



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 98-42
ОРИ-ОЛУ-ОП

В.Е. Бородин, В.Н. Запольский, В.П. Крючков,
С.Л. Кучинин, В.Н. Лебедев, Б.А. Серебряков

**РАДИАЦИОННАЯ ЗАЩИТА
УСКОРИТЕЛЬНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО
КОМПЛЕКСА У-70**

Протвино 1998

Аннотация

Бородин В.Е. и др. Радиационная защита ускорительно-экспериментального комплекса У-70: Препринт ИФВЭ 98-42. – Протвино, 1998. – 29 с., 5 рис., 5 табл., библиогр.: 32.

В статье обобщен многолетний опыт создания радиационной защиты каналов и экспериментальных установок на ускорительном комплексе У-70. Показаны физические и математические аспекты решения задачи проектирования радиационной защиты, связанной с расчетом пространственных распределений источников излучений и прохождения излучений в веществе. Изложены основные проблемы проектирования радиационной защиты высокоэнергетических протонных ускорителей и каналов частиц. Кратко описаны методы их решения. Представлен краткий анализ источников адронного и мюонного излучения на спроектированных и успешно эксплуатируемых в настоящее время на синхротроне ИФВЭ высокоинтенсивных каналах частиц. Приведено описание радиационной защиты ускорительно-экспериментального комплекса У-70. Проведен анализ данных радиационного контроля на экспериментальном комплексе ИФВЭ за несколько последних лет. Представленные данные свидетельствуют о надежности спроектированной в ИФВЭ радиационной защиты, а также подтверждают корректность разработанных в ИФВЭ методов решения задач радиационной физики.

Abstract

Borodin V.E. et al. Radiation Shielding of Accelerator and Experimental Area of IHEP: IHEP Preprint 98-42. – Protvino, 1998. – p. 29, figs. 5, tables 5, refs.: 32.

A long-term experience to create the radiation shielding of particle channels and experimental installations at the IHEP experimental complex is generalized. Physical and mathematical aspects of radiation shielding designing, connected with calculations of radiation transport through the matter are shown. The main radiation problems of high energy proton accelerators and particle channels are stated. Methods of their decision are briefly described.

A brief analysis of hadron and muon radiation sources with IHEP high intensity particle channels is presented. Accelerator radiation and now successfully operating experimental complex is described. The analysis of radiation control system data at the IHEP experimental complex are the past few years testifier to the reliability of the designed radiation shielding and as confirms validity of the developed calculational apparatus as well.

Введение

Многочисленные фундаментальные исследования на Серпуховском синхротроне ИФВЭ стали возможными благодаря созданию экспериментальной базы, которая развивалась усилиями коллектива ИФВЭ на протяжении всех 30 лет существования ускорителя. Создание экспериментальной базы и дальнейшая ее модернизация были связаны с решением большого количества сложных научных и технических проблем, среди которых особое место занимают радиационно-физические проблемы. Достаточно сказать, что радиационная защита занимает более половины площади экспериментального зала, ее стоимость составляет около 30–40% от полной стоимости экспериментального оборудования. От правильности выбранных научных и технических решений радиационно-физических проблем зависят как сама возможность, так и условия проведения эксперимента. Главные из этих условий следующие:

- уровни фонового излучения в районе детектирующей аппаратуры экспериментальных установок не должны превосходить требуемые по условиям эксперимента;
- экспериментальное и ускорительное оборудование, работающее в условиях высоких радиационных нагрузок, должно быть работоспособно в течение всего запланированного времени эксперимента (или времени работы ускорителя);
- организационные и технические мероприятия должны обеспечивать возможность обслуживания оборудования после его длительного облучения;
- и, наконец, главное — работа ускорителя и экспериментальных установок не должна угрожать здоровью и безопасности персонала ускорителя и населения Протвино.

Изложение опыта создания (расчета, проектирования и конструирования) радиационной защиты ускорительного комплекса ИФВЭ приведено в данной статье.

1. Требования к радиационной защите

Основная функция радиационной защиты — ослаблять мощность дозы и плотность потока излучения, генерируемого под действием пучка ускорителя, до допустимых уровней. На проектной стадии разработки канала частиц или экспериментальной установки определяются размеры, композиционный состав и конфигурация радиационной защиты. Радиационная защита для каждой установки в ИФВЭ проектируется исходя из требований безопасности, регламентируемых национальными нормами (до сегодняшнего дня основным нормативным документом были нормы НРБ-76/87 [1], с 1997 года таким документом является НРБ-96 [2]) и технологическими условиями проведения эксперимента:

1) мощность дозы на поверхности защиты не должна превышать контрольного уровня для персонала категории А — 14 мкЗв/ч (величина, следующая из значения предельно допустимой дозы (ПДД, 50 мЗв/год);

2) мощность дозы в пределах санитарно-защитной зоны не должна превышать контрольного уровня для персонала категории Б — 1,2 мкЗв/ч, получающегося из величины предела дозы (ПД) 5 мЗв/год;

3) плотности потока различных частиц в зоне экспериментальной установки должны быть не больше величины, определяемой требованием эксперимента к технологическому фону на детектирующую аппаратуру.

Условие 1) соответствует облучению лиц категории А, примерно в 14 раз превышающему среднее фоновое за счет всех источников излучения, в том числе космического и излучения естественных радионуклидов, а условие 2) обеспечивает уровни, не превышающие полную дозу фонового облучения населения.

При проектировании радиационной защиты ускорительного комплекса ИФВЭ в соответствии с ОСП72/87 вводится коэффициент запаса по мощности дозы, равный 2, учитывающий неточности в исходных данных, погрешности в константном обеспечении, методическую погрешность в алгоритмах расчета переноса излучения в веществе, неточности в распределении источников излучения и т.д. Проектирование радиационной защиты каждого нового канала ведется с учетом влияния источников излучения, обусловленных работой других каналов и перспективным увеличением интенсивности пучка в данном канале. Кроме защиты от мгновенного излучения, при проектировании предусматриваются меры защиты от активационного излучения и от возможного внутреннего поступления источников излучения в виде активированных аэрозолей и газов.

Проектные расчеты радиационной защиты опираются на значение максимальной суммарной проектной дозы, не превышающей уровней, определенных национальными нормами радиационной безопасности НРБ-76¹.

¹Переход на НРБ-96, устанавливающие значительно более жесткие нормы дозовых величин (например, ПД для категории А по НРБ-96 регламентируется величиной 20 мЗв) представляет собой отдельную техническую проблему, стоящую сегодня перед персоналом ускорителя.

2. Ионизирующие излучения на высокоэнергетических ускорителях протонов

В генерируемых в результате взаимодействия высокоэнергетического протонного пучка с веществом элементов ускорителя адронных и электромагнитных каскадах участвуют практически все известные сегодня типы ионизирующих излучений. Среди них основными, определяющими дозу излучения и радиационные эффекты, являются нейтроны, протоны, π -мезоны, фотоны и мюоны. Их спектры простираются от самых низких энергий (для нейтронов это 10^{-2} эВ, для фотонов — 1 кэВ, для заряженных частиц — 1 МэВ) до энергии ускоренных протонов (70 ГэВ).

При проектировании радиационной защиты на высокоэнергетических ускорителях рассматриваются три типа мгновенного излучения: адронное, мюонное и фотонное. Среди них главным, определяющим основные объемы радиационной защиты, является адронное.

Благодаря множественному рождению в адронных каскадах и высокому значению коэффициента конверсии “поток-доза” высокоэнергетических адронов (нейтронов, протонов, π - и K -мезонов с энергией $E > 20$ МэВ) их вклад в полную дозу за защитой ускорителя составляет для условий ИФВЭ от 30 до 70% в зависимости от геометрии. Основным физическим процессом, приводящим к ослаблению высокоэнергетического адронного излучения, является неупругое рассеяние. Именно поэтому для адронной защиты выгодно выбирать (с учетом стоимостных и конструктивных параметров) материалы с большим значением сечения неупругого взаимодействия. В качестве таких защитных материалов на синхротроне ИФВЭ обычно используются сталь и бетон.

Доля в полной дозе за бетонной защитой низкоэнергетического адронного компонента излучения, т.е. нейтронов с $E < 20$ МэВ (далее в тексте просто нейтронное излучение), приблизительно равна доле высокоэнергетических адронов. Хотя в определенных типах геометрий, например за неэкранированной стальной защитой, или в полях рассеянного излучения, вклад нейтронов в дозу может быть доминирующим (близким к 100%). Ослабление нейтронов с $E < 20$ МэВ идет в основном по каналу упругого рассеяния. Поэтому наиболее эффективным веществом радиационной защиты от нейтронного излучения являются водородсодержащие материалы (бетон, полиэтилен, вода). Вследствие генерации на высокоэнергетических протонных ускорителях (подобных синхротрону ИФВЭ) адронного излучения широкого спектра, включающего и нейтроны с $E < 10$ МэВ, оптимальной защитной композицией на таких установках является гетерогенная защита сталь+бетон.

В случае правильно рассчитанной и сконструированной радиационной защиты поля адронного излучения локализуются в районах формирования их источников. Исключением являются поля рассеянного излучения, которые могут определять дозу на площади в несколько квадратных километров. Источниками рассеянного излучения на высокоэнергетических ускорителях обычно бывают мишени на низкоинтенсивных адронных пучках либо участки ускорителя или каналов частиц со слабой радиационной защитой.

Наиболее проникающий компонент излучения, характерный только для высокоэнергетических протонных ускорителей, — мюоны. Основными источниками мюонного компонента излучения на ускорителях являются распады мезонов ($\pi(K) \rightarrow \mu + \nu_\mu$), рождающихся в адронных каскадах, инициируемых ускоренными протонами. Высокие проникающие свойства мюонов обусловлены их малым по сравнению с другими заряженными частицами торможением в процессе ионизации и возбуждения атомов (мюоны обладают минимальной ионизирующей способностью), которое и является главным механизмом потерь энергии мюонами рассматриваемых энергий ($E_\mu < 70$ ГэВ). Остальные процессы — прямое образование e^+e^- -пар, тормозное излучение и ядерное взаимодействие через виртуальный фотон — не играют сколь-нибудь заметной роли в переносе мюонов в веществе ввиду малости сечений этих процессов в рассматриваемой области энергий.

Сильная анизотропия углового распределения мюонов, рождающихся в распадах пионов (каонов) (угол вылета мюона в лабораторной системе ограничен величиной несколько миллирадиан), и очень слабое размытие их углового распределения в многократном кулоновском рассеянии приводят к эффекту образования мюонных пучков специфической формы (так называемых мюонных “факелов”). Такие мюонные “факелы” начинаются в точке высадки пучка и имеют размеры (т.е. пространственная область, в которой мощность дозы от мюонов превышает предельно допустимое значение): продольные — десятки метров, поперечные — 1–2 метра. Направления мюонных “факелов” определяются направлениями формирующих их первичных пучков и сильно зависят от характеристик магнитных и электростатических полей магнитооптических элементов, которые они пересекают.

С высокой проникающей способностью мюонов связаны большие значения их пробегов в веществе (максимальное значение пробега мюона в стальной защите при энергии Серпуховского синхротрона составляет почти 50 метров). Это представляет собой одну из серьезных проблем, требующих решения при проектировании радиационной защиты ускорителя и каналов частиц. Наиболее оптимальным способом решения проблемы гашения мюонных “факелов”, используемым в ИФВЭ, является такой взаимный выбор координат магнитооптических и защитных элементов канала, чтобы направления осей мюонных “факелов” проходили в боковой адронной защите.

Вклад в полную дозу мгновенного фотонного излучения (не путать с остаточным от наведенной радиоактивности) в типичных геометриях протонных ускорителей со средней интенсивностью $I \sim 10^{12}$ ч/с и с толщинами стальной защиты менее $10\lambda_{in}$, как правило, пренебрежим (менее 1%). Однако с ростом мощности источника и, соответственно, толщины стальной защиты растет и вклад в дозу фотонного излучения. Уже за гетерогенными защитами мишенных станций высокоинтенсивных каналов Серпуховского синхротрона, толщина которых 200 см стали и 100 см бетона, доля фотонного излучения составляет несколько процентов.

По нашим оценкам на проектируемом источнике нейтронов в КЕК (Япония) со средней интенсивностью пучка протонов на мишени 10^{15} протонов в секунду,

радиационная защита которого в соответствии с проектом [5],[6] составляет 400 см стали + 100 см бетона, мгновенное фотонное излучение будет практически полностью определять радиационную обстановку за защитой. В случае реализации такой защиты (без оптимизации, предложенной в работе [7]) мощность дозы фотонного излучения на ее поверхности составит величину порядка 0,3 бэр/час, что в десятки раз больше допустимых значений, хотя при этом мощность дозы адронного излучения будет ослаблена до допустимых уровней.

3. Физические и математические аспекты проблемы расчета распространения излучения в веществе радиационной защиты

Основные проблемы проектирования радиационной защиты на высокоэнергетических ускорителях протонов связаны, в первую очередь, со сложностью расчета образования и распространения излучения, генерируемого высокоэнергетическим пучком. По сложности компонентного и энергетического составов поля ионизирующего излучения сегодня не существует рукотворного источника, приближающегося к высокоэнергетическим протонным ускорителям.

Закономерности рождения излучений, их распространения в веществе оборудования и защиты ускорителя, а также в атмосфере определяются параметрами (сечениями) сильного и электромагнитного взаимодействий частиц со средой. Поэтому одной из ключевых проблем радиационной физики высокоэнергетических ускорителей является создание систем (баз) данных, содержащих исчерпывающую информацию по сечениям для вышеуказанных частиц, диапазонов энергий и всех типов взаимодействий, оказывающих влияние на процессы диссипации энергии излучения и его транспорта.

Не вдаваясь в анализ проблемы расчета сечений и подготовки констант для расчета адронных каскадов (такой обзор можно найти в многочисленных трудах и монографиях, например, [3],[4]), укажем, что в ИФВЭ указанная выше задача решена путем разработки специализированного программно-библиотечного комплекса. Этот комплекс включает в себя:

- алгоритмы и программы аппроксимации дифференциальных сечений адрон-ядерных взаимодействий в диапазоне энергий 20 МэВ – 10 ТэВ [8];
- программу расчета многогрупповых сечений для нейтронов, протонов и пионов указанного диапазона энергий [9], [10], [11];
- программу подготовки объединенного файла констант, включающего в себя файл для высокоэнергетических адронов и файлы для низкоэнергетических нейтронов ($E < 20$ МэВ) и фотонов, подготовленные с помощью специализированных программ и библиотек типа USCONS [12] и ENDF/B-6 [13].

Разработанный программный комплекс реализован в виде библиотек адронных данных БНД-400 [9], САДКО-1 [10], САДКО-2 [11]. Современная версия библиотеки

САДКО-2 содержит данные для нейтронов в диапазоне энергий 10^{-2} эВ — 10 ТэВ, протонов и пионов (20 МэВ–10 ТэВ), фотонов (0,1–20 МэВ).

Математический аспект проблемы расчета и проектирования радиационной защиты на высокоэнергетических протонных ускорителях состоит в разработке метода (или адаптации существующих методов) для решения задачи переноса излучений, генерируемых под действием протонного пучка. Основные математические особенности, усложняющие решение указанной задачи и отличающие ее от подобных задач на других ядерно-физических установках (например, на ядерных реакторах), следующие:

- многообразие типов частиц (нейтральных и заряженных), определяющих дозу излучения, для которых необходимо проводить расчеты переноса;
- сильная анизотропия адрон-ядерного рассеяния;
- большие толщины (более 1000 г/см^2) радиационной защиты (проблема “глубокого проникновения”).

Учитывая сложную геометрию каналов частиц (взаимное расположение многочисленных магнитооптических элементов, коллиматоров, поглотителей, защиты), на первый взгляд, представляется заманчивым использование богатых геометрических возможностей метода Монте-Карло и реализованных на его основе программ (например, FLUKA [14], GIANT [15], HETC [16], MARS [17], MOSKIT [18]) для расчета полей излучения и размеров радиационной защиты каналов. Однако простой анализ показывает иллюзорность такого подхода — получить методом Монте-Карло результат с удовлетворительной статистической погрешностью по дозовым функциям для защиты каналов частиц в геометрии “мишень-защита” с типичными для подобных геометрий коэффициентами ослабления порядка 10^{-10} – 10^{-12} невозможно в силу известных ограничений самого метода Монте-Карло (см., например, работу [19]). Отсюда следует необходимость очень критического отношения к иногда публикуемым результатам, полученным методом Монте-Карло для условий, подобных вышеуказанным (т.е. для геометрий калориметров или для радиационных защит), и приводимым без анализа погрешностей. (Сказанное ни в малейшей мере не умаляет очевидных достоинств метода Монте-Карло и, соответственно, цитируемых выше кодов, стоящих сегодня абсолютно вне конкуренции в расчетах транспорта излучения сложного компонентного состава в 3-мерной геометрии с коэффициентом ослабления не ниже 10^{-5} – 10^{-6}).

Для решения задач расчета транспорта излучений, генерируемых ускорителем, в радиационной защите и соответственно задач проектирования радиационных защит в ИФВЭ разработан и используется комплексный подход:

- характеристики (пространственные, энергетические и угловые распределения) источников излучения в сложной геометрии канала частиц определяются путем анализа распределений потерь пучка и расчетов методом Монте-Карло (по одной из вышеупомянутых программ);

– расчеты транспорта излучения в радиационной защите осуществляются с помощью специального программно-математического аппарата, основанного на численном решении одномерного кинетического уравнения для всех частиц, участ-

вующих в адронном и электромагнитном каскадах, методом дискретных ординат (серия высокоэнергетических версий программ ROZ), разработанного в ИФВЭ совместно с ИПМ.

Алгоритмы, использованные в указанных программах, реализуют аппроксимацию пространственного оператора схемой 2-го порядка точности, а энергетического оператора схемой — 1-го (ROZ-400 [20]) и 2-го порядка точности (ROZ6H [21]). Угловая переменная в программе ROZ6H в зависимости от требуемой точности аппроксимируется тремя различными методами [22]: разложением по полиномам Лежандра; представлением потоков и индикатрисы в точках угла рассеяния; в приближении Фоккера-Планка.

4. Источники излучений на высокоэнергетических ускорителях протонов

Пространственные распределения источников излучений на ускорителе полностью обусловлены и определяются соответствующими распределениями потерь пучка частиц при его ускорении и транспортировке.

В соответствии со значением градиента потерь пучка и, следуя работе [23], будем далее их классифицировать на

- локальные (к ним относятся потери на мишенях, системах диагностики пучка, коллиматорах и пр.);
- распределенные (потери с небольшими значениями градиента, обусловленные взаимодействием частиц пучка с ядрами остаточного газа, а также взаимодействием частиц гало пучка со стенками вакуумной камеры и магнитных элементов).

Характеристики как локальных, так и распределенных потерь определяются динамикой пучка, магнитооптической схемой канала, параметрами и расположением экспериментального оборудования и т.д. При всем многообразии каналов вторичных частиц, определяемых физической идеей и способом технической реализации конкретного эксперимента, принцип построения практически всех каналов одинаков: пучок частиц фокусируется на мишень и затем с помощью экспериментальной аппаратуры изучаются характеристики рожденных на мишени частиц. Отсюда следует и принципиальная схожесть характера распределений основных источников вторичного излучения на всех каналах транспортировки выведенных пучков:

- распределенные источники излучения на участках транспортировки первичного пучка и формирования вторичных пучков;
- основные локальные источники излучения — мишени канала и экспериментальной установки;
- локальные источники, обусловленные гашением первичного и вторичных пучков, а также системы коллимации и обрезания гало пучка.

Одновременно с указанными основными источниками излучения на каждом канале в результате взаимодействия протонов с элементами канала (системами диагностики, вакуумными фланцами и т.д.) формируется множество менее интенсивных источников, пространственное распределение и мощность которых обусловлены

координатами расположения и параметрами элементов данного канала. При определенных условиях и режимах работы канала эти источники также способны играть важную роль в формировании поля излучения на ускорителе.

Каждому такому источнику на любом канале соответствуют такие основные (типовые) элементы радиационной защиты, как:

- продольная радиационная защита на участке транспортировки высокоинтенсивного пучка и на участке формирования вторичных пучков;
- радиационная защита мишенной станции;
- мюонная защита;
- пучковые поглотители (beam-stoper).

5. Принципы и последовательность проектирования радиационной защиты

Разработка радиационной защиты опирается на анализ пространственного распределения потерь частиц. Выделяются области локальных и распределенных потерь, основные из которых указаны выше, а также места размещения поглотителей пучка. Рассчитываются размеры и расположение адронных защит от локальных и распределенных потерь. Расчет характеристик источников вторичного излучения, генерируемого пучком в местах локальных потерь, проводится по монтекарловским программам (основная программа, используемая в ИФВЭ для этих целей, MOSKIT [18]).

Характеристики распределенных потерь в регулярной части тракта транспортировки пучка, обусловленные в основном магнитооптической схемой, рассчитываются по программам расчета транспорта частиц в магнитной оптике (например, TURTLE [24] и HALO [25]).

Многолетние расчетные и экспериментальные исследования потерь пучка частиц на трактах транспортировки разных каналов показали, что их средние значения составляют приблизительно 1–3% от полной интенсивности на 100 метров канала. Именно эти значения потерь используются как проектные при расчете размеров защиты новых каналов. Однако специальные меры минимизации потерь, такие как дополнительная коллимация и фокусировка пучка, увеличение диаметра вакуумной камеры, улучшение вакуума и пр., во многих случаях позволяют снизить значение потерь до величин порядка 0,1% и меньше на 100 м тракта.

Отдельно определяются все возможные места генерации мюонов. Хотя основными источниками мюонов являются сформированные после мишени пионные пучки, заметный вклад в поле мюонного излучения дают также и другие источники, в том числе все локальные потери первичного пучка. С учетом влияния магнитной оптики рассчитываются направления и интенсивности всех мюонных “факелов”, образующихся в канале. Расчет толщин и конфигураций всех поглотителей мюонов осуществляется с учетом всех возможных источников и планируемых режимов работы каналов.

Как правило, продольные размеры стальных мюонных поглотителей каналов высокоэнергетических частиц составляют величины порядка нескольких десятков метров, в то время как их характерные поперечные размеры, определяемые шириной мюонных “факелов”, как указывалось выше, порядка 1–2 метров. Это обстоятельство позволяет находить оптимальные компоновки радиационных защит канала таким образом, чтобы мюонные поглотители играли одновременно роль и боковых адронных защит.

Окончательная конфигурация радиационной защиты каждого канала определяется с учетом радиационных защит уже существующих соседних каналов и экспериментальных установок.

6. Конструирование радиационной защиты

Особенность разработки радиационной защиты каналов и ускорителя в экспериментальном зале У-70 состоит в необходимости решения множества задач, обусловленных как недоработками и просчетами, допущенными на стадии проектирования ускорителя У-70, так и развитием за время существования ИФВЭ его экспериментальной базы. Основные просчеты исходного проекта радиационной защиты У-70 — это недооценка уровней потерь пучка и неучет перспективного увеличения интенсивности пучка до $3 \cdot 10^{13}$ протонов в цикл (п/ц). Указанные просчеты вылились в ошибочные технические решения, принятые при проектировании зала ускорителя:

- выбранное значение проектной нагрузки, исходя из которой был рассчитан и построен фундамент экспериментального зала ускорителя (30 т/м^2), как минимум в 1,5 раза меньше необходимой;

- высота до крюка козлового крана, ограничивающая габариты радиационной защиты и составляющая в экспериментальном зале 9, 8,5 м в начальной части галереи и 7,8 м в основной галерее, приблизительно на метр ниже необходимой.

К этому необходимо добавить неучет в проекте эффекта “sky-shine” (эффекта рассеяния нейтронов, испущенных через слабую верхнюю защиту, на ядрах атмосферного воздуха), определяющего радиационную обстановку на достаточно большом пространстве вокруг участка ускорителя (канала) с недостаточной защитой.

Все это в настоящее время привело к тому, что создание радиационной защиты новых каналов и экспериментальных установок, а также модернизация защиты ускорителя с целью приведения ее в соответствие с новыми нормами (НРБ-96) и постоянным увеличением интенсивности пучка, превратилось в сложную оптимизационную задачу, решение которой зависит от многих взаимно противоречащих условий. Например, проектирование верхней радиационной защиты кольцевого зала ускорителя, обеспечивающей ослабление мощности дозы до нужных пределов, входит в противоречие с требованиями минимальных габаритов защиты, которые ограничены высотой до крана. Точно так же минимизация толщины защиты путем

использования материалов с более высокой ослабляющей способностью ограничена величиной предельных статических нагрузок на фундамент зала и приводит к ее недопустимому удорожанию. С другой стороны, уменьшение массы защитных сооружений путем уменьшения внутриканальных объемов приводит к сокращению экспериментальных площадей и зон обслуживания оборудования и пр.

На сегодня возможности экспериментального зала и галереи как по статическим нагрузкам на фундамент, так и по габаритам здания практически исчерпаны. Это привело к необходимости поиска новых научных и технических решений при создании высокоинтенсивных каналов нового поколения. К таким решениям относятся: минимизация потерь пучка по тракту; разработка компактных мишенных боксов и локальных защит из материалов с хорошей ослабляющей способностью; уменьшение внутриканальных объемов; правильный выбор композиции защитных материалов.

Конструкции радиационной защиты в экспериментальных помещениях ИФВЭ выполняются из набора стальных слябов и бетонных блоков стандартного сортамента, что позволяет оперативно производить демонтаж старых и монтаж новых каналов.

Проводка необходимых для каждого канала коммуникаций (систем водоохлаждения, вентиляции, пожаротушения, электроснабжения кабельных вводов и пр.) через радиационную защиту существенно уменьшает ее ослабляющие свойства. Поэтому при проектировании трасс указанных коммуникаций используются технические решения, выработанные как в ИФВЭ, так и на других ускорителях в мире, направленные на восстановление ослабляющих параметров радиационной защиты. Например, траектории трасс выполняются в виде многосекционных лабиринтов (ослабление нейтронного излучения в лабиринтах подробно изучены в работе [26]), пустоты заполняются защитным материалом, кабельные коммуникации прокладываются под защитой и пр. После эскизной проработки радиационной защиты проводится радиационно-физический расчет ее ослабляющих свойств.

7. Радиационная защита ускорителя и каналов частиц

Ускорительно-экспериментальный комплекс У-70 включает в себя синхротрон на энергию 70 ГэВ, экспериментальный зал с системой каналов (рис. 1, 2) и галерею с системой каналов выведенных частиц (рис.3, 4). Радиационная защита основной части кольцевого туннеля ускорителя однородна и выполнена в виде обваловки из грунта толщиной 950 г/см². В пределах экспериментального зала радиационная защита ускорителя выполнена из бетонных блоков и составляет в настоящее время в среднем 780 г/см² (до реконструкции, т.е. по исходному проекту, толщина защиты была 500 г/см²).

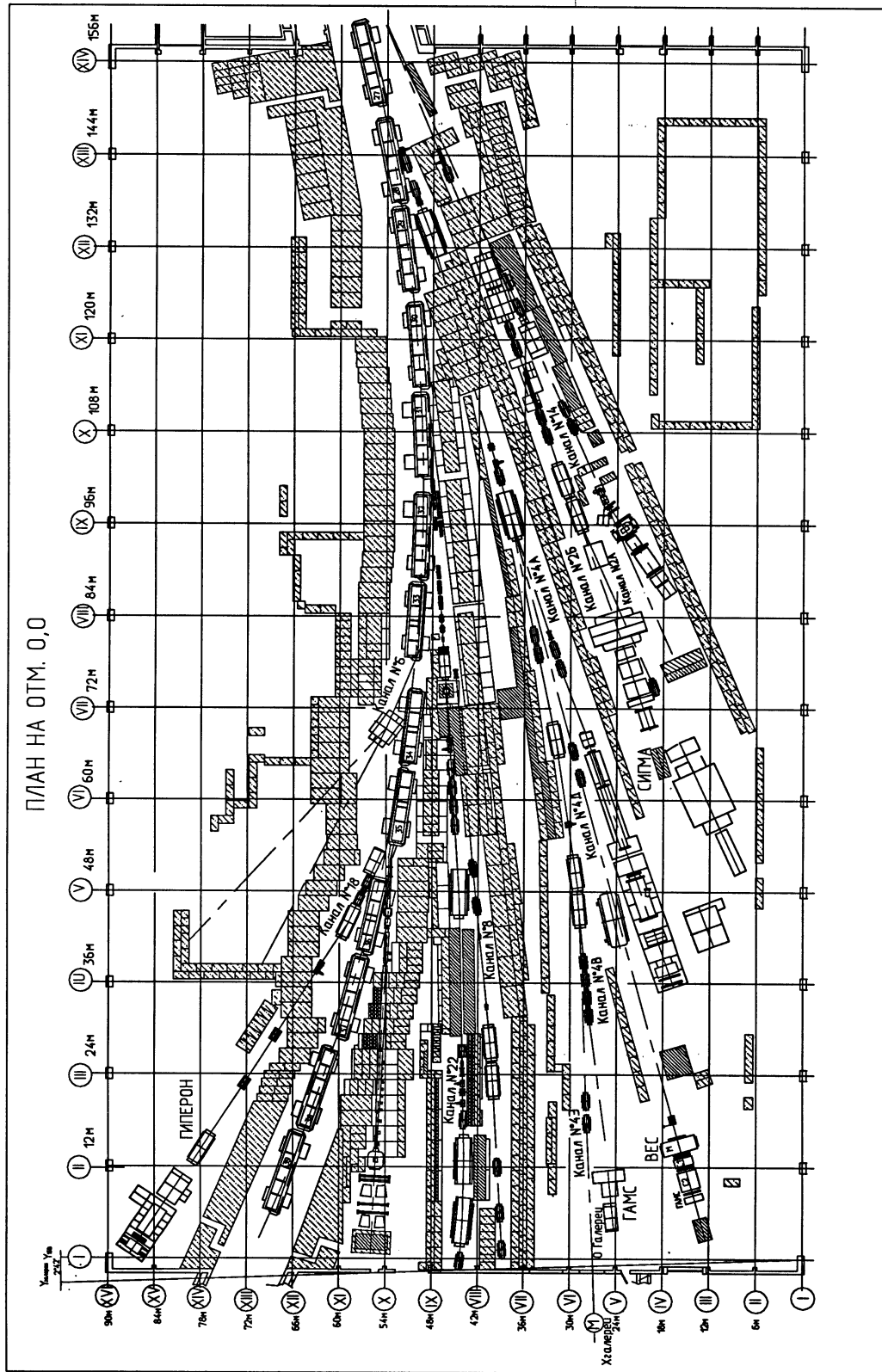


Рис. 1. Схема расположения радиационной защиты в экспериментальном зале 1БВ. (Горизонтальное сечение ускорителя и каналов на отметке 0,0.)

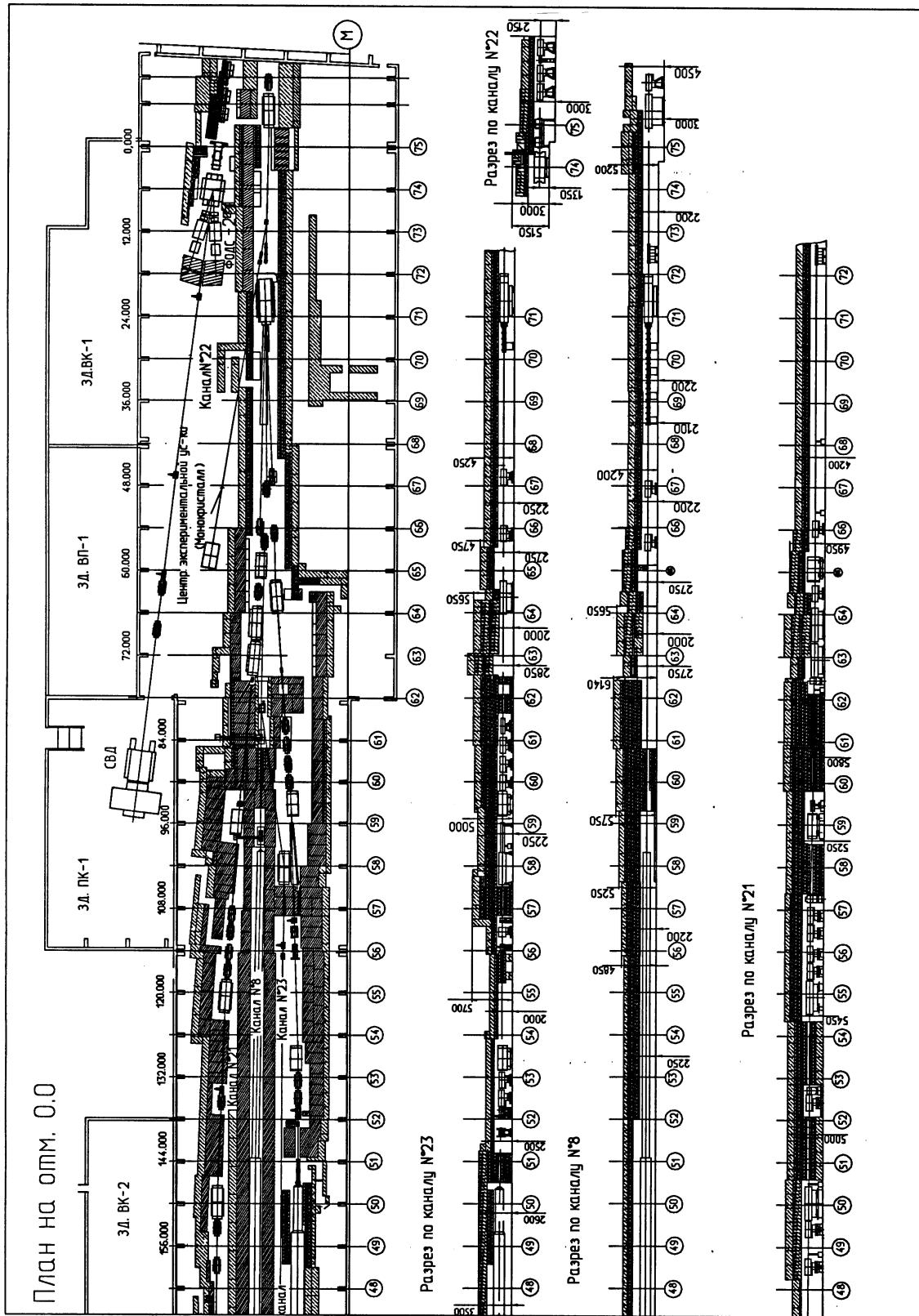


Рис. 3. Схема расположения радиационной защиты каналов галерейного комплекса в начальной части галереи. (Горизонтальное (вверху) и вертикальные (внизу) сечения каналов 23, 8, 21.)

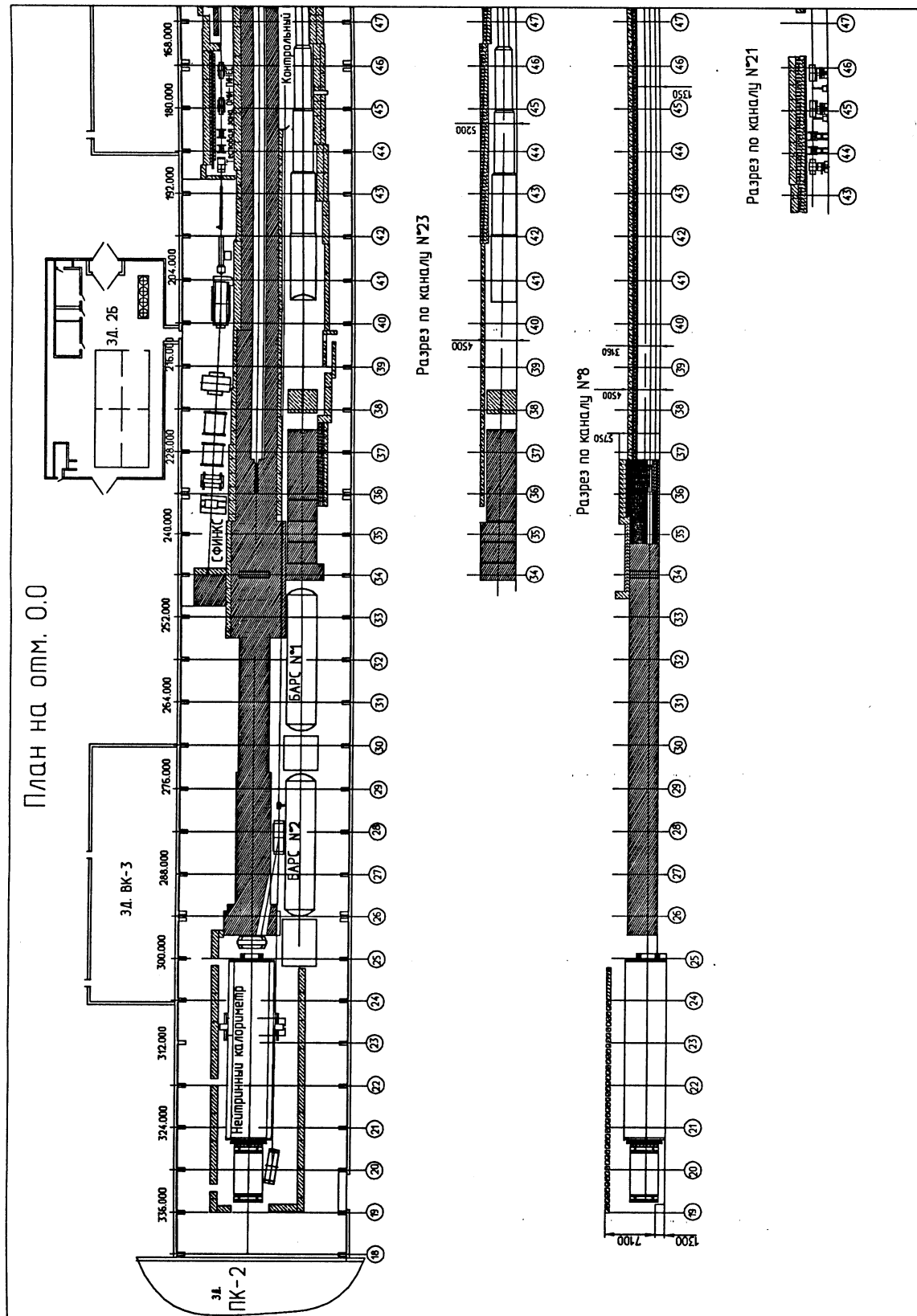


Рис. 4. Схема расположения радиационной защиты каналов галерейного комплекса в конечной части галереи. (Горизонтальное (вверху) и вертикальные (внизу) сечения каналов 23, 8, 21.)

7.1. Каналы в экспериментальном зале

Основные источники излучения сосредоточены в пределах экспериментального зала и галереи. Большую часть площади зала занимают: сегмент ускорителя; каналы пучков частиц, работающих от внутренних мишеней, расположенных в магнитных блоках ускорителя; и окружающая их радиационная защита. Сами по себе пучки вторичных частиц, генерируемые на внутренних мишенях, не представляют значительной радиационной опасности из-за их сравнительно невысокой интенсивности. (Средняя интенсивность этих пучков не превосходит величины 10^6 ч/ц). Этим обстоятельством обусловлено отсутствие на большей части указанных каналов верхней радиационной защиты. Все радиационные проблемы сосредоточены в головной части — в местах генерации вторичных пучков. Основными источниками излучений, определяющими радиационную обстановку в экспериментальном зале, являются внутренние мишени. Внутренние мишени расположены: в 24-м магнитном блоке ускорителя, (мишени каналов № 14, 2А, 2Б); в 27-м блоке (мишени каналов № 4А, 4Б, 4В, 4Э); в 33-м блоке (мишень 6-го канала); 35-м блоке (мишени экспериментальной установки “Позитроний” и канала № 18).

Радиационной защитой вторичного адронного излучения, генерируемого на указанных мишенях, служит в основном сам магнитный блок, в котором размещаются мишень, а также защита кольцевого зала ускорителя. Мюонные “факелы”, образующиеся от работы указанных мишеней, гасятся в боковой защите ускорителя, в защите на участке генерации пучков и боковых защитах каналов вторичных частиц, ориентированных вдоль осей мюонных “факелов”. “Пучковые” мюоны, т.е. мюоны, образованные в распадах вторичных частиц пучка, гасятся в пучковых поглотителях, установленных на каждом канале, и в земляной обваловке, окружающей экспериментальный зал.

Следует заметить, что большинство из указанных каналов являются каналами первого поколения и созданы более 20 лет назад. Проектирование радиационной защиты участка генерации пучков, а также защиты внутренних мишеней проводилось в условиях отсутствия опыта и знаний, накопленных к настоящему времени. Поэтому, несмотря на проводившиеся в последние годы частичные модернизации, радиационные условия на этих каналах сегодня хуже, чем на каналах галерейного комплекса и близки к предельным. Радиационные условия в районе этих каналов не удовлетворяют в полной мере требования НРБ-96 из-за отсутствия на них верхних защитных перекрытий и недостаточной защиты от мюонов по отдельным геодезическим направлениям.

7.2. Каналы галерейного комплекса

Каналы галерейного комплекса, благодаря их высокой интенсивности и универсальности, являются наиболее перспективным инструментом в руках экспериментаторов. Однако именно с их разработкой и созданием связаны основные радиационные проблемы. За годы существования ускорителя было рассмотрено и проработано около двух десятков каналов на выведенных пучках. Из них реализовано и нахо-

дятся сегодня в эксплуатации четыре: нейтринный канал № 8, канал меченых нейтрино № 23, универсальный канал № 21, универсальный канал многоцелевого назначения № 22. Ниже кратко рассмотрим трассу, радиационные источники и радиационную защиту каждого канала.

Нейтринный канал № 8

Нейтринный канал (канал № 8) предназначен для изучения взаимодействий нейтрино ([28]). Он размещен в западной части экспериментального зала и в пристроенной к нему галерее. Полная длина нейтринного канала составляет 440 метров. Протонный пучок с энергией 70 ГэВ и интенсивностью от 10^{12} до $3 \cdot 10^{13}$ п/ц посредством системы быстрого вывода в районе 34-го магнитного блока выводится из ускорителя, транспортируется через весь экспериментальный зал и фокусируется на мишень, расположенную в галерее. Вторичное излучение, генерируемое в результате взаимодействий протонов пучка с вакуумной камерой, подавляется боковой и верхней защитами. Профиль верхней защиты определяется пространственным распределением потерь пучка по тракту транспортировки. Боковая защита однородна и выполнена с учетом расположения оборудования и радиационной защиты других каналов.

Наиболее сложная в радиационном отношении часть канала — мишенная станция. Она представляет собой стальной защитный массив с полостью, в которой размещаются конструкции мишенного узла. Толщина стальной защиты составляет от 310 см в максимуме пространственного распределения дозы, до 230 см в месте ее перехода в коллиматор. Снаружи стальная защита закрыта бетоном толщиной 100 см. Внутренние стенки полости облицованы экраном из слабо активируемого материала толщиной 50 см. Наличие указанного экрана позволяет проводить периодическое обслуживание оборудования мишенного узла между сеансами работы ускорителя после непродолжительной (около недели) выдержки.

Пучок вторичных частиц (пионов и каонов) определенного знака отбирается с мишени под нулевым углом, коллимируется и фокусируется в район распадной базы. При этом частицы другого знака, дефокусируясь, высаживаются на стенках распадной трубы на всей ее длине, образуя распределенный источник излучения высокой интенсивности. Радиационная защита распадной части канала, состоящая из 200 см стали и 100 см бетона, ослабляет мощность дозы до предельно допустимого уровня.

Непрореагировавший с мишенью протонный пучок, а также нераспавшиеся мезоны вторичного пучка высаживаются на торец стального мюонного фильтра, инициируя адронный каскад. Начальная часть мюонного фильтра на протяжении 12 м заэкранирована бетоном толщиной 100 см, что вызвано не только необходимостью ослабления мощности дозы частиц адронного каскада, но и подавлением нейтронного излучения, образующегося в результате реакции мю-минус захвата ядрами железа. (Указанный механизм генерации нейтронного излучения на мюонном фильтре был предсказан и исследован в работе [27]).

Мюоны от распада π - и K -мезонов полностью поглощаются в стальном мюонном фильтре длиной 54 метра.

Канал “меченых” нейтрино № 23

Канал “меченых” нейтрино (канал № 23) предназначен для прецизионных исследований мюонных и электронных нейтрино ([29]). Медленно выведенный из ускорителя протонный пучок с интенсивностью до $3 \cdot 10^{13}$ п/ц транспортируется по трассе нейтринного канала до поворотного магнита, после которого переводится на собственную трассу и фокусируется на внешнюю мишень. Вторичные частицы с импульсом до 35 ГэВ/с формируются в слабосходящийся пучок. На участке транспортировки протонного пучка радиационная защита нейтринного канала обеспечивает ослабление излучения, генерированного потерями пучка, до предельно допустимых уровней.

Радиационная защита мишени канала предназначена для ослабления излучения, генерируемого на ней, до уровней, приемлемых как с точки зрения радиационных нагрузок на оборудование канала, так и его активации. Значение поглощенной дозы внутри канала за защитой мишени при максимальной проектной интенсивности составляет порядка 1 рад/час. При этом верхняя защита мишени канала меченых нейтрино, конструктивно выполненная как единое целое с защитой канала, ослабляет мощность дозы до величины 1,4 мбэр/час.

С помощью анализирующего магнита, расположенного за мишенной станцией, отсортировываются вторичные частицы заданного заряда и импульса. Вторичные частицы другого заряда и других импульсов, как и непроизводивший с мишенью протонный пучок, гасятся в пучковом поглотителе, расположенном в районе 57-й оси галереи. Отсортированные вторичные частицы формируются последующей оптикой в слабосходящийся пучок. Высокие уровни мощности дозы адронного излучения, связанные с большими потерями пучка (величины ожидаемых на участке формирования пучка потерь составляют до 10^{11} ч/(с·м)), ослабляются мощной боковой стальной защитой (в максимуме ее толщина 300+100 см бетона). Эта же защита предназначена и для гашения отклоненных анализирующим магнитом мюонов, образованных из распада пионов, генерируемых протонным пучком на мишени. Роль мюонного поглотителя выполняет также боковая защита расположенного рядом нейтринного канала.

Раскрытия двух дистанционно управляемых коллиматоров (вертикального и горизонтального), расположенных в районе 52-й оси, и апертура специального коллиматора в районе 51-й оси выбраны из условия минимизации потерь вторичного пучка в распадной трубе. Ограничения на габариты верхней защиты конечного участка распадного туннеля определяют максимально допустимые величины потерь, которые составляют $2 \cdot 10^5$ ч/(с·м).

Пучок вторичных частиц а также все мюоны, образованные на распадном промежутке, поглощаются в 24-метровом мюонном фильтре, который с целью уменьшения выхода из стальной защиты альбедных нейтронов облицован с лицевой стороны метровым слоем бетона.

Универсальный канал № 21

Этот канал [30], как и канал “меченых” нейтрино, имеет общую часть с нейтринным каналом, по трассе которого осуществляется как быстрый, так и медленный вывод протонного пучка. Медленно выведенный протонный пучок отклоняется на трассу канала № 21 импульсными магнитами, что обеспечивает возможность работы обоих каналов (одного на быстром, а другого на медленном выводе) в каждом цикле ускорения. На канале размещена экспериментальная установка СФИНКС, предназначенная для проведения широкой программы исследований в области адронной физики. В соответствии с различными возможными направлениями экспериментальных исследований на установке СФИНКС канал может функционировать в следующих режимах:

- режим с медленновыведенным протонным пучком предельной интенсивностью до 10^{11} ч/ц;

- режим с медленновыведенным или дифракционно-выведенным протонным пучком интенсивностью 10^6 ч/ц;

- режим вторичных пучков частиц обоих знаков заряда в широком диапазоне импульсов и интенсивностей ($P=7-60$ ГэВ/с — для отрицательно заряженных частиц и $P=7-35$ ГэВ/с — для положительно заряженных частиц, $I=10^6-10^8$ ч/ц).

Наиболее заметное влияние на радиационную обстановку в экспериментальном зале и галерее 21-й канал оказывает при работе в режиме генерации вторичных пучков. В этом режиме пучок протонов интенсивностью до $5 \cdot 10^{12}$ ч/ц фокусируется на внешнюю мишень, расположенную на трассе канала. Мишенная станция выполнена в виде небольшого помещения, в котором расположен мишенный узел и отклоняющий магнит. Толщина радиационной стальной защиты, окружающей мишенную станцию, 250 см. Магнит отклоняет частицы заданного диапазона импульсов, направляя их в отверстие поглотителя, расположенного за магнитом. При этом непроизводивавшие с мишенью протоны первичного пучка полностью поглощаются поглотителем.

Участок формирования вторичного пучка закрыт боковой гетерогенной сталь+бетон защитой. Стальная боковая защита в данном месте, как и расположенные по трассе два стальных поглотителя, предназначены для подавления мюонных “факелов” от мишени и поглотителя протонного пучка. Пучковые мюоны поглощаются в поглотителе, установленном за экспериментальной установкой. Верхняя защита выполнена из бетона, толщиной 220 см.

Универсальный канал многоцелевого назначения № 22

На канале [31] размещены две экспериментальные установки: ФОДС-2, предназначенная для изучения глубоконеупругих процессов, и спектрометр с быстроциклирующей пузырьковой камерой в качестве вершинного детектора СВД. Канал имеет многоцелевое назначение и в зависимости от возможных направлений физических исследований позволяет формировать:

- пучки медленно или дифракционно-выведенных из ускорителя протонов интенсивностью до 10^{10} ч/ц;
- пучки вторичных частиц обоих знаков заряда в широком диапазоне энергий (от 7 до 55–60 ГэВ) и интенсивностей (до $6 \cdot 10^8$ ч/ц для отрицательно и до $2 \cdot 10^{10}$ ч/ц для положительно заряженных частиц);
- пучки электронов и позитронов в интервале энергий 7–40 ГэВ интенсивностью до 10^7 ч/ц;
- пучки поляризованных протонов интенсивностью до $3,5 \cdot 10^7$ ч/ц;
- пучки протонов и вторичных частиц обоих знаков заряда, особым образом сформированные для работы с быстроциклирующей пузырьковой камерой установки СВД интенсивностью $\sim 10^6$ ч/ц.

Наиболее напряженным в смысле радиационной обстановки является режим получения и транспортировки на установку ФОДС-2 пучков вторичных частиц. В этом режиме медленно выведенный из ускорителя пучок протонов интенсивностью до $1 \cdot 10^{13}$ п/ц фокусируется на внешнюю мишень, расположенную в районе VII оси экспериментального зала (рис.1). Для получения в канале пучков вторичных частиц максимальной интенсивности отбор частиц с мишени производится под нулевым углом. При этом непроизводивший с мишенью высокоинтенсивный протонный пучок в зависимости от режима работы канала либо отклоняется расположенным непосредственно за мишенным боксом магнитом и поглощается в первой адронной пробке (режим получения электронного пучка или пучка поляризованных протонов), либо транспортируется по каналу и поглощается во второй адронной пробке (режим получения других вторичных частиц).

Наиболее высокими уровнями радиационных нагрузок и наведенной активности характеризуются зона мишенной станции, районы поглощения непроизводившего с мишенью протонного пучка и участок канала, расположенный между адронными пробками.

Радиационная защита мишени состоит из двух независимых частей — локальной технологической и основной. Локальная защита (мишенный бокс, в котором размещена мишень) [31] играет роль технологической защиты и представляет собой стальной короб с толщиной стенок 50 см. Основная наведенная активность локализована в мишенном боксе. Мощность дозы от наведенной активности на его внешней поверхности после длительного облучения не превосходит 100 мР/час. Механизмы и приводы перемещения мишени находятся вне бокса, что уменьшает радиационные нагрузки на них и повышает их надежность. Основная верхняя радиационная защита мишени является частью общей защиты канала и представляет

собой гетерогенную сборку из стали (100 см) и бетона толщиной 320 см. Стальная верхняя защита сопрягается со стальной адронной пробкой, расположенной за мишенным боксом. Эта пробка не только поглощает непрореагировавший с мишенью протонный пучок в некоторых режимах работы канала, но является также поглотителем адронного излучения, генерируемого в мишени, и частью поглотителя мюонов.

Высокие радиационные нагрузки и большая наведенная активность оборудования канала, расположенного между адронными пробками, обуславливается не только возможными потерями части протонного пучка при его транспортировке до поглотителя, но в основном фоном генерированных на мишени вторичных пучков. Ослабление адронного излучения на этом участке осуществляется боковой защитой 8-го канала (с южной стороны) и защитой ускорителя (с северной стороны). Верхняя защита на данном участке, конфигурация и компоновка которой полностью определяется пространственным распределением потерь, состоит из стали (50 см) и бетона (200 см).

Вторая адронная пробка (оси VI-V зала) кроме поглощения непрореагировавшего с мишенью протонного пучка и вторичного излучения, генерируемого пучком, служит и для поглощения основного на данном канале “факела” мюонов, образующегося от распада π - и K -мезонов, рожденных на мишени. Дополнительной мюонной защитой является стальная боковая защита слева и справа по ходу пучка.

На участке транспортировки вторичного пучка от пробки до экспериментальной установки потери пучка носят распределенный характер. Их абсолютные максимальные значения несравнимо ниже, чем на участке формирования пучка и составляют в среднем около 10^6 – 10^7 ч/(с·м). Боковая и верхняя защиты на данном участке выполнены из бетона толщиной от 100 до 150 см.

Последним локальным источником адронного излучения на канале является мишень экспериментальной установки, расположенная перед спектрометрическим магнитом (74-я ось галереи). Интенсивность этого источника до 10^{11} ч/ц. Радиационной защитой от адронного и низкоэнергетического нейтронного излучения, генерируемого этим источником, служит как железо самого магнита, так и дополнительная защита, вмонтированная в магнит.

Высокоинтенсивная часть канала заканчивается еще одним стальным мюонным поглотителем (72-я ось галереи), который является частью экспериментальной установки и служит одновременно для поглощения непрореагировавшего с мишенью пучка частиц.

Для пропускания пучка протонов в павильон ПК-1 (примыкание к северной части галереи в районе 56–61-й осей) при работе 22-го канала в режиме вывода пучка интенсивностью 10^6 ч/ц на установку СВД, в поглотителе открывается специальный коллиматор. Для этой части 22-го канала радиационная защита не требуется. Низкоинтенсивная часть 22-го канала также заканчивается поглотителем, расположенным за павильоном ПК-1.

8. Контроль радиационной обстановки

Прямым способом определения эффективности и достаточности радиационной защиты является контроль уровней дозы в местах, доступных для персонала.

Контроль импульсного нейтронного излучения за защитой ускорителя ИФВЭ осуществляется автоматизированной системой радиационного контроля (АСРК). АСРК представляет собой сеть датчиков нейтронного излучения, установленных в 55 точках экспериментального зала, с соответствующей электроникой и компьютерной обработкой сигналов, приходящих с датчиков.

Датчиком нейтронного излучения является шаровой полиэтиленовый замедлитель диаметром 25 см, в центре которого помещен счетчик Гейгера, окруженный родиевым конвертером толщиной 0,1 мм площадью 5,8 см². Сечения захвата тепловых нейтронов родием около 180 барн (образующийся радионуклид Rh^{104} , $T_{1/2} = 44$ с, $E_{\beta} = 2,44$ МэВ (98%) [33]).

Калибровка и поверка нейтронных датчиков проводится ежегодно специалистами-метрологами Отдела радиационных исследований с использованием радионуклидных источников нейтронов. Паспортная погрешность нейтронного датчика составляет 30% для среднего значения измерительного диапазона. Отличие спектра калибровочного источника от реального (с преобладанием высокоэнергетических адронов) за защитой требует учета путем введения в программу обработки соответствующих коэффициентов.

Анализ статистических данных по показаниям детекторов за 1988–1997 годы позволяет говорить как о стабильности показаний отдельных датчиков, так и о работе АСРК в целом.

Контроль мюонного излучения на ускорителе осуществляется по мере необходимости. Измерения проводятся нестандартизованными средствами измерения, разработанными в ОРИ на основе как сцинтилляторов, так и ионизационных камер высокого давления.

9. Радиационная обстановка на ускорителе ИФВЭ

На ускорительном комплексе У-70 средствами АСРК одновременно с оперативным контролем дозиметрической обстановки, который осуществляется путем измерения мощности эквивалентной дозы, ведется и набор интегральных величин дозы в местах расположения датчиков СРК. Контроль ведется непрерывно во все время работы ускорителя. Датчики СРК располагаются и в местах, доступных для персонала ускорителя (на верхней защите и переходах). Места их расстановки показаны на рис.5. Расстановка датчиков практически не меняется с 1988-го года, что позволяет анализировать изменение радиационной обстановки на ускорителе от сеанса к сеансу и влияние на нее модернизации ускорительных систем и радиационной защиты.

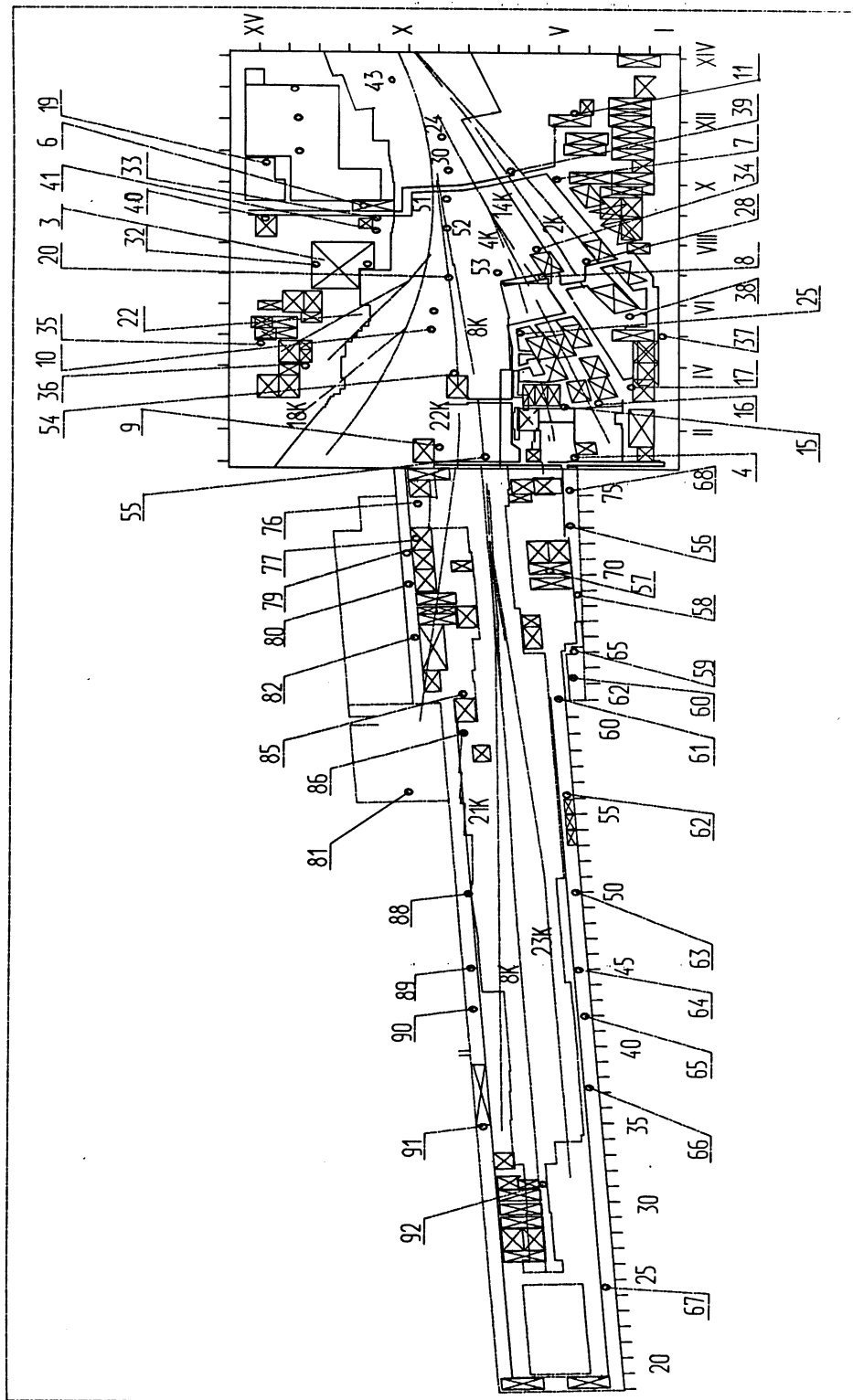


Рис. 5. Схема размещения радиационных мониторов.

Интегральные значения дозы, накопленные за год разными датчиками, расположенными в наиболее характерных точках ускорителя, и соответствующие им суммарные величины ускоренных за все сеансы данного года протонов, приведены в табл. 1–5. Хотя данные радиационных датчиков в табл.1–5 сгруппированы в соответствии с каналами, в районе которых они расположены, при их анализе следует учитывать влияние на них работы других каналов и экспериментальных установок, расположенных в разных местах ускорителя. Другими словами, существует достаточно сложная корреляция между показаниями разных датчиков и режимом работы ускорительно-экспериментального комплекса.

Таблица 1. Интегральная доза в районе каналов от внутренних мишеней 24-, 27-го блоков

Номер точки	1993 г.	1991–1992 гг.	1990–1991 гг.
	$I= 4.25 \cdot 10^{18}$ п	$I=5.07 \cdot 10^{18}$ п	$I=6.11 \cdot 10^{18}$ п
	Доза, бэр	Доза, бэр	Доза, бэр
57	0.5	0.6	1.1
56	0.6	0.9	1.3
68	0.7	1.5	1.7
4	0.9	1.2	1.6
15	1.2	1.1	1.3
17	0.5	0.8	1.0
25	0.9	2.4	2.4
37	0.4	1.0	1.0
38	0.7	1.2	1.3
8	2.2	2.6	3.1
28	1.3	1.5	2.7
34	3.4	4.9	5.3
7	1.7	3.2	3.6
39	4.8	8.1	8.2
11	2.4	3.7	4.3

Таблица 2. Интегральная доза в районе каналов от внутренних мишеней 33- и 35-го блоков

Номер точки	1993 г.	1991–1992 гг.	1990–1991 гг.
	$I= 4.25 \cdot 10^{18}$ п	$I=5.07 \cdot 10^{18}$ п	$I=6.11 \cdot 10^{18}$ п
	Доза, бэр	Доза, бэр	Доза, бэр
36	1.4	2.6	2.3
35	1.7	3.1	3.1
41	0.9	7.3	4.2
40	1.6	-	1.9
33	1.2	2.4	2.8
6	1.5	2.5	2.3

Таблица 3. Интегральная доза в районе верхней защиты ускорителя

Номер точки	1993 г.	1991–1992 гг.	1990–1991 гг.
	$I= 4.25 \cdot 10^{18}$ п	$I=5.07 \cdot 10^{18}$ п	$I=6.11 \cdot 10^{18}$ п
	Доза, бэр	Доза, бэр	Доза, бэр
10	-	3.8	2.7
22	7.5	13.6	18.5
53	10.7	19.8	18.9
20	1.2	1.9	2.0
52	2.8	4.9	3.9
51	3.0	5.9	4.0
30	4.0	8.1	6.4
24	10.0	8.4	131.2
43	128.7	213.9	275.4

Таблица 4. Интегральная доза в районе канала 23 и южной стороны 8-го канала

Номер точки	1993 г.	1991–1992 гг.	1990–1991 гг.
	$I= 4.25 \cdot 10^{18}$ п	$I=5.07 \cdot 10^{18}$ п	$I=6.11 \cdot 10^{18}$ п
	Доза, бэр	Доза, бэр	Доза, бэр
67	-	0.4	0.7
66	1.9	1.4	2.5
65	2.0	10.6	2.7
64	0.4	1.0	1.6
63	0.4	1.1	1.8
62	0.6	2.1	3.0
61	0.7	1.1	1.2
60	1.3	2.0	4.0
59	1.3	1.8	2.1
58	-	0.9	1.7
55	1.0	1.9	1.7
54	1.8	4.8	3.0

Таблица 5. Интегральная доза в районе канала 21, 22 и северной стороны 8-го канала

Номер точки	1993 г.	1991–1992 гг.	1990–1991 гг.
	$I=4.25 \cdot 10^{18}$ п	$I=5.07 \cdot 10^{18}$ п	$I=6.11 \cdot 10^{18}$ п
	Доза, бэр	Доза, бэр	Доза, бэр
92	0.17	0.5	0.7
91	0.6	2.2	4.0
90	0.9	1.4	2.2
89	0.4	0.9	1.2
88	-	-	1.6
81	0.18	0.3	0.4
86	0.6	1.4	0.9
85	0.8	2.3	0.6
82	0.5	0.9	1.8
80	0.5	1.0	2.2
79	0.4	0.7	1.2
77	0.5	0.9	1.2
76	0.5	0.9	1.4
9	0.6	2.1	4.8

При анализе приведенных в таблице данных следует иметь в виду, что средняя интенсивность пучка в ускорителе в рассматриваемом периоде времени составляла приблизительно $1,2 \cdot 10^{13}$ п/ц. Внутренние мишени потребляли не более $2 \cdot 10^{12}$ п/ц. Основная интенсивность (около $1 \cdot 10^{13}$ п/ц) сбрасывалась в 8-й канал.

Из самого общего анализа данных табл. 1–5 следует:

1. Накопленные за год на ускорителе дозы практически нигде не превышают величины 5 бэр/год — предела дозы (ПД), регламентированного НРБ-76 (исключением являются несколько точек на верхней защите ускорителя, доступ к которым организационными мероприятиями персоналу ограничен).

2. Средние значения интегральных доз в зале 1БВ на верхней защите ускорителя в 2–3 раза выше, чем средние по всем точкам ускорителя и вплотную приближаются (а в некоторых точках и превышают) значение ПД. Основной причиной сравнительно высоких уровней излучения в данном месте являются большие потери пучка при его “медленном” выводе. Поэтому уменьшение уровней доз на верхней защите, необходимое для повышения интенсивности пучка до проектной величины $3 \cdot 10^{13}$ п/ц, связано в первую очередь с увеличением эффективности “медленного” вывода.

3. Высокие уровни излучения в районе XIII - XIV осей экспериментального зала целиком обусловлены сбросом пучка на мишени 24- и 27-го блоков. Это излучение является главным источником рассеянного излучения (эффект “sky-shine”), определяющего радиационную обстановку как в данном месте (в радиусе $R \sim 15 - 20$ метров), так и на больших расстояниях от ускорителя ($R > 100$ метров).

4. Средние значения интегральных доз в районе экспериментальных установок каналов, работающих на внутренних мишенях, меняются от года к году очень слабо и практически не зависят от интегральной величины интенсивности в кольце. Это объясняется практически постоянной (не зависящей от полной интенсивности в кольце) величиной сброса интенсивности на внутренние мишени.

5. Дозы в районе высокоинтенсивных каналов (8; 23; 22), являющихся основными потребителями пучка, значительно ниже как ПД, так и средних значений дозы по ускорителю, что свидетельствует о хорошем уровне проработок радиационно-физических и магнитооптических аспектов этих каналов, а также о наличии некоторого резерва, необходимого для повышения интенсивности и перехода к более жесткой величине предела дозы (ПД, регламентируемое НРБ-96, 2 бэр/год).

Заключение

Проектирование радиационной защиты каналов высокоэнергетических частиц представляет собой сложную и многоплановую научно-техническую задачу, включающую в себя и проблемы расчета динамики потерь пучка, и задачи расчета распространения всех типов частиц в радиационной защите, (т.е. задачи, имеющей сложнейшие физические и математические аспекты), а также конструкторские проблемы.

В ИФВЭ накоплен большой опыт проектирования каналов высокоэнергетических частиц. Созданные и много лет успешно эксплуатируемые каналы и экспериментальные установки подтвердили правильность общих принципов, положенных в основу проектирования радиационных защит.

Приведенные данные радиационного контроля за 1991–1993 годы, практически нигде не превышающие регламентированные значения, свидетельствуют о надежности созданной радиационной защиты и корректности разработанного в ИФВЭ математического аппарата для решения радиационных проблем.

Отдельным вопросом является возможность перехода в середине 1999-го года на новые более жесткие нормативы облучаемости, регламентируемые НРБ-96. С учетом введения новых нормативов существующая защита полностью обеспечивает работу У-70 и каналов частиц в течение двух сеансов в год. К моменту появления возможности увеличения числа сеансов должна быть проведена дополнительная НИР по анализу спектрального и компонентного составов излучения за верхней защитой У-70 и каналов частиц и разработан проект модернизации защиты.

Авторы отмечают значительный вклад в создание радиационной защиты экспериментальной базы У-70 сотрудников ОРИ ИФВЭ Г.И.Бритвича, Г.И.Крупного (2-, 4- и 8-й каналы), Я.Н.Расцветалова (8-й канал) и Н.В.Мохова с коллективом лаборатории (распадная часть 23-го канала). Авторы считают своим приятным долгом выразить признательность коллективам ОРИ, ОП и КО за многолетнюю совместную работу по созданию каналов, а также персонально Т.Н. Алмазовой (КО) за подготовку чертежей защиты ускорителя и каналов для данной статьи.

Авторы также считают необходимым отметить большой вклад в развитие экспериментальной базы ускорителя безвременно ушедшего Р.Рзаева.

Список литературы

- [1] Нормы радиационной безопасности НРБ-76/87. — М.: Энергоатомиздат, 1988.
- [2] NRB96 Нормы радиационной безопасности НРБ-96. Госкомсанэпиднадзор России. — Москва, 1996.
- [3] Барашенков В.С., Тонеев В.А. Взаимодействия высокоэнергетических частиц и атомных ядер с ядрами. — М.: Атомиздат, 1980.
- [4] Калиновский А.Н., Мохов Н.В., Никитин Ю.П. Прохождение частиц высоких энергий через вещество. — М.: Энергоатомиздат, 1985.
- [5] Furuzuka M. et al. — In: Proc. ICANS-XIII, PSI Proceeding SF02 (1995), pp.836-842.
- [6] Furuzuka M. et al. Report 96-4, 1996.
- [7] Alexeev A. et al. Shielding Calculation for Design of Target Station for High Power Spallation Neutron Source: Preprint ИИЭП (to be published), Protvino, 1998.
- [8] Горбатков Д.В., Крючков В.П., Стриганов С.И. Дифференциальные сечения рождения адронов в неупругих hA-взаимодействиях для энергий первичных частиц 20 МэВ–10 ТэВ: Препринт ИФВЭ 92-172, Протвино, 1992.
- [9] Крючков В.П. Константное обеспечение расчетов переноса нейтронов в области энергий 0,02 эВ–400 МэВ. (Библиотека БНД-400): Препринт ИФВЭ 80-35, Протвино, 1980.
- [10] Горбатков Д.В., Крючков В.П., Семенова Г.И. Разработка системы константного обеспечения расчета переноса нейтронов и протонов с энергией до 600 МэВ в веществе. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерные константы. Выпуск 1, Москва, 1990.
- [11] Горбатков Д.В., Крючков В.П. Система адронных констант САДКО–2 для расчета переноса высокоэнергетического излучения многогрупповыми методами. — В сб.: Труды XIII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1992.
- [12] Voronkov A.V., Juravlev V.I. USCONS: Code System to Compute Group Cross Sections Using GNDL Data Library. - Keldysh Institute of Applied Mathematics, Moscow, 1983.
- [13] Roussin R.W. et. al. ORNL/RSIC-46 (ENDF-335), 1983.
- [14] Fasso A., Ferrari A., Ranft J. et al. FLUKA92. // Workshop on Simulating Accelerator Radiation Environments. — Santa Fe, USA, 1993.
- [15] GEANT 3.15 User Guide. — CERN, Geneve, 1993.
- [16] Gabriel T.A., Brau J.E., Bishop B.L. The Physics of Compensating Calorimetry and the New CALOR89 Code System. — ORNL/TM-11060, Oak Ridge, 1989.

- [17] Mohov N.V. The MARS Code System User's Guide Version 13(95). — Fermilab-FN-628, USA, 1995.
- [18] Крючков В.П., Суманеев О.В. MOSKIT1-программа для решения задачи переноса частиц (n , p , π , γ) в веществе методом Монте-Карло. (Алгоритм, инструкция): Препринт ИФВЭ 92-132, Протвино, 1992.
- [19] Gorbatkov D.V., Kryuchkov V.P. A comparison of computational data, obtained with a variety of well-known radiation transport codes. // NIM A 374, 1996, p.95
- [20] Волощенко А.М., Гермогенова Т.А., Крючков В.П. Расчеты прохождения нейтронов и протонов с энергией до 600 МэВ в веществе методом дискретных ординат. — В сб.: Труды XII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Москва, 1990. (ROZ400);
Крючков В.П., Волощенко А.М., Семенова Г.И. Численное решение уравнений переноса адронов с энергией до 400 МэВ в одномерной защите: Препринт ИФВЭ 83-164, Протвино, 1983.
- [21] Волощенко А.М., Горбатков Д.В., Крючков В.П., Юлдашев М.М. Численное решение уравнения переноса Больцмана-Фоккера-Планка для заряженного излучения. Международный симпозиум "Численные методы решения уравнения переноса". Москва, 1992.;
Волощенко А.М., Гермогенова Т.А., Горбатков Д.В., Крючков В.П. Комплекс программ для расчета переноса высокоэнергетических адронов в веществе методом дискретных ординат: — В сб. Труды XII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Москва, 1990. (ROZ6H)
- [22] Горбатков Д.В., Крючков В.П. Особенности применения сеточных методов для расчета переноса высокоэнергетических адронов: Препринт ИФВЭ 92-171, Протвино, 1992.
- [23] Лебедев В.Н. Радиационная защита ускорителей протонов на энергию 1–3000 ГэВ: Препринт ИФВЭ 78-131, Серпухов, 1978.
- [24] Carey D.C. TURTLE, Trace unlimited rays through lumped elements. A computer program for designing charged particle beam transport systems, NAL-64(1971);
Brown K.L. and Jselin Ch. DECAY TURTLE, A Computer program for simulating charged particle beam transport systems, including decay calculations, CERN 74-2 (1974).
- [25] Jselin Ch. HALO, A computer program to calculate muon halo. CERN 74-17 (1974).
- [26] Крючков В.П., Суманеев О.В. Расчетное исследование формирования дозы нейтронов в защитных лабиринтах: Препринт ИФВЭ 92-173, Протвино, 1992.
- [27] Крючков В.П., Семенова Г.И. Роль реакции μ^- захвата ядрами железа в формировании полей нейтронов вокруг поглотителей мюонов высокоэнергетических адронных пучков. // АЭ, 1987, т.63, вып.3.
- [28] Баратов Д.Г. и др. Препринт ИФВЭ 76-84, Серпухов, 1976; // ЖТФ. 1997, т.47, с. 991; Божко Н.И. и др. Нейтринный пучок ИФВЭ VI. Препринт ИФВЭ 76-89, Серпухов, 1976;

Бородин В.Е. и др. Нейтринный пучок ИФВЭ VII. Потери частиц и радиационная обстановка на тракте транспортировки выведенного протонного пучка нейтринного канала ИФВЭ. Препринт ИФВЭ 76-90, Серпухов, 1976.

- [29] Акопян М.В. и др. Адронный канал № 23 комплекса меченых нейтрино: Препринт ИФВЭ 86-129, Протвино, 1986.
- [30] Баталов А.А. и др. Универсальный канал пучков частиц для установки СФИНКС на ускорителе ИФВЭ: Препринт ИФВЭ 87-116, Протвино, 1987.
- [31] Афонин А.Г. и др. Универсальный высокоинтенсивный канал пучков частиц на ускорителе ИФВЭ (канал № 22): Препринт ИФВЭ 90-38, Протвино, 1990.
- Галяев Н.А. и др. Пучок поляризованных протонов на ускорителе ИФВЭ: Препринт ИФВЭ 92-159, Протвино, 1992.
- [32] Бородин В.Е. и др. Система радиационного контроля и блокировки трактов транспортировки пучков заряженных частиц: Препринт ИФВЭ 75-135, Серпухов, 1975.

Рукопись поступила 15 июня 1998 г.

В.Е.Бородин и др.

Радиационная защита ускорительно-экспериментального комплекса У-70.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы \LaTeX .

Редактор Н.В.Ежела.

Технический редактор Н.В.Орлова.

Подписано к печати 16.06.98. Формат $60 \times 84/8$. Офсетная печать.

Печ.л. 3,6. Уч.-изд.л. 2,8. Тираж 150. Заказ 186. Индекс 3649.

ЛР №020498 17.04.97.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий
142284, Протвино Московской обл.

