значение $S_{n1}(\text{Fe}) = 23,8 \frac{\text{Зв} \cdot \text{м}^2}{\text{ч} \cdot \text{кВт}}$, что весьма близко к рекомендуемой величине [5]: $S_{n1}(\text{Fe}) = 24,7 \frac{\text{Зв} \cdot \text{м}^2}{\text{ч} \cdot \text{кВт}}$. Это указывает на правильность наших оценок.

Дозовый эквивалент для нейтронов второй группы возьмем из работы [2, 6, 7]:

$$S_{n2}(\text{Fe}) = 2,7 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Зв} \cdot \text{м}^2}{\text{ч} \cdot \text{кВт}}. \quad (36)$$

Сравнивая уравнения (1а) с (36), можно утверждать, что вклад нейтронной компоненты в мощность дозы пренебрежимо мал.

Материалом основной (глобальной) защиты является бетон с плотностью $\rho = 2,35 \text{ г/см}^3$, имеющий следующие длины ослабления излучения [1, 8]:

$$\lambda_\gamma(\Theta = 0^\circ) = 20,8 \text{ см}, \quad \lambda_\gamma(\Theta = 90^\circ) = 19,1 \text{ см}; \quad \lambda_{n1} = 17,0 \text{ см}, \quad \lambda_{n2} = 27,7 \text{ см}.$$

Таким образом, в качестве второго приближения в модели расчета принимаем, что каждый элемент длины электропровода накопительного контура, прямого выхода, а также коллиматор рассматривается как точечный источник, создающий с внешней стороны защиты толщиной Δ мощность дозы P , пропорциональную величине:

$$\text{а) } S_0 e^{-\frac{\Delta}{\lambda_0}} \text{ при } \Theta = 0^\circ, \quad (4a)$$

где $S_0 \equiv S_{\gamma 0}$ (1а), $\lambda_0 \equiv \lambda_\gamma(\Theta = 0^\circ)$; вкладом нейтронной компоненты пренебрегаем:

$$\text{б) } S_0 e^{-\frac{\Delta}{\lambda_\gamma}} + S_{n1} e^{-\frac{\Delta}{\lambda_{n1}}} + S_{n2} e^{-\frac{\Delta}{\lambda_{n2}}} \equiv S \cdot e^{-\frac{\Delta}{\lambda}} \text{ при } \Theta \neq 0^\circ. \quad (46)$$

Здесь мы ввели такие величины, как эффективный дозовый эквивалент S и эффективная длина ослабления нейтронно-фотонного излучения в бетоне λ , что позволило в значительной степени упростить расчеты (например, по сравнению с [9]). После несложных вычислений получаем значения этих параметров:

$$S = 72,2 \frac{\text{Зв} \cdot \text{м}^2}{\text{ч} \cdot \text{кВт}} \text{ и } \lambda = 18,7 \text{ см при } \Theta \neq 0^\circ,$$

которые с погрешностью не более 1 % обеспечивают выполнение равенства в уравнении(46) в диапазоне толщин защиты Δ от 100 до 220 см.

3. Глобальная защита

В этом разделе рассмотрим необходимость увеличения первоначально существующих стен Ст. 1 толщиной $\delta_1 = 60$ см и Ст. 2 толщиной $\delta_2 = 155$ см для того, чтобы обеспечить на их поверхности с внешней стороны (в помещениях постоянного пребывания персонала категории А) мощность дозы, не превышающую установленного при проектировании защиты значения, равного $P_0 = 5,9 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Зв}}{\text{ч}}$ [10]. Исключение составляют точки пересечения осей транспортировки электронного пучка (под углом Θ° по отношению к направлению движения электронов) с поверхностью стен, для которых будет рассчитана дополнительная (локальная) защита.

3.1. Стена 1. Режим инжекции

Локальная защита, расположенная вплотную к точечному источнику в точке K (коллиматор), предназначена для снижения мощности дозы в направлении пучка почти на три порядка. Следовательно, в направлении глобальной защиты (стена 1) фотонное излучение под углом $\Theta \neq 0^\circ$ практически отсутствует, имеет место лишь нейтронное излучение первой энергетической группы с $E_{n1} < 25$ МэВ (второй энергетической группой можно пренебречь). При значениях $\eta > 7$ точка максимальной мощности дозы находится напротив середины участков контура накопителя, параллельных стене 1 глобальной защиты (точка A на рис. 2). Для этой точки должно выполняться условие $P_\partial = P(A)$:

$$P_\partial = 2S\omega(\eta) \left[\frac{F(\alpha_1, \Delta_1)}{R_1} + \frac{F(\alpha_2, \Delta_1)}{R_2} + \frac{F(\alpha_1, \Delta_1) - F(\alpha_2, \Delta_1)}{l/2} \right] + S_n \omega_K(\eta) \frac{e^{-\Delta_1 / (\lambda_n \cos \alpha_K)}}{r_{K1}^2}. \quad (5)$$

Первое слагаемое в формуле (5) представляет собой вклад в мощность дозы контура накопителя, причем первые два слагаемых в квадратных скобках ответственны за участки, параллельные стене 1, третье – за участки, перпендикулярные к ней. Второе слагаемое есть вклад в мощность дозы за счет потерь мощности пучка на коллиматоре. Входящие в формулы (5) параметры имеют следующие значения: $S = 72,2$; $S_n = 27,7$; $\omega(\eta) = 3,9 \cdot 10^{-6} \eta = 6,3 \cdot 10^{-5} (100 - \eta)$; $P_\partial = 5,9 \cdot 10^{-6}$; $R_1 = 3,37$; $R_2 = 5,77$; $l = 5,74$; $\lambda_n = 17,0$; $\alpha_K = 35^\circ$; $r_{K1} = 9,1$ (r_{K1} – расстояние от точки K до точки A ; α_K – угол между отрезком KA и нормалью к стене 1); $F(\alpha_1, \Delta_1) = F(40^\circ, \Delta_1) = 0,614 \cdot e^{-0,05617\Delta_1}$; $F(\alpha_2, \Delta_1) = F(26^\circ, \Delta_1) = 0,4407 \cdot e^{-0,05499\Delta_1}$.

Входящие в формулу (5) и используемые в дальнейшем табулированные функции – интегральный секанс $F(\alpha, b) = \int_0^\alpha e^{-b \cdot \sec \Theta} d\Theta$ – авторами представлен в виде $F(\alpha, \Delta) \approx m \cdot e^{-n\Delta}$.

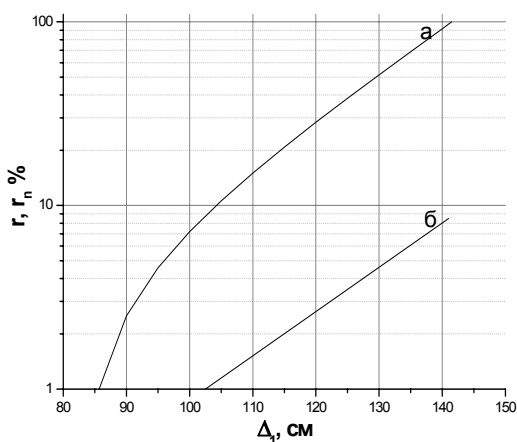


Рис. 4. Зависимость толщины глобальной защиты стены 1 Δ_1 от процента потерь мощности пучка в режиме инжекции (а) и прямого выхода (б).

Зависимость $\eta(\Delta_1)$, представленная на рис. 4, хорошо (с погрешностью не более 0,7 %) описывается функцией

$$\eta(\Delta_1) = 0,0359 \cdot e^{0,0562\Delta_1} - 12,8 \cdot e^{-0,0156\Delta_1}. \quad (6)$$

Используемые в расчетах функции имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} F(26^\circ, \Delta) &= 0,4407 \cdot e^{-0,05499\Delta}; \\ F(31^\circ, \Delta) &= 0,5129 \cdot e^{-0,05546\Delta}; \\ F(35^\circ, \Delta) &= 0,5635 \cdot e^{-0,05581\Delta}; \\ F(40^\circ, \Delta) &= 0,6146 \cdot e^{-0,05617\Delta}; \\ F(45^\circ, \Delta) &= 0,6487 \cdot e^{-0,05642\Delta}; \\ F(50^\circ, \Delta) &= 0,6792 \cdot e^{-0,05666\Delta}. \end{aligned}$$

Функциональная зависимость $\Delta_1(\eta)$ в интервале $\eta > 7$ ($\Delta_1 > 100$) с погрешностью не более 1,4 % выглядит следующим образом:

$$\Delta_1 = 68,9 + 15,7 \ln \eta, \quad (7)$$

или

$$\eta = 1,24 \cdot 10^{-2} \cdot e^{0,0637\Delta_1}. \quad (7a)$$

Эта зависимость и определяет толщину глобальной защиты Δ_1 стены 1 в зависимости от потерь мощности пучка η в контуре накопителя (или от потерь $(100 - \eta)$ на коллиматоре). Так, при рабочем

режиме накопителя $\eta = 25$, следовательно, необходимая толщина глобальной защиты составляет $\Delta_1 = 119$ см, что означает увеличение существующей толщины стены 1 ($\delta = 60$) на 59 см. В предельном случае при $\eta = 100$ требуемая толщина глобальной защиты $\Delta_1 = 141$ см.

3.2. Стена 2. Режим инжекции

Исходя из геометрии расположения контура накопителя и стены 2, а также учитывая полученные выше результаты, очевидно, что в предельном случае потерь $\eta = 100$ увеличение существующей толщины стены 2 ($\delta = 155$) не требуется. При малых значениях η (больших потерях на коллиматоре) максимальная мощность дозы достигается на расстоянии $r_{k2} = KA' = 4,1$. Из условия допустимой мощности дозы для этой точки

$$P_{\delta} = \frac{5 \cdot \omega_K}{r_{k2}^2} e^{-\Delta_2/\lambda} \quad (8)$$

получаем

$$\Delta_2'(\eta) = 71,5 + \ln(100 - \eta). \quad (8a)$$

Из этого следуют следующие результаты.

При потерях мощности в контуре накопителя $\eta \geq 13$ существующая толщина стены 2 напротив коллиматора является достаточной для обеспечения неперевышения допустимой мощности дозы.

При 100-процентных потерях мощности на коллиматоре ($\eta = 0$) в окрестности точки A' потребуется защита толщиной $\Delta_2' = 158$ см, т. е. необходимо увеличить существующую толщину стены ($\delta = 155$) на 3 см.

Таким образом, для режима инжекции при рабочем значении параметра $\eta = 25$ существует необходимость увеличения толщины стены 1 до величины $\Delta_1 = 119$ см. Существующая толщина стены 2 ($\delta = 155$) является достаточной.

3.3. Стены 1 и 2. Режим прямого выхода

Точки максимальной мощности дозы находятся на середине ширины x_1 стены 1 (точка B) и на противоположной стене 2 (точка B' напротив точки B). Для этих точек условие $P_{\delta} = P(B)$ выглядит следующим образом:

для стены 1

$$P_{\delta} = \frac{2S\omega(\eta_n)}{r_1} F(\Theta_1, \Delta_1), \quad (9)$$

где $\omega(\eta_n) = 2,1 \cdot 10^{-4}$; $r_1 = 8,95$; $\Theta_1 = \arctg \frac{x_1}{2r_1} = 31^\circ$; $F(\Theta_1, \Delta_1) = F(31, \Delta_1) = 0,5129 \cdot e^{-0,05546\Delta_1}$;

для стены 2

$$P_{\delta} = \frac{2S\omega(\eta_n)}{r_2} F(\Theta_2, \Delta_2), \quad (10)$$

где $r_2 = x_2 + 0,01\Delta_2 = 1 + 0,01\Delta_2$; $\Theta_2 = \arctg \frac{x_1}{2r_2} > 52^\circ$; $F(\Theta_2, \Delta_2) = F(> 52, \Delta_2) = 0,6792 \cdot e^{-0,05666\Delta_2}$.

В результате получаем необходимые толщины глобальной защиты в зависимости от потерь мощности пучка в режиме прямого выхода:

для стены 1 (эта зависимость приведена на рис. 4.)

$$\Delta_1(\eta_n) = 102,5 + 18,0 \cdot \ln \eta_n; \quad (9a)$$

для стены 2

$$\Delta_2(\eta_n) = 129,0 + 16,6 \cdot \ln \eta_n. \quad (10a)$$

Из анализа формул (9a) и (10a) следует, что глобальная защита, построенная на основе возможных потерь мощности электронного пучка в электронопроводе прямого выхода

- при $\eta_n \geq 2,5$ обеспечивает рабочий режим инжекции ($\eta = 25, \Delta_1 = 119$);
- при $\eta_n > 4,8$ превышает существующую толщину стены 2 ($\Delta_2 > \delta_2 = 155$);
- при $\eta_n = 8,5$ равна толщине глобальной защиты для предельного случая потерь в контуре накопителя ($\eta = 100, \Delta_1 = 141$);
- в предельном случае потерь ($\eta_n = 0$) для стены 1 $\Delta_1 = 185$, для стены 2 $\Delta_2 = 205$.

В конечном итоге становится очевидным, что проблема построения глобальной защиты заключается в выборе такого исходного режима работы ускорительного комплекса (из двух конкурирующих режимов: инжекции и прямого выхода), который обеспечил бы, в первую очередь, необходимую толщину глобальной защиты стены 1. Критерий этого выбора легко получить из условия $\Delta_1(\eta) = \Delta_1(\eta_{II})$. Из формул (7) и (9a) следует, что равенство выполняется при условии $\eta^{0,87} = 6,47\eta_n$. Поэтому критерий выбора режима можно сформулировать следующим образом.

Если проектируемые рабочие потери мощности пучка электронов в электронопроводе накопителя η и в электронопроводе прямого выхода таковы, что выполняется условие

а) $\eta^{0,87} > 6,47\eta_n$, то глобальную защиту стены 1 определяют потери мощности в контуре накопителя. Толщина глобальной защиты находится по соотношению (7);

б) $\eta^{0,87} < 6,47\eta_n$, то глобальную защиту стены 1 определяют потери мощности в электронопроводе прямого выхода. В этом случае толщина защиты определяется из соотношения (9a).

В данном случае проектные потери в режиме инжекции принимаются равными $\eta = 25$, в режиме прямого выхода - $\eta_n < 1$. Поэтому глобальная защита стен 1 и 2 рассчитывается в соответствии с формулами (7) и (8a).

4. Локальная защита

Локальная защита предназначена для снижения мощности дозы от фотонного излучения, образующегося под углом $\Theta = 0^\circ$ к направлению электронного пучка и падающего в направлении глобальной защиты. В данном случае наличие локальной защиты необходимо в трех местах (см. рис. 2): на коллиматоре, через который проходит электронный пучок канала транспортировки под углом 45° к стене 1; вблизи перпендикулярного к стене 1 участка электронопровода контура накопителя (по направлению движения пучка электронов); вблизи перпендикулярного к стене 2 участка электронопровода контура накопителя.

Следует отметить, что локальная защита не является эффективной для нейтронного излучения. Поэтому в последующих расчетах предусмотрено наличие нейтронной компоненты излучения (компоненты гигантского резонанса).

4.1. Локальная защита от излучения в направлении стены 1

В соответствии с проектом ускорительного комплекса, оси канала транспортировки и перпендикулярного к стене участка накопительного контура пересекаются на поверхности стены 1 (точка С на рис. 1). Условие $P_o = P(C)$ для этой точки дает следующее соотношение в развернутом виде:

$$P_o = S\omega(\eta) \left[\frac{F(\beta_1, \Delta_1)}{R_1} + \frac{F(\beta_2, \Delta_1)}{R_2} + \frac{F(\beta_1, \Delta_1) - F(\beta_2, \Delta_1)}{l} \right] + S_n \omega(\eta) \frac{r}{R_1 \cdot R_2} e^{-\frac{A}{\lambda_n}} +$$

$$+ S_n \frac{\omega_K(\eta)}{r_K^2} e^{-\frac{A}{\lambda_n \cos \beta_2}} + S_0 \omega(\eta) \frac{r}{R_1 \cdot R_2} e^{-\frac{A}{\lambda_0} - b_1} + S_0 \frac{\omega_K(\eta)}{r_K^2} e^{-\frac{A}{\lambda_0 \cos \beta_2} - b_K}. \quad (11)$$

Первое слагаемое в (11) – мощность дозы от двух параллельных и перпендикулярного защитным стенам участков накопительного контура. Второе и третье слагаемые – мощность дозы от нейтронного излучения после локальной защиты перпендикулярного стенам участка накопительного контура и коллиматора соответственно, четвертое и пятое слагаемые – то же для фотонного излучения. Входящие в это соотношение константы и параметры имеют следующие значения: $P_0 = 5,9 \cdot 10^{-6}$; $S = 72,2$; $S_n = 27,7$; $S_0 = 1,8 \cdot 10^4$; $\omega(\eta) = 3,9 \cdot 10^{-6} \eta$; $\omega_K(\eta) = 6,3 \cdot 10^{-5} (100 - \eta)$; $R_1 = 3,37$; $R_2 = 5,77$; $r = 2,4$; $r_K = 11,0$; $l = 5,74$; $\lambda_m = 17,0$; $\lambda_0 = 20,8$; $F(\beta_1, \Delta) = F(60, \Delta) = 0,6792 e^{-0,05666 \Delta}$; $F(\beta_2, \Delta) = F(45, \Delta) = 0,6487 e^{-0,05642 \Delta}$.

Безразмерные параметры b связаны с толщиной локальной защиты δ и длиной ослабления фотонного излучения в материале защиты λ_γ соотношением $b = \delta / \lambda_\gamma$. После соответствующей подстановки условие (11) имеет вид

$$\frac{1,47 \cdot 10^3 \eta e^{-0,0481 \Delta} e^{-b_1} + 1,59 \cdot 10^3 (100 - \eta) e^{-0,0680 \Delta} e^{-b_K}}{1 - 15,2 \eta e^{-0,0567 \Delta} - 2,26 \eta e^{-0,0588 \Delta} - 2,44 (100 - \eta) e^{-0,0832 \Delta}} = 1. \quad (11a)$$

Формула (11a) определяет функциональную связь толщины локальной защиты на коллиматоре b_K с локальной защитой на перпендикулярном стене 1 участке контура накопителя b_1 . Как было показано выше, в качестве критерия расчета глобальной защиты выбран режим инжекции. Используя формулы (7) и (7a), можно привести выражение (11a) к однопараметроному соотношению:

$$18,9 \cdot e^{0,0211 b_1} \cdot e^{-b_1} + (1,65 \cdot 10^5 \cdot e^{-0,0625 \Delta} - 20,4 \cdot e^{0,0012 \Delta}) e^{-b_K} = 1, \quad (12a)$$

или

$$81,4 \cdot \eta^{0,332} \cdot e^{-b_1} + 22,4 (100 - \eta) \eta^{-0,981} \cdot e^{-b_K} = 1 \quad (12б)$$

с погрешностью не более 2,4 %. Равенства (12a) и (12б) возможны при условии, что толщины b_1 и b_2 принимают значения выше минимальных:

$$b_1 > b_{1\min} = 2,94 + 0,0211 \Delta = 4,40 + 0,332 \ln \eta, \quad (13a)$$

$$b_K > b_{K\min} = \ln(1,65 \cdot 10^5 \cdot e^{-0,0625 \Delta} - 20,4 \cdot e^{0,0012 \Delta}) = 3,11 - 0,981 \ln(100 - \eta). \quad (13б)$$

Для рабочего режима инжекции, подставив в равенства (12a) и (13a) $\Delta = 119$ или в равенства (12б) и (13б) $\eta = 25$, имеем:

$$234,7 \cdot e^{-b_1} + 71,2 \cdot e^{-b_K} = 1; \quad b_1 > 5,46; \quad b_K > 4,27. \quad (14)$$

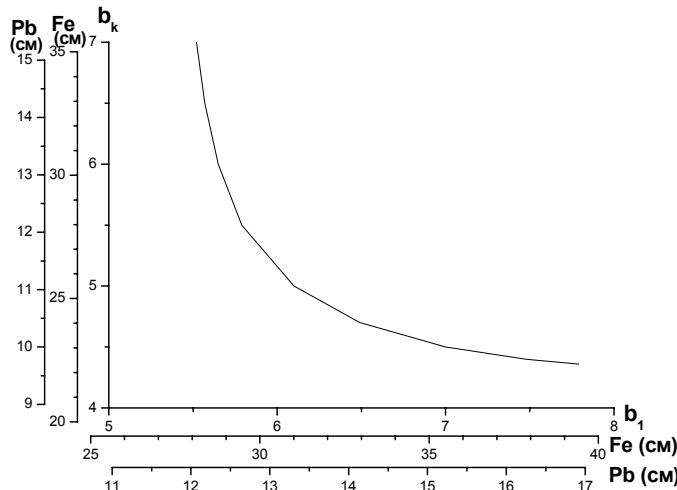


Рис. 5. Зависимость толщины локальной защиты на коллиматоре b_K и на контуре накопителя b_1 из железа и свинца для рабочего режима инжекции

График этой зависимости приведен на рис. 5. Оси абсцисс и ординат имеют шкалу в единицах b , а также в значениях толщин материалов локальной защиты (железо и свинец), для которых длины ослабления фотонного излучения с энергией фотонов, равной энергии комптоновского минимума $E_\gamma = E_{com} \approx 8$ МэВ, $\lambda(Fe) = 5,1$ см, $\lambda(Pb) = 2,2$ см [8].

4.2. Локальная защита от излучения в направлении стены 2

В этом случае мощность дозы в точке C' обусловлена только излучением контура накопителя. Условие $p(c') = p_\phi$ имеет вид

$$p_\phi = S\omega(\eta) \left[\frac{F(\Theta_1, \delta_2)}{R'_1} + \frac{F(\Theta_2, \delta_2)}{R'_2} + \frac{F(\Theta_1, \delta_2) - F(\Theta_2, \delta_2)}{l} \right] + S_0\omega(\eta) \frac{r}{R'_1 \cdot R'_2} e^{-\frac{\delta_2 - b_2}{\lambda_0}}, \quad (15)$$

где $P_\phi = 5,9 \cdot 10^{-6}$; $S = 72,2$; $S_0 = 1,8 \cdot 10^4$; $\omega(\eta) = 3,9 \cdot 10^{-6} \eta$; $r = 2,4$; $l = 5,74$; $\delta_2 = 155$; $\lambda_0 = 20,8$; $\Theta_1 = 45^\circ$; $F(\Theta_1, \delta_2) = F(45, \delta_2) = 0,6487 e^{-0,05642\delta_2} = 1,033 \cdot 10^{-4}$; $\Theta_2 = 35^\circ$; $F(\Theta_2, \delta_2) = F(35, \delta_2) = 0,5635 e^{-0,05381\delta_2} = 9,863 \cdot 10^{-5}$.

Первый член в сумме (15) на три порядка меньше, чем P_ϕ , поэтому им можно пренебречь. Тогда после несложных вычислений получаем

$$b_2 = \ln \left[\frac{S_0 \cdot \omega(\eta) \cdot r}{P_\phi \cdot R'_1 \cdot R'_2} e^{-\frac{\delta_2}{\lambda_0}} \right], \quad (15a)$$

откуда $b_2 = \ln \eta - 1,03$.

Таким образом, для рабочего режима, в частности при $\eta = 25$, потребуется локальная защита толщиной $b_2 = 2,19$, что означает 11,2 см железа или 4,8 см свинца.

5. Заключение

Результаты работы сводятся к следующему.

1. Выполнен расчет и предложена геометрия построения радиационной защиты ускорительно-накопительного комплекса Н-100М.

2. Определен критерий выбора режима работы ускорительно-накопительного комплекса как функция потерь мощности. Показано, что толщина глобальной защиты в случае штатной работы определяется режимом инжекции электронного пучка в накопительный контур.

3. Определена толщина глобальной защиты как функция потерь для двух режимов работы ускорительно-накопительного комплекса: режима инжекции электронного пучка в накопительный контур и режима прямого выхода ускорителя.

4. Получена зависимость между толщинами локальной защиты, в которой роль параметров играют толщины глобальной защиты либо потери мощности.

Полученные функции имеют весьма простой вид и вполне пригодны к практическому применению как для расчета защиты, так и установки, например, различных устройств, блокирующих работу ускорительно-накопительного комплекса в случае превышения установленных штатных потерь мощности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Swanson W.P. Radiological safety aspects of the operation of electron linear accelerators // Tech. Rep. Series 188. – Vienna: IAEA, 1979.
2. Fasso A. et al. Radiation Problems in the Design of the Large Electron-Positron Collider (LEP). CERN 84-02 European Organization for Nuclear Research, Geneva, 1984.
3. Нормы радиационной безопасности НРБ-76/87 и Основные санитарные правила работы с радиоактивными веществами и другими источниками ионизирующих излучений ОСП-72/87. - М.: Энергоатомиздат, 1988.
4. Swanson W.P. Improved calculation of photon-neutron yields released by incident electrons. - Health Physics. - 1984. - Vol. 37.
5. Cossairt J.D. Topics in radiation at accelerators: Radiation Physics for personnel and environmental protection. Batavia, Illinois: Fermi National Accelerator Laboratory, 1996.

6. *de Stabler H. et al.* Shielding and radiation. Chapter 26 of the Stanford two-mile accelerator / Ed. by R. B. Neal. - New York: W.A. Benjamin Inc., 1968.
7. *Sullivan A.H.* Shielding of electron accelerators up to 600 MeV. The radiological impact of the LEP project on the environment. - CERN 81-08. - Geneva, 1981.
8. *Козлов В.Ф.* Справочник по радиационной безопасности. - М.: Атомиздат, 1977.
9. *Шпак А.П., Молодкин В.Б., Карнаухов И.М. и др.* Расчет радиационной защиты источника синхротронного излучения ИСИ-1200 // Ядерная и радиационная безопасность - 2004. - Т. 7, вып. 2. - С. 64 - 72.
10. *Нормы радиационной безопасности Украины НРБУ-97.* Государственные гигиенические нормативы. - К., 2001.

THE QUESTIONS OF CALCULATION AND CONSTRUCTION OF RADIATION SHIELDING OF THE ACCELERATOR-STORAGE SYSTEM N-100M

A. V. Mazilov, I. M. Karnauhov, Y. P. Kurilo, A. A. Mazilov, F. A. Peev, B. N. Razukovanyi

The list of questions concerning calculation and geometry of construction of a radiation shielding of the accelerator-storage system "X-rays generator N-100M" that is under developing in National Science Centre «Kharkov Institute of Physics and Technology» is considered in the present paper. As a result of work has been done the computational method and geometry of a local and global radiation shielding of the personnel of "A-category" from ionizing radiation impact is offered under system functioning in two modes which are the most dangerous with respect to radiation: the mode of electron beam injection into a storage contour and the mode of a direct output of the accelerator. There were obtained functional dependences of protection thicknesses in which the quantities of power losses of an electron beam in electron-pipe are used as parameters.

ПИТАННЯ РОЗРАХУНКУ ТА БУДУВАННЯ РАДІАЦІЙНОГО ЗАХИСТУ ПРИСКОРЮВАЛЬНО-НАКОПИЧУВАЛЬНОГО КОМПЛЕКСУ Н-100М

О. В. Мазілов, І. М. Карнаухов, О. О. Мазілов, Ю. П. Куріло, Ф. А. Пєєв, Б. М. Раззукований

Розглядається перелік питань, що стосуються розрахунку та геометрії побудови радіаційного захисту прискорювально-накопичувального комплексу „Генератор рентгенівського випромінювання Н-100М”, який розробляється в Національному науковому центрі „Харківський фізико-технічний інститут”. У результаті виконання роботи запропоновано метод розрахунку та геометрія локального й глобального радіаційного захисту персоналу категорії „А” від впливу іонізуючого випромінювання при роботі комплексу у двох найбільш небезпечних у радіаційному відношенні режимах: режимі інжекції електронного пучка в накопичувальний контур і режимі прямого виходу прискорювача. Отримані функціональні залежності товщин захисту, в яких в якості параметрів використовуються величини втрат потужності електронного пучка в електропроводі.