

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННОЙ ОБСТАНОВКИ ВОКРУГ БУСТЕРА NICA

Г. Н. Тимошенко^{а, б, 1}, И. С. Гордеев^{а, б}

^а Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

^б Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия

Приведены результаты расчета радиационной обстановки вокруг корпуса № 1 ЛФВЭ, в котором размещены системы инъекции ионов, бустер и нуклотрон комплекса NICA, с помощью пакета FLUKA при работе на коллайдер и на эксперименты с фиксированными мишенями. Расчет выполнен для режима ускорения ионов ^{197}Au до энергии 4,5 ГэВ/нуклон. Основным дозобразующим компонентом поля излучения вокруг здания являются нейтроны широкого спектра энергий. В расчете использовались детализированные модели тракта ускорения ионов, геометрии защит и деталей здания. Результаты расчета свидетельствуют, что принятые проектные решения при заданных темпах потерь ионов обеспечат соблюдение нормативов радиационной безопасности при работе бустера NICA.

The results of the calculation by FLUKA code of the radiation environment around building No. 1 of VBLNER, which contains ion injection systems, a booster and Nuclotron of the NICA complex, when working for the collider and for experiments with fixed targets, are presented. The calculation was performed for the ^{197}Au ion acceleration mode to an energy of 4.5 GeV/nucleon. The main dose-forming component of the radiation field around the building is neutrons of a wide energy range. In the calculation, detailed models of ion acceleration ring, geometry of shields and building details were used. The calculation results indicate that the adopted design decisions at the given rates of ion losses will ensure compliance with radiation protection norms during the operation of the NICA booster.

PACS: 28.41.Te; 29.20.db; 87.53.Bn

Сверхпроводящий тяжелоионный синхротрон, используемый в качестве бустера нуклотрона при работе в составе инъекционного комплекса коллайдера NICA, размещается внутри кольцевого яма магнита бывшего синхрофазотрона ЛФВЭ ОИЯИ. Энергия инжектируемых в бустер ионов $^{197}\text{Au}^{31+}$ — 3,2 МэВ/нуклон, максимальная энергия после ускорения — 578 МэВ/нуклон, цикл ускорения — 0,25 Гц. К сожалению, массивное железное ядро магнита синхрофазотрона не является надежной радиационной защитой бустера из-за наличия большого числа проемов и открытых прямолинейных промежутков, через которые вторичное адронное излучение может выходить в зал корпуса № 1. Это не изменит статуса радиационной зоны внутри

¹E-mail: tim@jinr.ru

корпуса № 1, поскольку в нем помимо бустера расположен и основной ускоритель комплекса NICA — нуклотрон, и весь корпус № 1 является зоной запрета. Однако из-за того, что здание корпуса № 1 находится вблизи границы техплощадки ЛФВЭ, излучение утечки из бустера может дать дополнительный вклад в дозу на западной границе техплощадки ЛФВЭ. На этой границе должен соблюдаться предел эффективной дозы для населения 500 мкЗв/год от всех источников излучения комплекса с учетом коэффициента запаса 2 при проектировании [1]. Критическая (ближайшая) точка на границе техплощадки находится на расстоянии 113 м от центра бустера и нуклотрона. Основной вклад в дозу излучения в этой точке дают бустер и нуклотрон при работе комплекса на коллайдер, а также установки в корпусе № 205 при работе комплекса на эксперименты с фиксированными мишенями.

Поле излучения в окружающей корпус № 1 среде определяется, главным образом, нейтронами широкого спектра энергий, выходящими из оконных проемов и из легкого верхнего перекрытия корпуса. На больших расстояниях от корпуса поле нейтронов формируется за счет их многократного рассеяния в воздухе, грунте и окружающих объектах (так называемый эффект *skyshine*).

Значение парциальной дозы от бустера в окружающей его среде зависит от режима работы бустера и длительности его работы при каждом режиме, от места локализации потерь пучка в разных фазах ускорения ионов и от значений этих потерь. Планируется, что бустер будет работать в двух режимах: в составе инжекционного комплекса коллайдера и в режиме вывода пучка нуклотрона в корпус № 205 на эксперименты с фиксированными мишенями. В первом режиме интенсивность пучка ионов на выходе из бустера составляет $1,27 \cdot 10^9$ ионов/цикл при длительности цикла 4 с, а во втором режиме в 5 раз меньше. Источниками потерь ионов, относящимися к бустеру, являются адиабатический захват инжектируемого пучка ионов в режим ускорения, бетатронные колебания ионов в фокусирующих магнитных полях ускорителя, выбывание ионов из фазового объема пучка за счет рекомбинации ионов с электронами системы электронного охлаждения (СЭО) бустера, а также наличие обдирочной мишени, системы разделения пучка на ионы целевой и нецелевой зарядности, ловушки пучка ионов нецелевой зарядности.

Линейный ускоритель тяжелых ионов (НИЛАС), являющийся инжектором бустера, не принимался в расчет как источник внешнего нейтронного излучения в окружающей среде из-за низкой энергии инжектируемых в бустер ионов — 3,2 МэВ/нуклон. При такой энергии ионов золота выход нейтронов из железной мишени в 4π ср составляет всего $5,7 \cdot 10^{-7}$ нейтрон/ион. Потерями ионов при их адиабатическом захвате после инжекции также можно пренебречь, поскольку выход нейтронов при взаимодействии ионов столь низкой энергии с веществом несуществен.

Электронное охлаждение производится при энергии ионов 65 МэВ/нуклон. Потери ионов с энергией 65 МэВ/нуклон из-за рекомбинации с электронами будут сосредоточены в четвертом прямолинейном промежутке бустера. При работе СЭО возникает мягкое тормозное излучение с энергией не более 35 кэВ, не влияющее на радиационную обстановку в окружающей бустер среде.

Планируемая средняя величина статического давления по кольцу бустера составит $\sim 3 \cdot 10^{-11}$ Торр. Потери ускоряемых ионов $^{197}\text{Au}^{31+}$ за счет взаимодействия с остаточным газом при таком среднем вакууме составят $\sim 0,1\%$, поэтому их можно не принимать во внимание при оценке радиационной обстановки.

Потери ионов при адиабатическом захвате ионов с энергией 65 МэВ/нуклон и их ускорении до энергии 578 МэВ/нуклон будут сосредоточены в центральных частях всех квадрантов бустера, а также в секциях инжекции и вывода, поскольку именно там будут иметь место наибольшие амплитуды бетатронных колебаний пучка. Потери ионов в обдирочной мишени, расположенной в третьем прямолинейном промежутке бустера, составляют менее 1%, и она не является значимым радиационным источником из-за ее малой толщины (125 мг/см² меди). Энергия же ионов после мишени снижается до 572 МэВ/нуклон. Эффективность обдирки ионов до целевой зарядности $^{197}\text{Au}^{79+}$ составит около 90%. Часть пучка с ионами целевой зарядности $^{197}\text{Au}^{79+}$ и энергией 572 МэВ/нуклон будет направляться в нуклотрон, а оставшиеся ионы нецелевой зарядности будут направляться в ловушку.

Предполагаемые темпы потерь ионов в бустере приведены в табл. 1.

Расчет полей излучения вокруг бустера производился с помощью пакета FLUKA2011.2X.6 [2]. Из-за уникальности пучка ионов комплекса NICA необходимо было предварительно проверить адекватность расчетов по программе на имеющемся экспериментальном материале. К сожалению, экспериментальная информация о спектрально-угловых распределениях вторичных частиц при взаимодействии сверхтяжелых ядер высокой энергии с веществом крайне ограничена, особенно в части выходов нейтронов в ядро-ядерных взаимодействиях. Существует единственный эксперимент, выполненный в GSI, по измерению дважды дифференциального по углу и энергии выхода нейтронов из железной мишени, облучаемой ядрами ^{238}U с энергией 1 ГэВ/нуклон [3, 4], который в достаточной мере удовлетворяет условиям работы комплекса NICA. Было проведено сравнение расчетов по FLUKA и GEANT4 с этим экспериментом, показавшее удовлетворительное согласие [5].

Энергетическое распределение потерь ионов в диапазоне 3,2–65 МэВ/нуклон на начальном этапе ускорения в бустере задается гистограммой с весами:

- 1) 3,2–10 МэВ/нуклон — 40% ($1,667 \cdot 10^6 \text{ c}^{-1}$);
- 2) 10–25 МэВ/нуклон — 25% ($1,042 \cdot 10^6 \text{ c}^{-1}$);
- 3) 25–45 МэВ/нуклон — 20% ($8,33 \cdot 10^5 \text{ c}^{-1}$);
- 4) 45–65 МэВ/нуклон — 15% ($6,25 \cdot 10^5 \text{ c}^{-1}$).

Энергетическое распределение потерь ионов в диапазоне 65–578 МэВ/нуклон при ускорении в бустере задается гистограммой с весами:

- 1) 65–100 МэВ/нуклон — 25% ($8,33 \cdot 10^5 \text{ c}^{-1}$);
- 2) 100–200 ГэВ/нуклон — 45% ($1,5 \cdot 10^6 \text{ c}^{-1}$);
- 3) 200–500 ГэВ/нуклон — 25% ($8,33 \cdot 10^5 \text{ c}^{-1}$);
- 4) 500–578 ГэВ/нуклон — 5% ($1,667 \cdot 10^5 \text{ c}^{-1}$).

В расчетах принималось, что ионы, выбывшие по тем или иным причинам из фазового объема пучка, ударяются в стенку вакуумной камеры под малыми углами (0–3°), рождая в ядерных реакциях вторичное излучение, направленное, преимущественно, вперед по направлению пучка. Далее это излучение взаимодействует с веществом элементов магнитной оптики и массивным ярмом магнита синхροфазотрона, а часть его может выходить за пределы бустера через проемы и щели в ярме и прямолинейные промежутки между квадрантами. В программе учитывался транспорт в веществе нейтронов с энергией от тепловой и выше, а также заряженных частиц (протонов и π -мезонов с энергией более 1 МэВ). Рождение и транспорт γ -квантов не рассматривались, но из практики известно, что вклад γ -квантов

Таблица 1. Интенсивности пучков (ионов/цикл), темпы потерь (ионов/цикл) и энергии ядер ^{197}Au на различных этапах ускорения в бустере

№	Источник потерь	Начальная энергия, ГэВ/нуклон	Конечная энергия, ГэВ/нуклон	Начальная интенсивность, цикл^{-1}	Конечная интенсивность, цикл^{-1}	Потери, цикл^{-1}	Источник потерь	Распределение потерь по энергии
1	Начальный этап ускорения в бустере	0,0032	0,065	$2,0 \cdot 10^9$ ($^{197}\text{Au}^{31+}$)	$1,9 \cdot 10^9$ ($^{197}\text{Au}^{31+}$)	$1 \cdot 10^8$ (5%)	Поровну в центрах четырех арок и секциях инжекции и вывода	Равномерно 0,0032–0,065 ГэВ/нуклон
2	Бустер, комбинация ионов в СЭО	0,065	0,065	$1,9 \cdot 10^9$ ($^{197}\text{Au}^{31+}$)	$1,7 \cdot 10^9$ ($^{197}\text{Au}^{31+}$)	$2 \cdot 10^8$ (10,5%)	В арке квадранта 4	0,065 ГэВ/нуклон
3	Адиабатический захват	0,065	0,065	$1,7 \cdot 10^9$ ($^{197}\text{Au}^{31+}$)	$1,53 \cdot 10^9$ ($^{197}\text{Au}^{31+}$)	$1,7 \cdot 10^8$ (10%)	Поровну в центрах четырех арок и секциях инжекции и вывода	0,065 ГэВ/нуклон
4	Ускорение в бустере	0,065	0,578	$1,53 \cdot 10^9$ ($^{197}\text{Au}^{31+}$)	$1,45 \cdot 10^9$ ($^{197}\text{Au}^{31+}$)	$8 \cdot 10^7$ (5,2%)	Поровну в центрах четырех арок и секциях инжекции и вывода	0,065–0,578 ГэВ/нуклон
5	Канал транспортировки из бустера в нуклотрон	0,572	0,572	$1,3 \cdot 10^9$ ($^{197}\text{Au}^{79+}$)	$1,27 \cdot 10^9$ ($^{197}\text{Au}^{79+}$)	$3 \cdot 10^7$ (2,3%)	Линза QC2	0,572 ГэВ/нуклон
6	Канал транспортировки из бустера в нуклотрон	0,572	0,572	$1,27 \cdot 10^9$ ($^{197}\text{Au}^{79+}$)	$1,23 \cdot 10^9$ ($^{197}\text{Au}^{79+}$)	$4 \cdot 10^7$ (3,1%)	Обдирочный септум №3	0,572 ГэВ/нуклон
7	Канал транспортировки из бустера в ловушку	0,572	0,572	$1,5 \cdot 10^8$ (ионы нецелевой зарядности)	$1,465 \cdot 10^8$ (ионы нецелевой зарядности)	$3,5 \cdot 10^6$ (2,3%)	Линза QC2	0,572 ГэВ/нуклон
8	Канал транспортировки из бустера в ловушку	0,572	0,572	$1,465 \cdot 10^8$ (ионы нецелевой зарядности)	$1,42 \cdot 10^8$ (ионы нецелевой зарядности)	$4,5 \cdot 10^6$ (3,1%)	Обдирочный септум №3	0,572 ГэВ/нуклон
9	Ловушка ионов нецелевой зарядности	0,572	0,572	$1,42 \cdot 10^8$ (ионы нецелевой зарядности)	0	100%	Ловушка	0,572 ГэВ/нуклон

в полную дозу смешанного излучения в окружающей ускорители среде не превышает 10%.

В расчетах полей нейтронов skyshine в окружающей среде использовалась детализированная трехмерная геометрия бустера с проемами и щелями, корпуса №1 с оконными проемами и пристройками к нему, учитывался слой грунта толщиной 1 м и полусферический объем воздуха радиусом 1500 м вокруг корпуса №1. В расчете учитывалась также одна стена корпуса №205 (ближняя к зданию №1), на которой может происходить перерассеивание нейтронов. Геометрия корпуса №1 с бустером внутри, использованная в расчетах, показана на рис. 1.

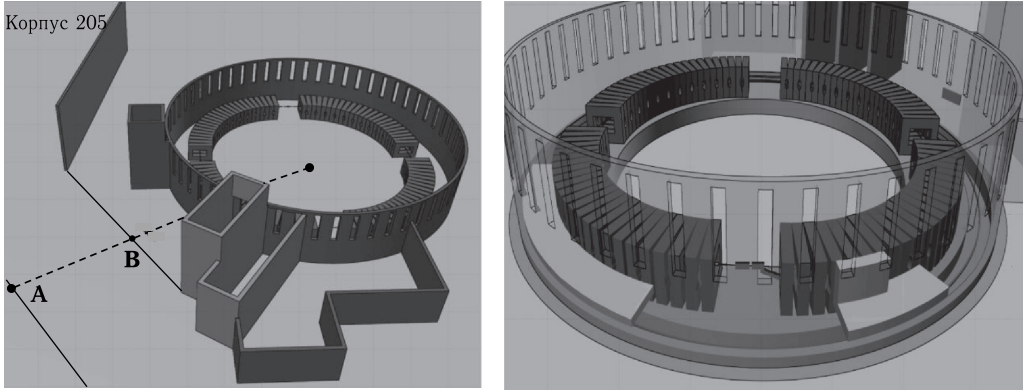


Рис. 1. Геометрия корпуса № 1 с бустером для расчета радиационной обстановки на прилегающей территории

На рис. 1 представлена геометрия бустера и прилегающих к корпусу № 1 зданий, использованная в расчетах годовой дозы нейтронов в критической точке А на границе СЗЗ. Учитывались пристройки инжекционного комплекса бустера, способные повлиять на пространственное распределение нейтронов skyshine в районе критической точки на границе техплощадки ЛФВЭ. Во всем корпусе № 205 учитывалась только одна стена, обращенная к корпусу № 1, на которой может происходить перерассеяние нейтронов. Состав материалов, используемых в расчетах, приведен в табл. 2.

В расчетах использовалась модель кольца бустера периметром 2109,6 см, состоящего из регулярных периодов элементов магнитной оптики (FDO) и 4 прямолинейных промежутков. Каждый период длиной 879 см включает в себя 2 дипольных магнита, квадрупольные (фокусирующую и дефокусирующую) линзы и 4 промежутка, в которых монтируются корректирующие магниты и диагностическое оборудование (рис. 2).

Таблица 2. Химический состав материалов, используемых в расчетах

Вещество	Элемент (весовое содержание, %)
Грунт, $\rho = 1,7 \text{ г/см}^3$	Si (46,6), O (53,4)
Кирпич, $\rho = 1,75 \text{ г/см}^3$	Si (52,3), O (35,9), Ca (11,8)
Бетон, $\rho = 2,3 \text{ г/см}^3$	H (1), O (52,9), Na (1,6), Si (33,7), Ca (4,4), Mg (0,2), C (0,1), Al (3,4), K (1,3), Fe (1,4)
Воздух, $\rho = 1,29 \text{ г/см}^3$	N (74,4), O (24,1), Ar (1,3), H (0,2)

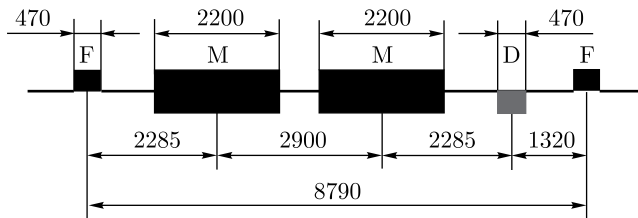


Рис. 2. Схема периода FDO. М — дипольный магнит, F, D — квадрупольные линзы

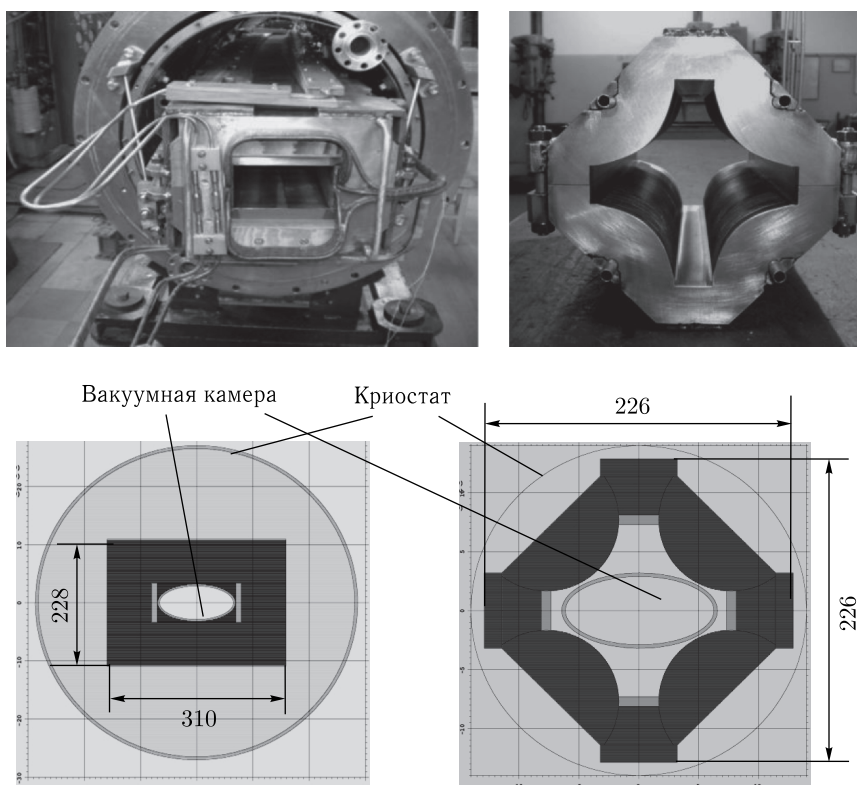


Рис. 3. Фото и расчетные сечения дипольного магнита (слева) и квадрупольной линзы (справа)

Длина дипольного магнита — 220 см, линзы — 47 см. Материал яра магнитов — трансформаторная сталь. В прямолинейных промежутках длиной 700 см дипольные магниты отсутствуют. Через магниты проходит вакуумная камера бустера, в стенке которой происходит первичное взаимодействие с веществом потерянных при ускорении ионов золота. Камера бустера имеет вид эллиптического тороида с внешними размерами 130×64 мм со стальной стенкой толщиной 3 мм. Диаметр вакуумного кожуха криостата составляет 640 мм.

Фото и расчетные (упрощенные) модели дипольных и квадрупольных магнитов показаны на рис. 3.

Принятое в расчетах сечение яра магнита синхрофазотрона, в котором размещается бустер, представлено на рис. 4, *а*. На рис. 4, *б* показан вид яра с щелями и проемами, а на рис. 5 приведена схематическая геометрия фрагмента бустера внутри яра синхрофазотрона, примененная в расчетах.

Канал инжекции пучка бустера в нуклотрон имеет сложную трехмерную геометрию. Пучок ионов после обдирочной мишени будет за один оборот выводиться из бустера вниз и вправо, разделяясь септум-магнитом на два пучка разной зарядности. В качестве ловушки пучка ионов нецелевой зарядности будет использоваться массивный бетонный фундамент корпуса № 1 (толщина ~ 7 м), отделяющий его от

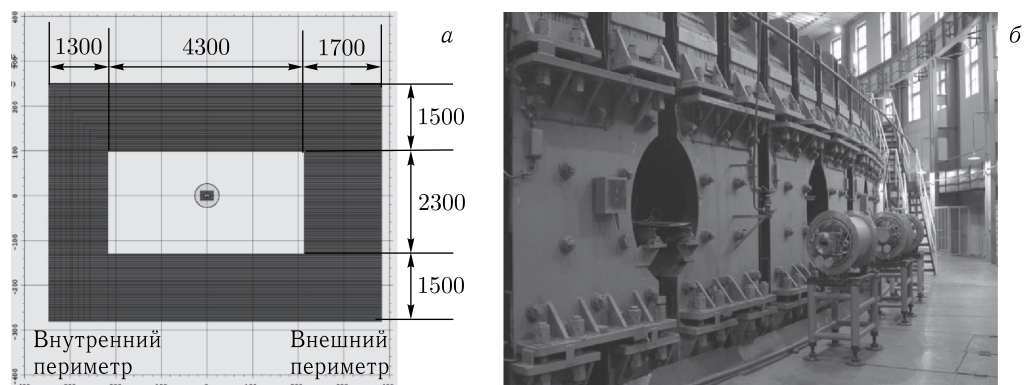


Рис. 4. Сечение яра синхрофазотрона с размещенным внутри бустером (а) и фотография яра с щелями и проемами (б)

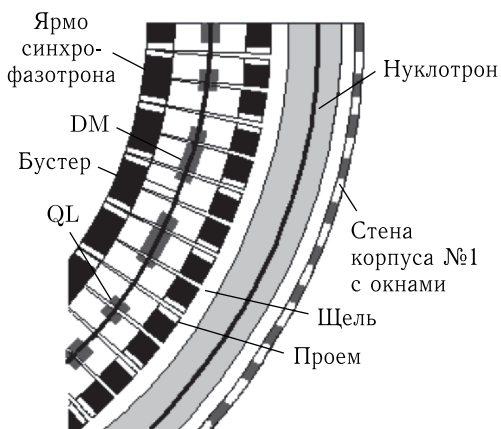


Рис. 5. Схематический вид фрагмента бустера внутри яра синхрофазотрона в корпусе № 1

в яре синхрофазотрона удаляется одна боковая секция. Основные потери пучка в канале сосредоточены в линзе QC2 (в яре синхрофазотрона) и в септум-магните (в туннеле нуклотрона). Для защиты от прямого излучения проем в яре в месте удаленной секции будет перекрыт бетонной защитой толщиной 1 м (боковая стена 1 на рис. 6).

Дополнительно рассматривалась возможность создания верхнего перекрытия туннеля нуклотрона в районе канала перевода пучка из бустера в нуклотрон (плита 2 на рис. 6). Расчет был выполнен для перекрытия толщиной 1 м протяженностью 12 м с тем, чтобы закрыть район над септумом.

Общий план бустера в здании № 1 с каналом инъекции в нуклотрон показан на рис. 7. Критическая точка А на периметре техплощадки ЛФВЭ находится напротив 4-го квадранта бустера на расстоянии 113 м от его центра (на рис. 7 это направление показано стрелкой R). Еще одна важная точка В (см. рис. 1) находится на ограждении

измерительного павильона. Пучок нецелевых ионов будет входить в нее под небольшим наклоном вниз через заглубленный коллиматор. При такой конструкции ловушки факел вторичного адронного излучения будет направлен в землю и станет полностью гаситься в ней. Поэтому ловушка пучка нецелевых ионов не рассматривалась как радиационный источник при оценке радиационной обстановки в окружающей бустер среде.

Длина канала перевода пучка из бустера в нуклотрон составляет около 20 м. Он начинается в третьем прямолинейном промежутке бустера и заканчивается в районе шестого прямолинейного участка нуклотрона. Для вывода канала из бустера

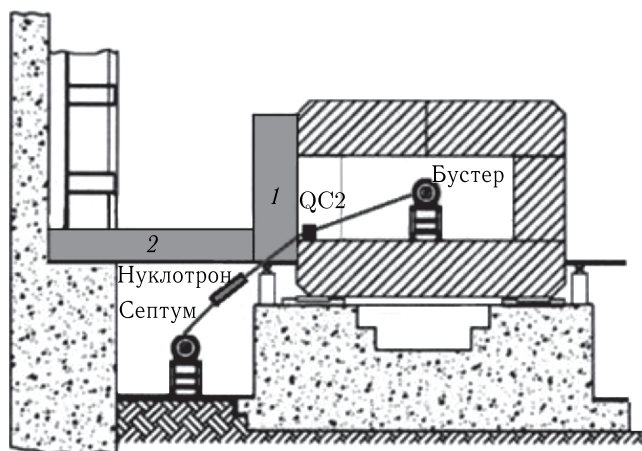


Рис. 6. Расположение дополнительных защит в районе канала инъекции пучка из бустера в нуклотрон. 1 — вертикальная бетонная защита проема в ярме; 2 — верхнее бетонное перекрытие туннеля нуклотрона в районе инъекции пучка в нуклотрон

между инъекционным корпусом и корпусом № 205 территории исключенного доступа в нее персонала группы Б.

Результатом расчетов по программе FLUKA явилось пространственное распределение энергетического флюенса нейтронов и заряженных частиц вокруг корпуса № 1, генерируемых при работе бустера в нормальном режиме с потерями пучка ионов золота, указанными в табл. 1. Эффективная доза нейтронов и заряженных частиц определялась путем свертки их энергетических флюенсов с коэффициентами конверсии флюенс–эффективная доза для определенных условий облучения человека. Облучение человека многократно рассеянным в окружающей среде излучением имеет характер, близкий к изотропному. В расчетах использовались коэффициенты конверсии нейтронов для случая изотропного облучения [6], поскольку энергия нейтронов в НРБ-99/2009 ограничена значением 20 МэВ, а энергия нейтронов утечки из защиты бустера может простирается до нескольких сотен мегаэлектронвольт. Результирующий спектр нейтронов Φ в критической точке приведен на рис. 8 в единицах летаргии.

В спектре наблюдается незначительное накопление тепловых нейтронов и слабый максимум каскадных нейтронов в области энергий $\sim 100\text{--}200$ МэВ.

Распределение значений мощности эффективной дозы нейтронов в критической точке А на заборе напротив корпуса № 1 при изотропном облучении в режиме работы бустера на коллайдер приведено в табл. 3. Эти значения соответствуют потерям в бустер, указанным в табл. 1. В первой колонке приведены номера пунктов из табл. 1, соответствующих данному этапу ускорения.

Обозначения в четвертой колонке: Q соответствует квадранту бустера, L — его прямолинейному промежутку. Годовая доза нейтронов получена из расчета работы бустера 749,4 ч/год с максимальной интенсивностью пучка. В расчетах получена также оценка годовой эффективной дозы заряженных частиц в точке А — $9,24 \cdot 10^{-2}$ мкЗв.

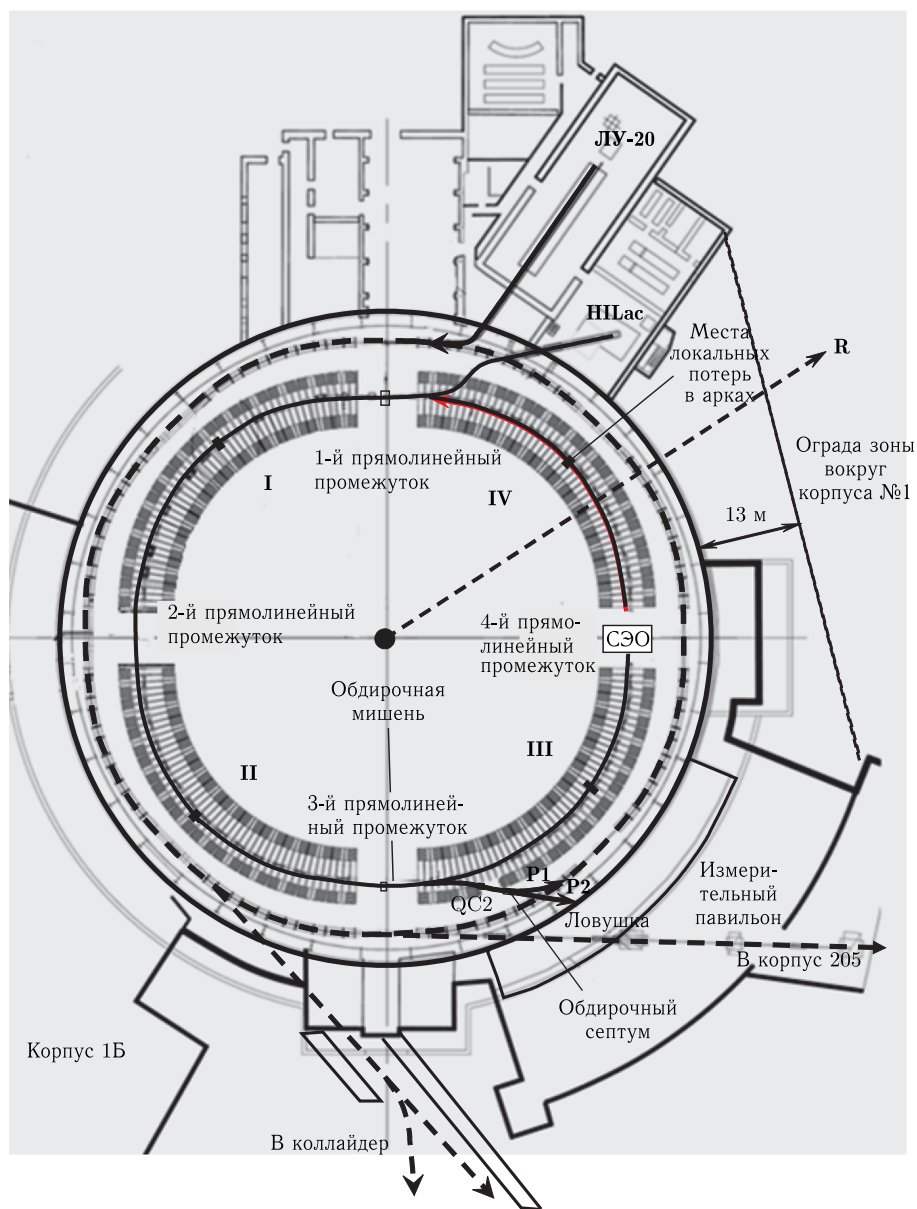


Рис. 7. Размещение бустера и коллайдера в корпусе № 1 и локализация источников для расчета радиационной обстановки вокруг бустера. СЭО — система электронного охлаждения бустера; P1 — пучок ионов целевой зарядности; P2 — пучок ионов нецелевой зарядности; QC2 — магнитная линза; R — направление на ближайшую точку А на периметре техноплощадки ЛФВЭ

Как и ожидалось, вклад заряженных частиц в поле нейтронов skyshine незначителен. В последней колонке приведена суммарная оценка годовой дозы смешанного излучения (нейтроны, γ -кванты, заряженные частицы).

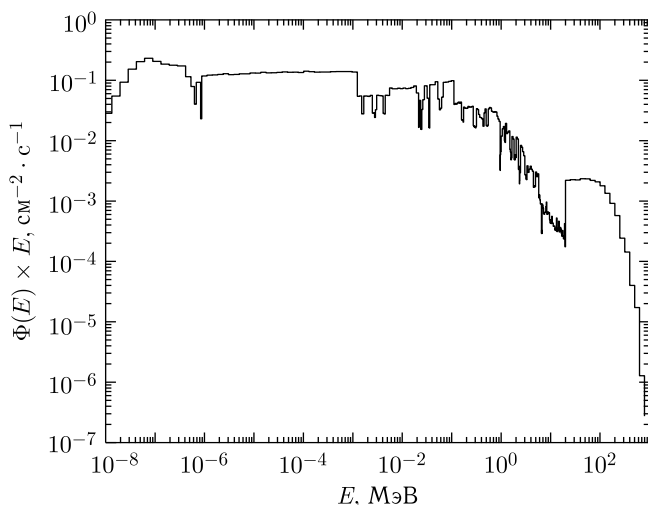


Рис. 8. Спектр нейтронов в критической точке А на периметре техплощадки ЛФВЭ

Таблица 3. Значения годовой эффективной дозы от бустера в точке А при изотропном облучении

Номер поз.	Этап	Энергия, МэВ/нуклон	Локализация потерь	Доза нейтронов на 1 ион, пЗв/ион	Потери, ион/с	Мощность дозы нейтронов, мкЗв/ч	Годовая доза нейтронов, мкЗв	Суммарная годовая доза, мкЗв
1	Начальный этап ускорения	3,2–65	1Q	2,838E-10	4,17E+06	4,258E-06	3,191E-03	3,510E-03
			2Q	2,773E-10	4,17E+06	4,159E-06	3,117E-03	3,429E-03
			3Q	3,819E-10	4,17E+06	5,729E-06	4,293E-03	4,722E-03
			4Q	6,520E-10	4,17E+06	9,780E-06	7,329E-03	8,062E-03
			1L	3,244E-09	4,17E+06	4,867E-05	3,647E-02	4,012E-02
			3L	2,830E-09	4,17E+06	4,246E-05	3,182E-02	3,500E-02
			Всего					
2	Рекомбинация ионов в СЭО	65	4Q	1,479E-08	5E+07	2,662E-03	1,995E+00	2,195E+00
3	Адиабатический захват	65	1Q	1,367E-09	7,08E+06	3,486E-05	2,612E-02	2,873E-02
			2Q	1,297E-09	7,08E+06	3,309E-05	2,479E-02	2,727E-02
			3Q	1,769E-09	7,08E+06	4,511E-05	3,380E-02	3,718E-02
			4Q	3,084E-09	7,08E+06	7,864E-05	5,893E-02	6,483E-02
			1L	1,404E-08	7,08E+06	3,581E-04	2,683E-01	2,952E-01
			3L	1,1769E-08	7,08E+06	2,249E-04	2,249E-01	2,474E-01
Всего							6,369E-01	7,006E-01
4	Ускорение в бустере	65–578	1Q	3,333E-08	3,33E+06	3,999E-04	2,997E-01	3,297E-01
			2Q	3,265E-08	3,33E+06	3,919E-04	2,937E-01	3,230E-01
			3Q	4,869E-08	3,33E+06	5,843E-04	4,379E-01	4,817E-01
			4Q	8,265E-08	3,33E+06	9,918E-04	7,433E-01	8,176E-01
			1L	2,363E-07	3,33E+06	2,835E-03	2,125E+00	2,337E+00
			3L	2,029E-07	3,33E+06	2,435E-02	1,825E+01	2,007E+01
Всего							2,214E+01	2,436E+01
5, 6	Канал бустер-нуклотрон	572	QC2	7,851E-08	8,38E+06 все потери	2,367E-03	1,774E+01	1,951E+01
7, 8	Канал бустер-ловушка	572	Септум	3,060E-07	1,11E+07 все потери	0,0125	9,183E+00	1,0101E+01
Суммарно в точке А от бустера, мкЗв/год							51,8	57,0

Значения мощности дозы при работе бустера в точке В на ограждении между НЛас и корпусом № 205 приведены в табл. 4.

Как следует из табл. 4, мощность дозы в точке В от бустера не будет превышать 0,073 мкЗв/ч, что много меньше допустимого уровня мощности дозы для персонала группы Б (1,2 мкЗв/ч с коэффициентом запаса 2).

Все приведенные выше результаты получены для варианта, при котором создание верхней защиты туннеля нуклотрона над септумом канала бустер–нуклотрон окажется невозможным. Однако роль верхней защиты над туннелем нуклотрона в районе перевода пучка из бустера в нуклотрон незначительна с точки зрения формирования поля в критических точках А и В. Это происходит из-за того, что данный источник затеняется пристройкой к корпусу № 1. Поэтому указанная верхняя защита будет играть роль только при формировании поля излучения в районе измерительного павильона и внутри него.

Таким образом, бустер, как радиационный источник, не вносит заметного вклада в формирование поля рассеянного излучения вокруг корпуса № 1, что создает хороший запас для учета вклада в радиационную обстановку других радиационных источников комплекса НИСА.

Таблица 4. Значения мощности дозы от бустера в точке В при изотропном облучении

Номер поз.	Этап	Энергия, МэВ/нуклон	Локализация потеря	Доза нейтронов на 1 ион, пЗв/ион	Потери, ион/с	Мощность дозы нейтронов, мкЗв/ч	Суммарная мощность дозы, мкЗв/ч
1	Начальный этап ускорения	3,2–65	1Q	6,096E–10	4,17E+06	9,144E–06	1,006E–05
			2Q	5,665E–10	4,17E+06	8,497E–06	9,347E–06
			3Q	1,211E–09	4,17E+06	1,816E–05	1,998E–05
			4Q	4,120E–09	4,17E+06	6,180E–05	6,798E–05
			1L	7,165E–09	4,17E+06	1,075E–04	1,182E–04
			3L	5,129E–09	4,17E+06	7,694E–05	8,464E–05
Всего						2,820E–04	3,102E–04
2	Рекомбинация ионов в СЭО	65	4Q	5,293E–08	5E+07	9,528E–03	1,048E–02
3	Адиабатический захват	65	1Q	2,814E–09	7,08E+06	7,175E–05	7,893E–05
			2Q	2,599E–09	7,08E+06	6,627E–05	7,289E–05
			3Q	6,697E–09	7,08E+06	1,708E–04	1,879E–04
			4Q	1,882E–08	7,08E+06	4,799E–04	5,279E–04
			1L	3,084E–08	7,08E+06	7,865E–04	8,652E–04
			3L	2,188E–08	7,08E+06	5,580E–04	6,138E–04
Всего						2,133E–03	
4	Ускорение в бустере	65–578	1Q	6,956E–08	3,33E+06	8,348E–04	9,182E–04
			2Q	6,779E–08	3,33E+06	8,135E–04	8,948E–04
			3Q	5,143E–07	3,33E+06	6,171E–03	6,788E–03
			4Q	5,027E–07	3,33E+06	6,032E–03	6,635E–03
			1L	5,362E–07	3,33E+06	6,434E–03	7,078E–03
			3L	3,944E–07	3,33E+06	4,732E–03	5,205E–03
Всего						2,502E–02	
5, 6	Канал бустер–нуклотрон	572	QC2	1,671E–07	8,38E+06 все потери	5,0385E–3	5,5424E–3
7, 8	Канал бустер–ловушка	572	Септум	6,046E–07	1,11E+07 все потери	0,0242	0,0266
Суммарно в точке В от бустера						6,62E–02	7,29E–02

Отдельный интерес представляет доза, которую может получить персонал в случае возникновения аварийной ситуации на ускорителе. Худший вариант аварийной ситуации — срыв состояния сверхпроводимости в одном из магнитов, вследствие чего локально в течение короткого времени происходит полная потеря пучка ионов. Такая ситуация была имитирована путем полной потери пучка ионов с энергией 578 МэВ в толстой мишени в центре 4-го квадранта бустера. Значение полной дозы в точке, непосредственно прилегающей к стене корпуса № 1, составило при этом $3,54 \cdot 10^{-5}$ пЗв на 1 ион пучка. Полагая, что максимальная высадка пучка при срыве сверхпроводимости может составить $\sim 1,5 \cdot 10^9$ ионов, получаем, что разовая доза в передне-задней геометрии сразу за стеной корпуса № 1 не превысит 0,053 мкЗв, что не представляет сколько-нибудь серьезной опасности для человека.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010). Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 26.04.2010.
2. <http://www.fluka.org/fluka.php?id=citations&mm2=3>
3. *Yordanov O. et al.* Neutron Yields from 1 GeV/u ^{238}U Beams on Fe Target // Nucl. Instr. Meth. B. 2005. V. 240. P. 863.
4. *Gunzert-Marx K., Radon T., Fehrenbacher G., Gutermuth F., Schardt D.* // PoS. V. 57: Proc. of the Intern. Workshop on Fast Neutron Detectors (FNDA2006), Univ. of Cape Town, South Africa, April 3–6, 2006.
5. *Beskrovnaia L., Florko B., Paraipan M., Sobolevsky N., Timoshenko G.* Verification of Monte Carlo Transport Codes FLUKA, GEANT4 and SHIELD for Radiation Protection Purposes at Relativistic Heavy Ion Accelerators // Nucl. Instr. Meth. B. 2008. V. 266. P. 4058.
6. Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures. ICRP Publication 116. Ann. ICRP 40(2–5).

Получено 5 января 2020 г.