

РАДИАЦИОННАЯ ЗАЩИТА ЭЛЕКТРОННОГО УСКОРИТЕЛЯ-ДРАЙВЕРА ПОДКРИТИЧЕСКОЙ СБОРКИ

*П.А. Демченко, А.Н. Довбня, А.Ю. Зелинский, И.М. Карнаухов, Ф.А. Пеев, Г.Д. Пугачев,
В.Л. Уваров*

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

E-mail: uvarov@kipt.kharkov.ua

В НИЦ ХФТИ совместно с Аргоннской национальной лабораторией (ANL, США) и Пекинским институтом физики высоких энергий (ИФЭП, Китай) для управления подкритической сборкой создается линейный ускоритель электронов со средним током 1 мА и энергией 100 МэВ. Предполагается, что потери пучка в ускорителе составят 1% ($\Delta I=0,01$ мА), а их распределение вдоль ускорителя обратно пропорционально энергии электронов E_0 в каждой из 10 ускоряющих секций. Потери пучка после первой секции в энергетическом фильтре (chicane) составляют 2,5 кВт при энергии электронов 12 МэВ. При превышении потерь пучка и увеличении уровня излучения отключение пучка будет происходить автоматически за время меньше 0,01 с. Проведен расчёт радиационной защиты, а также активации оборудования ускорителя и воздуха рабочей камеры γ -квантами тормозного излучения, образующимися при взаимодействии электронного пучка с элементами ускоряющей структуры и выходными устройствами ускорителя.

ВВЕДЕНИЕ

Традиционно ускорители высоких энергий располагают ниже нулевой отметки. Это позволяет снизить толщину бетонной защиты за счет грунта. Особенно это существенно для снижения стоимости защиты ускорителей в случае с большим током. Согласно проекту ось создаваемого в НИЦ ХФТИ электронного ускорителя-драйвера [1] находится на отметке +5,200, а сама подкритическая сборка (ПКС) расположена на нулевой отметке. Высота рабочей камеры ускорителя 2,5 м, ширина 3,7 м, длина 30,5 м. Внешняя сторона рабочей камеры вдоль всей ее длины и внутренняя сторона в экспериментальном зале состоят из тяжелого бетона ($\rho=4,8$ г/см³) толщиной 1 м. Внутренняя сторона вне экспериментального зала выполнена из обычного бетона ($\rho=2,3$ г/см³) и имеет толщину 1 м. В связи с выбором таких параметров защиты и расположением ускорителя предъявляются высокие требования к проводке пучка вдоль всего ускорителя для обеспечения минимальных потерь. Поэтому при увеличении потерь пучка и возрастании уровня излучения отключение пучка будет происходить в течение 0,01 с, и превышения дневной дозы внешнего облучения персонала ускорителя не будет [2].

1. РАСЧЕТ ЗАЩИТЫ ОТ ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И НЕЙТРОНОВ

1.1. На Рис. 1 показано продольное сечение рабочей камеры ускорителя, проходящее через его ось параллельно полу. Расчет проведен для точек на уровне оси ускорителя (Рис. 1, 2), так как в этих точках ожидается максимальный уровень излучения. Для других точек, согласно проведенной оценке и экспериментальным результатам, уровень излучения будет ниже. Необходимая кратность ослабления мощности дозы тормозного излучения определяется выражением

$$K(X, \theta) = \dot{D}_0(\theta) \cdot U \cdot T / R^2 \cdot \dot{H}, \quad (1)$$

где X – толщина защитного барьера (см); \dot{H} – предельно допустимый уровень мощности эквивалентной дозы (МЭД) излучения; R – расстояние от источника излучения до расчетной точки (м); $\dot{D}_0(\theta)$ – мощность поглощенной дозы на расстоянии 1 м от источника излучения под углом θ по отношению к направлению распространения пучка электронов ($0 \leq \theta \leq 180$). Эквивалентная доза излучения $H(Sv) = 1,09 D$ (Gy) для мягкой биологической ткани. При проведении расчетов принимаем $H \approx D$. В расчетах также предполагалось, что мощность поглощенной дозы в каждой расчетной точке создается за счет потерь пучка в каждой секции ускорителя и энергетическом фильтре (chicane). В расчетных точках A_1 проектная контрольная мощность эквивалентной дозы для персонала категории А в НИЦ ХФТИ не должна превышать 8,2 мкЗв/ч, а с коэффициентом запаса – 2...4,1 мкЗв/ч (2,41 нейтрон/см²·с). Коэффициенты U и T , характеризующие защитный барьер и степень занятости персонала в помещениях данного типа, соответственно взяты из табл. 3.1, 3.2 работы [3] и полагаются равными 1. По табл. 2 работы [4] определяли мощность тормозного излучения в зависимости от энергии электронов на выходе каждой секции, угла излучения и величины потерь пучка.

Предполагалось, что потери пучка происходят на стыке двух секций – от 1-й до 10-й, и пропорциональны $1/E_0$. В энергетическом фильтре они составляют 0,21 мА (2,5 кВт) и в инжекторе 0,2 мА при энергии пучка 1 МэВ. При кратности ослабления мощности дозы тормозного излучения 10^4 толщина бетонной защиты отличается при энергиях 12 и 38 МэВ на 25%, а при кратности ослабления 10^6 при этих же энергиях на 20% [3]. Поэтому, для корректного и экономически обоснованного выбора толщины защиты от тормозного излучения вклады элементов ускорителя в мощность дозы в расчетных точках разбиты на два интервала в соответствии с энергией электронов. Первый интервал – инжектор

и система энергетического сжатия (до 12 МэВ), второй интервал (20...100 МэВ) – остальные элементы. В Табл. 1 приведены значения МЭД в расчетных точках, создаваемой тормозным излучением с уче-

том расстояния от каждой секции до расчетной точки и Cos угла падения излучения на внутреннюю поверхность рабочей камеры.

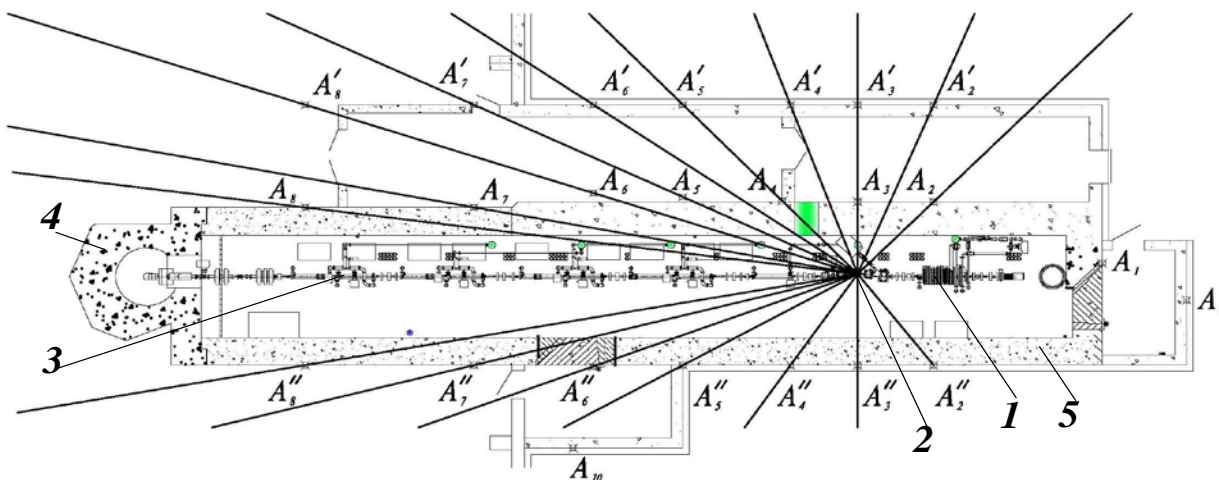


Рис. 1. Продольное сечение рабочей камеры ускорителя: 1 – инжектор; 2 – энергетический фильтр; 3 – ускоряющие секции; 4 – подкритическая сборка; 5 – бетонная защита

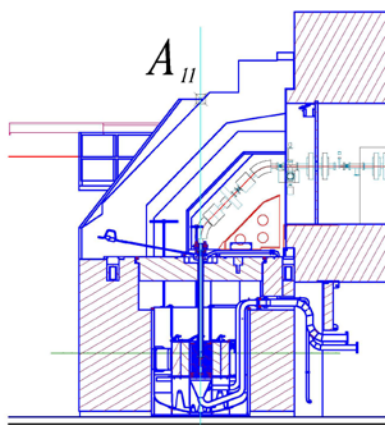


Рис. 2. Поперечное сечение подкритической сборки

В Табл. 2 приведены значения толщины защиты из обычного бетона, необходимой для обеспечения МЭД 4,1 мкЗв/ч на ее поверхности.

Слой половинного ослабления мощности дозы при $E_0 = 12$ МэВ и кратности ослабления 10^3 и 10^5 составляет 11 и 12 см, а при $E_0 = 38$ МэВ 15 и 13 см соответственно. Толщину защиты в точках A_1, A_2, A_3, A_4 и A_9 можно принять для $E_0 = 12$ МэВ, а для точек A_5, A_6, A_7, A_8 и A_{10} – для $E_0 = 20...100$ МэВ [6, 8]. Толщина бетонной защиты для точек A^1_i увеличивается на 40 см за счет стены необслуживаемого помещения. Толщина защиты от тормозного излучения крышки подкритической сборки должна составить 200 см тяжелого бетона.

В Табл. 3 приведены значения толщины защиты из тяжелого бетона, которая необходима при потерях пучка вдоль всего ускорителя.

Мощность дозы (мкЗв/ч) в расчетных точках

Точки	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8	A_9	A_{10}
МЭД (до 12 МэВ)	0,68	3,34	11	25,5	16	7,3	2,5	1,97	0,6	4,3
МЭД (20...100 МэВ)	0,062	0,057	0,13	0,26	1,11	2,8	4	4,43	0,034	0,74

Таблица 1

Толщина защиты из обычного бетона (см)

Точки	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8	A_9	A_{10}
A	230	255	265	280	280	290	295	300	230	265
A^1		240	240	245	255	255	265	275	-	-
A^{11}		258	275	280	285	285	285	280	-	-

Таблица 2

Толщина защиты из тяжелого бетона (см)

Точки	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8	A_9	A_{10}
A							125	125	100	115
A^1						110	112	116	-	-
A^{11}		109	116	118	120	120	120	118	-	-

Таблица 3

1.2. Мощность дозы нейтронов на расстоянии R от мишени определяется по формуле:

$$P = \frac{\alpha \cdot Y_n}{4\pi R^2 \cdot 10^4 \cdot K}, \quad (2)$$

где Y_n – поток нейтронов из мишени нейтрон/с; α – коэффициент перевода плотности потока нейтронов в мощность дозы ($\alpha = 1,7 \text{ мкЗв} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{с} / \text{ч}$ – [3]); R – расстояние от мишени до расчетной точки (м); K – кратность ослабления мощности дозы нейтронов в материале защиты. Расчет кратности ослабления проведен методом длин релаксации:

$$K_{H_i} = e^{\lambda_i d_i}, \quad (3)$$

где d_i – толщина радиационной защиты из i-го материала; λ_i – длина релаксации нейтронов в i-м материале. В частности, у обычного бетона $\lambda=16$ см, тяжелого бетона $\lambda=12$ см, железа $\lambda=6,5$ см. Для расчета выхода фотонейтронов за счет потерь пучка в секциях ускорителя рассматривались различные методы расчета выхода нейтронов ($1Y_n$, $2Y_n$, $3Y_n$).

Так, в варианте $1Y_n$ – рассчитывался выход нейтронов из меди при энергии электронов 12, 20, 30 и 40 МэВ методом линейной экстраполяции [4]. При энергии электронов 50...100 МэВ выход нейтронов вычислялся по формуле

$$Y_n = (1,5 \cdot 10^{-4}) N E \text{ нейтрон/с}, \quad (4)$$

где N – поток электронов, взаимодействующих с мишенью. В варианте $2Y_n$ были взяты за основу данные по выходу фотонейтронов из полубесконечной медной мишени в зависимости от энергии электронов E на кВт мощности пучка электронов [5]. В варианте $3Y_n$ – выход нейтронов вычислен по формуле (4) во всем диапазоне значений E_0 .

В Табл. 4 приведены значения энергии электронов, при которых происходят потери тока пучка и выход нейтронов в зависимости от этих потерь в каждой секции для трех вариантов расчета.

Таблица 4

Потери пучка и выход нейтронов

Энергия электронов, МэВ	12	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Потери пучка, мкА	210	2,6	1,71	1,3	1,04	0,87	0,74	0,65	0,58	0,52
Выход нейтронов, 10^{10} нейтрон/с	$1Y_n$	4,2	0,98	2,46	3,65	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88
	$2Y_n$	5	0,78	2,6	3,9	4,4	4,7	4,9	5,2	5,5
	$3Y_n$	236	4,88	4,81	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88

Из данных Табл. 4 видно, что результаты расчета по вариантам $1Y_n$ и $2Y_n$ согласуются между собой. Выход нейтронов, вычисленный по формуле (4), при энергиях электронов до 50 МэВ дает завышенные значения. В Табл. 5 приведена плотность потока быстрых нейтронов в расчетных точках (без защиты) с учетом расстояния от каждой секции до расчетной точки и Cos угла падения нейтронов на внутреннюю поверхность рабочей камеры ускорителя.

В Табл. 6 приведены расчетные значения толщины защиты из обычного бетона при потерях пучка, указанных в исходных данных (плотность потока нейтронов за защитой – $2,41$ нейтрон/см²·с).

В Табл. 7 приведены расчетные параметры защиты из тяжелого бетона при потерях пучка, указанных в исходных данных (плотность потока нейтронов за защитой – $2,41$ нейтрон/см²·с).

Таблица 5

Плотность потока быстрых нейтронов (нейтрон/см²·с) в расчетных точках без защиты

Точки	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	A ₇	A ₈	A ₉	A ₁₀
A	14520	23040	68630	50060	106700	141400	151430	77524	12470	56600
A ¹		15160	21550	28200	38400	45340	48030	61008	-	-
A ¹¹		20470	51060	46500	90200	108630	128890	58473	-	-

Таблица 6

Расчетные значения толщины защиты из обычного бетона от нейтронов (см)

Точки	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	A ₇	A ₈	A ₉	A ₁₀
d _{об} A	140	147	165	160	171	176	177	166	137	161
d _{об} A ¹		140	146	150	155	158	159	163	-	-
d _{об} A ¹¹		145	160	158	169	172	174	162	-	-

Таблица 7

Расчетные значения толщины из тяжелого бетона от нейтронов (см)

Точки	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	A ₇	A ₈	A ₉	A ₁₀
d _{тб} A	105	110	124	120	128	132	133	125	103	121
d _{тб} A ¹		105	109	113	116	118	119	122	-	-
d _{тб} A ¹¹		109	120	119	126	129	130	121	-	-

Толщина двери, находящейся напротив б^й секции, должна составлять 69 см железа, а толщина защиты

подкритической сборки от нейтронов в точке A₁₁ – 210 см тяжелого бетона.

2. АКТИВАЦИЯ ОБОРУДОВАНИЯ УСКОРИТЕЛЯ

Активация ускоряющих секций, изготовленных из меди, будет происходить за счет образования изотопов Cu-62 и Cu-64 с периодом полураспада 9,8 мин и 12,8 ч соответственно. При общих потерях пучка в ускорителе 1 кВт (в каждой секции пропорционально $1/E_0$) и выходе нейтронов пропорционально E_0 активация секций будет примерно одинаковой. Через время работы ускорителя, равное трем периодам полураспада, активация секций выйдет в режим насыщения. Спустя 11 суток после выключения ускорителя уровень излучения будет определяться только остаточной активностью изотопа Cu-64. Ее величина в каждой из 9-и секций не будет превышать $3,3 \cdot 10^4$ Бк. Аналогично будет происходить наработка изотопов в поворотных магнитах В1 и В2 (см. Рис. 2).

Расчет выхода изотопов был проведен в консервативном приближении. Предполагалось, что потери пучка, равные 1 кВт при энергии электронов 100 МэВ, распределены равномерно в обоих магнитах. После выключения ускорителя активация поворотных магнитов не будет превышать:

- $3,7 \cdot 10^4$ Бк по Mn-52 спустя 20 суток;
- $7,6 \cdot 10^4$ Бк по Mn-54 спустя 1 год;
- $1,3 \cdot 10^3$ Бк по Mn-56 спустя 36 часов.

Таким образом, активность изотопа Mn-54 будет определять время выдержки магнитов для достижения МЗА (минимально значимой активности на рабочем месте).

3. АКТИВАЦИЯ КРЫШКИ ПКС

Расчет активности ПКС проведен в консервативном приближении. Предполагалось, что потери пучка, равные 1 кВт при энергии электронов 100 МэВ, происходят в первом магните В1, а 90% мощности излучения заключено в конусе $\pm 15^\circ$. При этом основная часть излучения попадает на расположенную за магнитом В2 поверхность стены из тяжелого бетона площадью 1 м^2 . После выключения ускорителя поверхностная активность и величина МЭД на расстоянии 0,5 м от нижней части поверхности стены за магнитом В2 (крышки ПКС из тяжелого бетона) будут:

- $2,32 \cdot 10^7$ Бк/м² по Mn-52 спустя 20 суток (0,2 мкЗв/ч);
- $0,77 \cdot 10^7$ Бк/м² по Mn-54 спустя 1 год (0,32 мкЗв/ч);
- $1,6 \cdot 10^4$ Бк/м² по Mn-56 спустя 48 часов (0,02 мкЗв/ч).

4. НАРАБОТКА ОЗОНА, ОКИСЛОВ АЗОТА, ИЗОТОПОВ ^{13}N , ^{15}O И ^{41}Ar

Методика расчета концентрации озона и наработки радионуклидов тормозным излучением в результате потерь пучка в ускорителе описана в [7]. Для установившегося режима работы ускорителя электронов ($E_0 = 100$ МэВ, $I_{\text{cp}} = 1$ мА) при потерях пучка, приведенных в исходных данных, их значения будут:

$$C_{\text{озона}} = 3,14 \text{ мг/м}^3 \quad (\text{ПДК}_{\text{Аозона}} = 0,1 \text{ мг/м}^3);$$

$$C_{\text{ок. азота}} = 2,05 \text{ мг/м}^3 \quad (\text{ПДК}_{\text{Аок. азота}} = 5 \text{ мг/м}^3);$$
$$C_{\text{O}}^{15} = 1,77 \cdot 10^6 \text{ Бк/м}^3 \quad (\text{ПДК}_{\text{O}}^{15} = 3,7 \cdot 10^4 \text{ Бк/м}^3);$$
$$C_{\text{N}}^{13} = 9,25 \cdot 10^5 \text{ Бк/м}^3; \quad (\text{ПДК}_{\text{N}}^{13} = 7,4 \cdot 10^4 \text{ Бк/м}^3).$$

Доза нейтронов с учетом их спектра и фотонов на поверхности боковой защиты ИН согласно результатам расчета ANL будет составлять 0,206 и 0,056 мР/ч. Используя эти данные, мы провели расчет концентрации озона, ядер ^{13}N , ^{15}O и ^{41}Ar в зале источника нейтронов (объем зала $V = 24 \cdot 30 \cdot 15,6 = 11232 \text{ м}^3$). При кратности воздухообмена 5 ч^{-1} она будет:

$$C_{\text{озона}} = 2,37 \cdot 10^{-3} \text{ мг/м}^3; \quad C_{\text{ок. азота}} = 6,75 \cdot 10^{-4} \text{ мг/м}^3;$$
$$C_{\text{Ar}}^{41} = 4,1 \cdot 10^{-3} \text{ Бк/м}^3; \quad (\text{ПДК}_{\text{Ar}}^{41} = 1,85 \cdot 10^6 \text{ Бк/м}^3);$$
$$C_{\text{N}}^{13} = 1,22 \cdot 10^{-2} \text{ Бк/м}^3; \quad (C_{\text{O}}^{15} = 2,22 \cdot 10^{-2} \text{ Бк/м}^3).$$

ВЫВОДЫ

Так как участки потолков и стен рабочей камеры лишь в исключительных случаях могут подвергаться воздействию прямого пучка излучения, то коэффициент U в табл. 3.1 работы [4] можно принять равным 4. Коэффициент T , который учитывает частичную занятость помещений, согласно табл. 3.1 работы [4] можно принять равным 16. Это позволяет значительно (в 64 раза) увеличить допустимые значения мощности дозы излучения на поверхности бетонной защиты. Таким образом, выбранной толщины защиты из обычного и тяжелого бетона должно быть достаточно для безопасной эксплуатации установки.

При энергии электронов 12 МэВ в энергетическом фильтре будут также рождаться нейтроны с энергиями до 5 МэВ. В случае необходимости имеется возможность создать дополнительную локальную защиту из свинца. После проведения дозиметрических измерений можно будет уточнить ее толщину.

Результаты расчетов радиационной защиты, полученные в ANL, IHER и ННЦ ХФТИ, удовлетворительно согласуются между собой.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Н.И. Айзацкий, Б.В. Борц, А.Н. Водин, П.А. Демченко, А.Ю. Зелинский, И.М. Карнаухов и др. Источник нейтронов ННЦ ХФТИ // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерно-физические исследования»* (79). 2012, №3, с. 1-9.
2. *Нормы радиационной безопасности Украины* (НРБУ-97), Киев, 1997. *Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности Украины. Государственные санитарные правила* 6.177-2005-09-02, Киев, 2005.
3. *Санитарные правила размещения и эксплуатации ускорителей электронов с энергией до 100 МэВ*. 2.6.1.2573-2010 РФ.
4. *Унифицированные правила устройства и безопасной эксплуатации радиационно-технологических установок. (Унифицированные правила гамма-электрон)*, 1988.
5. *Защита от ионизирующих излучений. Т. 2* / Под редакцией Н.Г. Гусева. 3-е изд. переработанное и дополненное. М.: «Энергоатомиздат», 1989.

6. Н.Г. Гусев. *Справочник по радиоактивным излучениям и защите*. М.: "Медгиз", 1956.
7. А.В. Ганн, В.В. Ганн, Г.Д. Пугачев, И.И. Шаповал, И.А. Шаповал, В.С. Шестакова. Зависимость скорости образования радионуклидов ^{13}N и ^{15}O в воздухе от максимальной энергии и спектра тормозного излучения // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерно-физические исследования»* (53). 2010, №2, с. 178-180.
8. G.D. Pugachev, D.G. Pugachev, O.A. Repikhov, V.S. Shestakova, A.V. Mazilov, T.N. Semenets. Radiation protection complex of high-current distributed electron accelerators // *Problems of Atomic Science and Technology. Series «Nuclear Physics Investigations»*. 2001, v. 38, №3, p. 196.

Article received 23.10.2013

RADIATION SHIELD OF THE ELECTRON ACCELERATOR-DRIVER OF SUBCRITICAL ASSEMBLY

P.A. Demchenko, A.N. Dovbnya, A.Yu. Zelinsky, I.M. Karnaukhov, F.A. Peev, G.D. Pugachov, V.L. Uvarov

In NSC KIPT jointly with Argonne National Laboratory (ANL USA) and Beijing institute of high-energy physics (IHER, China) an electron linac with mean beam current of 1 mA and energy 100 MeV is created for a driver of subcritical assembly. It is assumed that losses of the beam in the accelerator will be 1% ($\Delta I = 0.01$ mA) and their distribution along the accelerator will be inversely proportional against the electron energy in each of 10 accelerating sections. The losses of the beam at electron energy 12 MeV after the first section in an energy filter (chicane) are 2.5 kW. At exceeding of beam losses and level of radiation, the beam is automatically disconnected for time less than 0.01 sec. Calculation of radiation shield as well as activating accelerator equipment and air in a working chamber with gammas of the bremsstrahlung radiation appearing under interaction of electron beam with the elements of accelerating structure and output devices of the accelerator has been carried out.

РАДІАЦІЙНИЙ ЗАХИСТ ЕЛЕКТРОННОГО ПРИСКОРЮВАЧА-ДРАЙВЕРА ПІДКРИТИЧНОЇ ЗБІРКИ

П.О. Демченко, А.М. Довбня, А.Ю. Зелінський, І.М. Карнаухов, Ф.А. Пеев, Г.Д. Пугачов, В.Л. Уваров

У ННЦ ХФТІ спільно з Аргонською національною лабораторією (ANL, США) і Пекінським інститутом фізики високих енергій (ІНЕР, Китай) для управління підкритичною збіркою створюється лінійний прискорювач електронів з середнім струмом 1 мА і енергією 100 МеВ. Передбачається, що втрати пучка в прискорювачі складатимуть 1% ($\Delta I = 0,01$ мА), а їх розподіл уздовж прискорювача є обернено пропорційний до енергії електронів E_0 в кожній з 10 прискорюючих секцій. Втрати пучка після першої секції в енергетичному фільтрі (chicane) складатимуть 2,5 кВт при енергії електронів 12 МеВ. При перевищенні втрат пучка і збільшенні рівня випромінювання відключення пучка відбуватиметься автоматично за термін менший 0,01 с. Проведено розрахунок радіаційного захисту, активації обладнання прискорювача та повітря робочої камери γ -квантами гальмівного випромінювання, що утворюються при взаємодії електронного пучка з елементами прискорюючої структури і вихідними пристроями прискорювача.