СОДЕРЖАНИЕ

1. РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ 1
1.1 Исходные данные и нормативные документы по радиационной безопасности 1
1.2 Исходные данные для расчета радиационной защиты 2
1.3 Расчет значений мощности проектной эквивалентной дозы за радиационной защитой 4
1.4 Расчет мощности эквивалентной дозы за существующей защитой 5
1.5 Расчет требуемой толщины радиационной защиты 8
1.6 Активация воздуха. 19
1.7 Активация деталей циклотрона. 22
1.8 Мероприятия по обеспечению радиационной безопасности 28
1.9 Система блокировки, сигнализации и радиационного контроля (СБСР) 31
1.10 Аварийные ситуации. Мероприятия и средства по их предупреждению. 39

1. РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

1.1 Исходные данные и нормативные документы по радиационной безопасности

1.1.1 Расчеты радиационной защиты, разработка мероприятий и инженерных систем, обеспечивающих радиационную безопасность, выполнены в соответствии с:

– Федеральным законом РФ «О радиационной безопасности населения» № 3 ФЗ от 09.01.1996г.;

– Федеральным законом РФ «Об охране окружающей среды» № 7 ФЗ от 10.01.2002г.;

– Федеральным законом РФ «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения» № 52 ФЗ от 30.03.1999г.;

– НРБ-99/2009;

– ОСПОРБ – 99;

– СанПиН 2.6.1.2573-10 «Гигиенические требования к размещению и эксплуатации ускорителей электронов с энергией до 100 МэВ»;

– Указание С-5797 от 29.09.89г. Первого заместителя министра СССР А.Н.Проценко, Главного государственного санитарного врача СССР Г.В.Сергеева.

1.1.2 Циклотронный комплекс (ЦК) СС 18/9-М, состоящий из циклотрона, линейки транспортировки ионного пучка, 2-х ближних и 3-х дальних мишеней, предназначен как для наработки медицинских радиофармпрепаратов, так и для проведения исследований в области разработки оборудования, предназначенного для серийного производства радиофармпрепаратов.

1.1.3 Согласно п.2.3 СанПиН 2.6.1.2573-10 и Указания С-5797 от 29.09.89г. Главного государственного санитарного врача СССР Г.В.Сергеева циклотрон СС 18/9-М относится ко II группе (с энергией 10÷100 МэВ) ускорителей, а по потенциальной радиационной опасности может быть отнесен к IV категории.

1.1.4 Основное оборудование циклотронного комплекса размещается в отдельном лабораторном корпусе, в специальных радиационно-защитных подвальных помещениях № 001, 008, 002, находящихся на отметке -3.100 (за нулевую отметку 0.000 принят уровень, который на 750 мм ниже уровня асфальтового полотна примыкающей дороги).

Согласовано

Взам. инв. №

Подпись и дата

Инв. № подл.

Изм.	Кол.у	Лист	№док	Подпись	Дата	ПНСА.158-РБ-ПЗ		
Разработал		Цыганков			11.12	Пояснительная записка	Стадия	Лист	Листов
Проверил		Пономаренко			11.12		П	1	40
Н.контроль		Киселева			11.12		ЗАО "НПО "Спецпроект" г. Санкт-Петербург		

1.1.5 Ранее в помещениях № 001, 008, 002 лабораторного корпуса эксплуатировался циклотрон МГЦ – 20 (с параметрами: 20 МэВ, 100 мкА), который физически, технически устарел и подлежит замене на циклотронный комплекс СС 18/9-М.

1.1.6 Основные помещения № 001, 008, 002, 009, где размещаются основное оборудование ЦК и вспомогательные помещения № 003÷007, конструктивно выполнены радиационно-защитными (т.е. все ограждающие конструкции представляют собой мощные железобетонные стены, полы, перекрытия). Пультовая – помещение № 201 размещается на II этаже в обычном по архитектурно-строительному исполнению камеральном помещении.

1.2 Исходные данные для расчета радиационной защиты

1.2.1 Планировка и геометрические координаты размещения основного оборудования ЦК (электромагнита с вакуумной камерой и ускоряющей системой, системы внешней инжекции, линейки транспортировки пучка, ближних и дальних мишеней) в помещении № 001 и оборудования систем питания, устанавливаемого в помещении № 008.

1.2.2 При работе ЦК источниками ионизирующего излучения являются: мишенные устройства, корпус вакуумной камеры с ускоряющей структурой, цилиндры Фарадея, ионопровод и вакуумные камеры, линейки транспортировки пучка к мишеням.

1.2.3 Интегральные потери ускоренных ионов в диапазоне энергий (2÷18)МэВ оцениваются величиной 2,5%.

Нейтральные и положительно заряженные частицы, ускоряемые в циклотроне, бомбардируют (воздействуют) следующие материалы: сталь (вакуумная камера) – 10%, медь (узлы резонансной ускоряющей системы) – 10%, алюминий (экраны – защитные баффлы) – 80% (в процентах указывается распределение интегральных потерь).

1.2.4 При настройке и плановой диагностике циклотрона диагностический пробник (алюминий – 80%, медь – 20%) и цилиндры Фарадея (90% углерод и 10%алюминий) подвергаются облучению полным током пучка.

1.2.5 Потери ускоренных частиц в ионопроводе (материал – алюминий) и вакуумных камерах (материал – алюминий) линейки транспортировки пучка минимальны и не превышают 1 % от тока пучка.

1.2.6 Мишени как ближние, так и дальние являются устройствами, в которых в облучаемом исходном материале (для производства РФП), практически полностью осуществляется торможение пучка.

1.2.7 При пусконаладке и настройке циклотрона основными источниками ионизирующего излучения являются цилиндры Фарадея и диагностический пробник, у которых их конструктивные материалы: углерод и алюминий, максимально контактируют с ионным пучком, имеющим максимальные параметры.

1.2.8 При работе циклотрона в штатном режиме на номинальной нагрузке основными источниками ионизирующего излучения являются мишени, нарабатывающие радионуклиды как углерод – C^{11} , так и фтор – F^{18}, у которых коллиматор (материал – углерод) и фольги (материал – нержавеющая сталь или титан) в наибольшей степени контактируют с пучком.

1.2.9 Техническая характеристика и устройство мишеней для производства радионуклида фтор – 18

Радионуклид ^{18}F производится в результате ядерной реакции $^{18}O(p,n)^{18}F$ при облучении протонами с энергией 18мэВ кислорода, входящего в состав обогащенной изотопом ^{18}O воды ($H_2\,^{18}O$, 95% обогащение).

Краткая характеристика и устройство мишени:

- максимальный ток пучка на входе в мишень (до коллиматора) – 75 мкА;
- максимальный ток пучка на выходе из коллиматора – 50 мкА;
- диаметр коллиматора – 16 мм;
- материал коллиматора – графит;
- объем мишени (облучаемой порции исходного материала) – 1,5 $см^3$;

– материал корпуса мишени – алюминий (титан или тантал);
– фольги (входная, выходная – 20 мкм) – нержавеющая сталь (или ковар);
– выход активности – до 150 ГБк (Е.О.В.) за 2 часа;
– корпус мишени охлаждается дистиллированной водой, а фольги входного окна обдуваются (охлаждаются) гелием.

1.2.10 Техническая характеристика и устройство мишеней для производства радионуклида углерод – 11

Радионуклид ^{11}C производится в результате ядерной реакции $^{14}N(p,n)^{11}C$ при облучении протонами газообразного сжатого азота.

Краткая характеристика и устройство мишени:
– энергия пучка протонов – 18 МэВ;
– ток пучка протонов на входе в коллиматор мишени – 75 мкА;
– максимальный ток пучка на выходе из коллиматора – 50 мкА;
– материал коллиматора – графит;
– материал корпуса мишени – алюминий;
– фольги (входная, выходная – 20 мкм) – нержавеющая сталь (или ковар);
– давление азота в мишени - 8÷10 бар;
– внутренний объем мишени (для азота) – 100 $см^3$;
– выход активности – до 50 ГБк (Е.О.В.) за 30 мин.;
– охлаждение комбинированное – вода охлаждает корпус, фольги обдуваются (охлаждаются) гелием.

1.2.11 При расчетах радиационной защиты, разработке инженерных систем и мероприятий по обеспечению радиационной безопасности необходимо учитывать следующие физические факторы вредности радиационного воздействия на персонал, помещения и оборудование:
– нейтронное излучение (быстрые нейтроны), возникающее в результате возникновения ядерных реакций при взаимодействии ускоренных частиц с материалами мишеней и диагностических устройств (пробников, цилиндров Фарадея);
– остаточную (наведенную) гамма – активность конструкционных материалов деталей, узлов циклотрона и мишеней;
– активацию воздуха в помещении циклотрона.

1.2.12 Проведенное обследование (отчет ООО «НПП ДНК») лабораторного корпуса НИИТФА установило, что в настоящее время:
– архитектурно-конструктивное исполнение помещений и в целом лабораторного корпуса соответствует первоначальным проектным решениям;
– дефектов и повреждений железобетонных ограждающих конструкций, обеспечивающих радиационную защиту помещений, не обнаружено;
– прочность бетона ограждающих и несущих конструкций соответствует требуемым значениям согласно первоначальному проекту;
– плотность бетона ограждающих железобетонных конструкций помещений № 001÷009, расположенных на отметке -3.100, составила 2,35 $т/м^3$;
– к цоколю (стенам) лабораторного корпуса примыкают грунты типа пластичные суглинки с плотностью 1,4 $т/м^2$;
– толщина железобетонного основания (пола) помещений составила 800 мм;
– толщина железобетонного перекрытия основного помещения № 001 составляет 1500 мм.

1.2.13 Характеристика и функциональное назначение помещений смежных и примыкающих к помещению № 001 (циклотронный зал)

К основному помещению №001, где размещается циклотрон, линейка транспортировки пучка и мишени, примыкают следующие помещения:

– за лобовой стенкой ($\delta_{бетона}$ =1500 мм, ось № 132) находится помещение ускорителя, где может находиться временно (не более половины рабочего дня) персонал группы «А» ($P_д$ = 12 мкЗв/ч – проектная допустимая мощность дозы);

– за стенкой ($\delta_{бетона}$ = 1850 мм) по оси 206 располагается помещение № 005 – зумпфовая, в которой хранятся радиоактивные отходы и активированные детали циклотрона. Персонал группы «А» в этом помещении бывает эпизодически (во время транспортировки радиационных отходов);

– за стенами, расположенными по осям № 207, 129 на отметке +0.750, примыкает территория института;

– помещения № 100, 112, смежные по вертикали, находящиеся над железобетонным перекрытием ($\delta_{бетона}$ = 1500 мм), являются вспомогательными с эпизодическим временем (0,25 $T_{раб}$) пребывания персонала группы «А».

К помещению систем питания № 008 (где находится временно при пусконаладке циклотрона персонал группы «А») примыкают следующие помещения:

– по оси № 205 за железобетонной стеной с толщиной 1850 мм находится зумпфовая, помещение № 005;

– по оси № 129 примыкает помещение для хранения ГП механизмов и устройств;

– по оси № 204 за железобетонной стеной находится основной корпус института;

– по оси № 205 размещается лабиринт–коридор, который ограждается от помещения № 001 двумя радиационно-защитными дверями;

– в конце помещения № 008 находится вход в многоколенный лабиринт циклотронного зала.

Все остальные помещения: № 003, 004, 006, 007, являются вспомогательными, где персонал группы «А» работает эпизодически, кратковременно при условии отсутствия радиационной опасности.

1.3 Расчет значений мощности проектной эквивалентной дозы за радиационной защитой

При расчете проектной мощности дозы учитываются категории (группы «А», «Б») работающего персонала, характер выполняемых работ и назначение смежных помещений (территорий) снаружи радиационно-защитных помещений:

– пультовая – помещение № 201 - относится к помещениям постоянного пребывания ($T_{пр}^{отн}$ = 1) персонала группы «А»;

– помещение № 008 и примыкающее помещение к помещению № 001 за лобовой стенкой (1500 мм) относятся к помещениям временного пребывания ($T_{пр}^{отн}$ = 0,5) персонала группы «А»;

– работы в помещениях № 001, 008 выполняются персоналом группы «А» в период наладки и технического обслуживания при неработающем циклотроне;

– все остальные смежные по вертикали и горизонтали помещения посещаются эпизодически ($T_{пр}^{отн}$ = 0,25) персоналом группы «А».

В соответствии с требованиями НРБ-99/2009, ОСПОРБ 99/2010 в качестве исходных данных приняты следующие предельно-допустимые (нормируемые) дозы облучения:

– 20 мЗв в год в среднем за любые 5 лет, но не более 50 мЗв в год для персонала группы «А»;

– 5 мЗв в год для персонала группы «Б»;

– 1 мЗв в год для персонала, не отнесенного к группам «А» и «Б».

Значения проектной допустимой эквивалентной дозы излучения на наружных поверхностях железобетонной радиационной защиты определялись по формуле:

$$P_д = \frac{10^3 \cdot ПД}{k \cdot T_{пр}^{отн} \cdot n \cdot 1700}$$ мкЗв/ч, где:

k = 2 – коэффициент запаса;

ПД – предел дозы, мЗв/год;

$T_{пр}^{отн}$ – максимальная доза времени, проводимого персоналом в данном помещении;

n = 1 – коэффициент сменности;

1700 – стандартизованная продолжительность работы за год при односменной работе и 36-часовой неделе, ч/год.

Результаты расчетов проектных эквивалентных допустимых мощностей доз за защитой приведены в Таблице № 1.

Таблица 1

Наименование наружных поверхностей, помещений, территорий	**Предел дозы для персонала групп «А», «Б», мЗв/год**	**Доля времени пребывания**	**Проектная допустимая мощность дозы, $P_д$, мкЗв/ч**
1. Пультовая, пом.№ 201	20 (гр. «А»)	1	6,0
2. Помещение за лобовой стенкой, пом.№ 001	20 (гр. «А»)	0,5	12,0
3. Дверь, ограждающая коридор № 009, вход в помещение №008	20 (гр. «А»)	0,5	12,0
4. Стены (поверхности) помещения № 008	20 (гр. «А»)	0,5	12,0
5. Стены коридора	20 (гр. «А»)	0,5	12,0
6. Помещения № 003, 004, 006, 007	5 (гр. «Б»)	0,5	3,0
7. Полы помещений № 100, 112	20 (гр. «А»)	0,5	12,0
8. Территория, прилегающая к лабораторному корпусу	1	0,12	1,2
ПРИМЕЧАНИЕ: Опыт эксплуатации ЦК в составе ПЭТ-центров показывает, что при односменном режиме работы фактическое максимальное время работы с пучком не превышает 6 часов в день. Таким образом, приведенные в Таблице 1 проектные допустимые дозы в 1,2 раза увеличивают коэффициент запаса k, который практически составит k=2,4.			

1.4 Расчет мощности эквивалентной дозы за существующей защитой

Расчет мощности эквивалентной дозы за штатной железобетонной защитой рассчитывается для моноэнергетических источников нейтронов с энергией E феноменологическим методом и производится в соответствии с формулой

$$P_д = \frac{S_o(E) \cdot \alpha \cdot B(E) \cdot k \cdot \exp^{-\delta/\lambda(E)}}{R^2} \quad мкЗв/ч,$$

где:

$S_o(E) = 3{,}0 \cdot 10^{12}$ н/стерадиан•с – (экспериментальные данные) – максимально возможный выход нейтронов (через телесный угол 1 стерадиан за секунду), образовавшийся при полном поглощении протонов углеродом (графитовые цилиндры Фарадея), или при взаимодействии в

мишени с обогащенной водой $H_2{}^{18}O$ (95 % ^{18}O), являющейся исходным материалом для получения радионуклида фтор ^{18}F;

B (E) = 3,8 – (экспериментальные данные) – фактор накопления нейтронов;

k – коэффициент, учитывающий интенсивность нейтронов в зависимости (по отношению) от направления выхода по отношению к пучку протонов;

δ (см) – толщина штатной железобетонной преграды в см при плотности бетона 2,35 г/см^2;

λ = 14 см – длина релаксации в бетоне (с плотностью 2,35 г/см^2) при энергии 18 МэВ;

α = 1,7 мкЗв•см^2•с/ч – коэффициент перевода флюенса (плотность потока) нейтронов;

R (см) – расстояние от источника нейтронов (цилиндр Фарадея или мишень) до расчетной точки на наружной поверхности защиты.

Перечень расчетных точек, их координаты расположения и результаты расчета приведены в Таблице 2.

Результаты расчетов мощности эквивалентной дозы показывают, что все ограждающие железобетонные конструкции циклотронного зала подлежат существенному усилению. Кроме того, рекомендуется для ослабления нейтронного излучения широко использовать «кирпичи» NEUTROSTOP CO (чистый полиэтилен), которые могут быть основным радиационно-защитным материалом при устройстве нейтронной ловушки и откатных радиационно-защитных дверей, перекрывающих входы в циклотронный зал.

Таблица 2

1.5 Расчет требуемой толщины радиационной защиты

Важнейшей характеристикой источника нейтронов - мишени циклотрона является поток нейтронного излучения, т.е. число нейтронов, испускаемых в единицу времени. Число нейтронов, приходящихся на одну бомбардирующую частицу, называется выходом реакции и зависит от энергии частицы, материала и толщины мишени, характера превращения, т.е. вида ядерной реакции.

Реакция (p,n) является эндотермической (т.е. требует затрат энергии), поэтому имеет порог реакции. В литературе обычно приводятся данные о выходах, как из тонких, так и их толстых мишеней. В любом случае требуется дополнительная интерпретация полученных данных.

Выход нейтронов при работе циклотрона приближенно определяется величиной [10]:

$$B = n \bullet I \bullet \gamma \bullet \sigma \bullet R \qquad (1.5.1)$$

где: n - число ядер в куб. см. материала мишени, 1/куб. см.
I - ток пучка, мкА
γ - среднее число нейтронов на одно неупругое взаимодействие,
σ - сечение неупругого взаимодействия, барн
R - максимальный пробег протонов в материале мишени, см

Для мишени из одного элемента в тонком слое dxi (г/см²), находящемся на глубине xi, выход нейтронов будет определяться величиной [12]:

$$dBi = 10^2 \cdot L/A \cdot I_i \cdot \gamma i \cdot \sigma_{in} \cdot dx_i \qquad (1.5.2)$$

где: L - число Авогадро,
A – атомный номер вещества мишени.

Полный выход нейтронов будет определяться величиной

$$B = 10^2 \cdot L/A \cdot \sigma_{in} \sum_{i-1}^{m} I_i \cdot \gamma i \cdot \sigma_{im} \cdot dx_i \qquad (1.5.3)$$

где: m - число слоёв мишени, определяемое условием $\Sigma dx_i \le R$ (максимальный пробег протона данной энергии в мишени).

Для определения величины максимального пробега можно воспользоваться расчётными номограммами для различных материалов.

В связи с отсутствием в большинстве случаев данных о величине сечения σin расчёт выхода нейтронов практически невозможен и для расчёта защиты необходимы экспериментальные данные по выходу нейтронов для различных элементов при различных энергиях ускоренных частиц и их угловому распределению.

Угловым распределением называется зависимость интенсивности излучения, в данном случае нейтронного, от угла θ между направлением оси пучка ускоренных частиц и направлением в точку наблюдения. В широкой области энергий, представляющих практический интерес, механизм ядерных реакций оказывается гораздо сложнее доступных обсчёту теоретических схем компаунд-ядра или прямых столкновений. В связи с этим, на практике основным источником данных по угловому распределению нейтронов являются экспериментальные работы.

Угловое распределение нейтронного излучения необходимо учитывать при расчёте радиационной защиты.

При расчёте радиационной защиты для быстрых нейтронов ($2 < En \le 20$ МэВ) угловое распределение можно считать изотропным для углов >90°. При углах <90° необходимо использовать экспериментальные данные.

Другой характеристикой источника нейтронного излучения при расчёте защиты является энергетической спектр испускаемых нейтронов. Энергия нейтронов зависит от энергии соответствующей реакции Q, кинетической энергии бомбардирующей частицы Ep и угла

вылета относительно оси пучка ускоренных частиц. В неявном виде связь между энергией нейтрона и параметрами ядерной реакции определяется формулой [8]:

$$Q = (1 + Mn/Mp)\cdot En - (1 - M/Mp)\cdot Ep - 2/Mb\cdot SQR(M\cdot Mn\cdot Ep\cdot En)\cdot\cos\theta \qquad (1.5.4)$$

где: Q - энергия реакции, МэВ
En - энергия нейтрона, МэВ
Mn - масса нейтрона, а.е.
Ep - энергия бомбардирующей частицы, МэВ
Mb - масса бомбардирующей частицы, а.е.
M - масса ядра - продукта, а.е.
θ - угол вылета нейтрона. рад
Mp – масса бомбардирующей частицы

Решение этого уравнения относительно En в общем виде представляется громоздким и неудобным для анализа. Поскольку зависимость En от угла вылета является плавной и монотонной, то En(90º) представляет собой некоторое среднее значение энергии реакции. При условии cos(θ) = 0, уравнение (1.5.4) примет вид:

$$\bar{E}n \sim En(90^\circ) = \frac{Mb - Mn}{2Mb + Mn}\cdot E + \frac{Mb}{Mb + Mn}\cdot Q \qquad (1.5.5)$$

При этом следует отметить, что энергия реакции Q может принимать несколько значений для одной и той же реакции, если ядро продукта находится как в стабильном, так и в возбужденном состоянии. В целом, можно сказать, что для заряженных частиц большой энергии и толстых мишеней спектр образующихся нейтронов оказывается сплошным. При оценке радиационной защиты используется среднее значение энергии спектра для углов >90°. Максимальная энергия нейтронного спектра пол углом 0° к оси пучка протонов, падающих на мишень, определяется как En = Ep - Q, (где Q – энергия связи нейтрона в ядре мишени).

В таблице 3 приведены данные по выходу нейтронного излучения из различных материалов для протонов с энергией 18 МэВ [6,7]. Для оценки защиты использовался выход нейтронов из ближайшего по массе и атомному заряду к элементу мишени (фтор) – кислород, для которого имеются экспериментальные данные.

Таблица 3

Реакция	E ион	I ион	$\bar{E}$ n	Макс. выход нейтронов		Примечание
				переднее направл.	полное простр.	
				Y(O) / стер*c	Yполн / c	
	MeV	μA	MeV			
1	2	3	4	5	6	7
^{7}Li(p,n)	18	100	4.4	8.5*E11	4.5*E12	
^{7}Li(p,n)	18	100	5.2	1.1*E12	1.8*E13	интерполяция
^{9}Be(p,n)	18	100	4.3	2.2*E12	8.4*E12	интерполяция
^{14}N(p,α)	18	100	3.4	3.5*E10	7.2*E10	
^{18}O(p,n)	18	100	3.4	4.1*E10	8.2*E10	
^{7}Li(d,n)	9	50	3.7	6.*E11	3.0*E12	
^{9}Be(d,n)	9	50	4.1	2.8*E12	1.1*E13	интерполяция

В таблице 4 приведены экспериментальные данные по угловому распределению в относительных единицах нейтронного излучения для протонов с энергией 18 МэВ из мишеней средней массы. [8]

Таблица 4

Параметр	Выход излучения D(φ)				
угол ф, град	0	30	60	90	140
Ep = 18 МэВ	1.00	0.55	0.26	0.15	0.08

Для учета изменения углового распределения внутри этого интервала с произвольным шагом можно воспользоваться интерполяцией в виде функции Гаусса [12]:

$$K\varphi i = EXP(-(\varphi i/Oo)^2) \qquad (1.5.6)$$

где: Кφi -коэффициент углового распределения,
φi - угол расчетной точки, град,
Oo - константа для интервала, в котором лежит расчетная точка,.

Константа Oo определяется по формуле:

$$Oo = Oe/SQR(LOG(Py) \qquad (1.5.7)$$

где: Oe – конечный угол интервала,
Py = Yb/Ye,
Yb = выход нейтронного излучения для начального угла расчётного интервала,
Ye = выход нейтронного излучения для конечного угла расчётного интервала.

Таким образом выход излучения под углом (φi) в расчетном интервале определяется по формуле:

$$P(\varphi i) = Yo*K\varphi i \qquad (1.5.8)$$

В зависимости от расположения элементов защиты относительно направления пучка в формуле (1.5.8) в качестве Po(φi) используется соответствующее значение величины мощности дозы, определенное по формуле (1.5.8) с учетом коэффициента углового распределения. Такой способ интерполяции позволяет “сшивать” значения выхода тормозного излучения в конце предыдущего расчетного интервала и начале следующего интервала.

Ввиду большой сложности решения уравнения переноса излучения на практике для расчета защиты применяются различные приближенные методы, дающие вполне удовлетворительные результаты. Использование этих методов дает возможность решать широкий круг практических задач. В работе [21] проведено сравнение расчета защиты от моноэнергетических нейтронов с энергией от 5 до 100 МэВ, а также нейтронов из медной мишени для протонов 30 и 72 МэВ для обычного бетона в диапазоне толщин от 25 до 300 см методом Монте-Карло и феноменологическим методом.

Сравнение результатов расчётов двумя методами показало, что расхождение в результатах не превышает величины слоя половинного ослабления. Феноменологический метод даёт незначительное (в пределах 5%) превышение расчётной мощности дозы за защитой по сравнению с методом МК. Феноменологический метод позволяет оперативно рассчитывать защиту с точностью, необходимой для проектирования ускорительных комплексов. Одним из таких простых и надежных феноменологических методов является метод длин релаксации. Этот метод основан на том факте, что пространственное распределение плотности потока (мощности дозы) нейтронов для пучка в условиях «широкой геометрии», т.е. для не коллимированных пучков с достаточно хорошей точностью определяется экспоненциальной зависимостью.

Схематически план размещения радиационно-технологической установки приведен на эскизе (чертеже) Е.343.380Д7 (лист 1, 2).

Поскольку геометрия облучения для каждой стены циклотронного зала различна, необходимо оценить уровни излучения на поверхности стен раздельно. Относительно направления пучка ускоренных протонов стены циклотронного зала можно условно определить как:

лобовая стена - стена, расположенная по ходу пучка перпендикулярно оси ионопровода ($\varphi = 0°$),

боковые стены – стены облучения, расположенные в вертикальной плоскости параллельно оси ионопровода ($\varphi = 90°$),

перекрытие - защита, расположенная над помещением циклотрона ($\varphi = 90°$)

Мощность дозы излучения в расчётной точке определяется по формуле (1.5.9):

$$P(\varphi i) = \frac{2 \cdot Yo \cdot f(\varphi i) \cdot \exp(-t/Lrel) \cdot Kfd}{10^4 Ri^2} \qquad (1.5.9)$$

где: $P(\varphi i)$ - мощность дозы нейтронов в расчётной точке, мкЗв/с,

Yo - выход нейтронов (плотность потока) по оси пучка, н/(с·см²),

$f(\varphi i)$ - функция углового распределения излучения, отн. ед.,

φi - угол в направлении на расчётную точку, радиан.

t - толщина защиты в направлении на расчётную точку, см,

Lrel - длина релаксации, см,

Ri - расстояние от источника до расчётной точки, м.

Kfd - коэффициент перевода потока в дозу,

2 - коэффициент запаса на проектирование, рекомендуемый Санитарными правилами.

Величина коэффициента перевода плотности потока в мощность дозы, зависящая от энергии нейтронов, приведена в работе [19]:

Для тепловых нейтронов ((E < 0.4 эВ) Kfd = 0.37 [мкЗв/ч]/[н/(см²·с)]

Для промежуточных нейтронов (0.4 эВ < E < 2 МэВ) Kfd = 0.36 [мкЗв/ч]/[н/(см²·с)]

Для быстрых нейтронов (2 < E <20 МэВ) Kfd = 1.26 [мкЗв/ч]/[н/(см²·с)]

Гигиенические требования к размещению ускорителей с энергией 100 МэВ [3] рекомендуют для спектра фотонейтронов коэффициент перевода мощности эквивалентной дозы в плотность потока нейтронов составляет $\alpha = 1.7$ [мкЗв/ч]/[н/(см²·с)]

Величина кратности ослабления в расчётной точке определяется по формуле (1.5.10):

$$K(\varphi i) = P(\varphi i)/Pпр \qquad (1.5.10)$$

Pпр - максимально допустимая проектная мощность дозы для соответствующей категории помещения, которая используется при расчёте радиационной защиты. Если ввести величину $Tw = 2{,}3 \cdot Lrel$, называемую слоем десятикратного ослабления излучения то величина $K(\varphi i)$примет вид:

$$K(\varphi i) = 10^{Ti/Tw} \qquad (1.5.11)$$

Из этой формулы толщина радиационной защиты в расчётной точке определяется по формуле:

$$Ti = Tw \cdot \log K(\varphi i) \qquad (1.5.12)$$

Слой десятикратного ослабления излучения Tw зависит от ряда факторов: энергии нейтронного излучения, толщины слоя защиты и его состава, компоновки защиты и геометрии облучения. Величина $n = \log K$ определяет количество слоев десятикратного

ослабления, необходимых для снижения уровня излучения за защитой до допустимой величины.

Величина длины релаксации (и, соответственно, слоя десятикратного ослабления излучения) является переменной величиной. Энергетический спектр нейтронов слабо изменяется по толщине защиты после прохождения начальных слоёв защиты, и величина Tw остается почти постоянной по всей толщине защиты, Поэтому вводится величина Twa - равновесная или асимптотическая величина. В связи с этим толщина защиты при нормальном падении излучения на поверхность защиты для широкого пучка (на основе экспериментальных данных) определяется по формуле:

$$Ti = Twa \cdot \log K(\varphi i) \qquad (1.5.13)$$

где: Twa - равновесный слой десятикратного ослабления излучения,
K(φi) - кратность ослабления излучения в расчётной точке,

С учётом угла падения излучения на поверхность защиты формула (1.5.13) примет вид

$$Ti = (Twa \cdot \log (K(\varphi i) - 1) + Twa1) \cdot \cos(\upsilon i) \qquad (1.5.14)$$

где: Twa1 - первый слой десятичного ослабления, см
υ - угол падения излучения на защиту, град.

У прямоугольных помещений для передней (лобовой) стены циклотронного зала угол υ = φ, где φ - угол направления пучка излучения в точку расчёта относительно оси пучка ускоренных частиц, градус. Для боковых стен и перекрытия камеры ускорителя угол υ = 90 – φ, для задней стены камеры угол υ = 180 - φ.

Длина релаксации (и, соответственно, слой десятикратного ослабления) в различных работах имеют расхождение, которое зависит от условий проведения работ: спектрального состава излучения, материала и толщины радиационной защиты, геометрии облучения, системы детектирования и др.

При расчёте радиационной защиты, как уже отмечалось выше, следует использовать значения максимально возможных выходов и максимального значения длины релаксации. Как, правило, максимальные выходы нейтронов обеспечивают мишени из лёгких элементов. Величину слоя десятикратного ослабления следует использовать из Санитарных правил (если в них такая величина приведена). В противном случае необходимо опираться на экспериментальные данные. Для расчетов длина релаксации принята – 14 см.

Для передней стены угол падения излучения в расчетной точке в зависимости от координаты расчётной точки будет определяться формулой:

$$\upsilon = \operatorname{arctg}((Si - Sm)/V) \qquad (1.5.15)$$

где: S_i - координата расчетной точки по ширине стены, м;
S_m - координата положения мишени циклотрона по ширине стены, м;
Rf - расстояние от мишени до внешней поверхности стены на высоте мишени, м;
V = SQR(Rf^2 + (Si - Sm)^2) - расстояние от мишени до расчетной точки на внешней поверхности защиты, м.

Угол падения излучения в расчетной точке в зависимости от высоты будет определяться формулой:

$$\upsilon = \operatorname{arctg}((Hi - Hm)/Vf) \qquad (1.5.16)$$

где: H_i - высота расчетной точки над полом, м;
H_m - высота мишени циклотрона над полом;
Rf - расстояние от мишени до внешней поверхности стены на высоте мишени, м;
Vf = SQR(Rf^2 + (Hi – Hм)^2)) - расстояние от мишени до расчетной точки на внешней поверхности защиты, м.

Для боковой стены угол падения излучения в расчетной точке на высоте мишени в зависимости от координаты расчётной точки будет определяться формулой:

$$\upsilon = \operatorname{arctg}((Si - Sm)/Vs) \qquad (1.5.17)$$

где: S_i - координата расчетной точки по ширине стены, м;

S_m - координата положения мишени циклотрона по ширине стены, м;

Rs - расстояние от мишени до внешней поверхности стены на высоте мишени, м;

Vs = SQR(Rs^2 +(Si – Sm)^2) - расстояние от мишени до расчетной точки на внешней поверхности защиты, м.

Для задней стены угол падения излучения в расчетной точке на высоте мишени в зависимости от координаты расчётной точки будет определяться формулой:

$$\upsilon = \operatorname{arctg}((Si - Sm)/Vb) \qquad (1.5.18)$$

где: S_i - координата расчетной точки по ширине стены, м;

S_m - координата положения мишени циклотрона ширине стены, м;

Rb - расстояние от мишени до внешней поверхности стены на высоте мишени, м;

Vb = SQR(Rb^2 + (Si – Sm)^2)) - расстояние от мишени до расчетной точки на внешней поверхности защиты, м.

Для задней стены расчёт защиты производится с учётом расположения так называемой «ближней» мишени, т.е. мишени расположенной на корпусе циклотрона.

Для перекрытия угол падения излучения в расчетной точке на высоте мишени в зависимости от координаты расчётной точки будет определяться формулой:

$$\upsilon = \operatorname{arctg}((Si - Sm)/Vh) \qquad (1.5.19)$$

где: S_i - координата расчетной точки по ширине стены, м;

S_m - координата положения мишени циклотрона по ширине стены, м;

Rh - расстояние от мишени до внешней поверхности перекрытия в точке расположения мишени, м;

Vh = SQR(Rb^2 + (Si – Sm)^2) - расстояние от мишени до расчетной точки на внешней поверхности защиты, м.

Отсчёт координаты расчётной точки производился :

- для передней и задней стен от боковой наружной стены помещения циклотрона,
- для боковых стен и перекрытия от передней стены помещения циклотрона.

Результаты расчётов толщины защиты помещения циклотрона приведены в таблицах 1 - 8 Приложения 3.

По результатам расчетов толщины стен радиационной защиты ниже приведены рекомендации по их усилению.

Индекс стены	Название	Существующая толщина бетона, см	Расчётная толщина бетона, см	Необходимое усиление бетона, см	Примечание
“А“	Лобовая	150	215	65	
“Б“	Боковая (наружная)	70	150	80	С наружной стороны здания от поверхн. земли на гл. 2,5м
“В“	Задняя	90	170	80	– « –
“Г“	Боковая (внутренняя)	190	185	0	
“П“	Перекрытие	150	210	60	В зоне удалённых мишеней

Рассеянное внутри помещения нейтронное излучение может дать заметный вклад в дозу облучения на выходе защитного лабиринта. Рассеянные нейтроны появляются в результате отражения от оборудования и защитных стен внутри помещения циклотрона. Рассеянные нейтроны могут являться основным фактором облучения на стенах, на которые не попадает прямой пучок. Плотность потока рассеянных нейтронов приближенно может быть определена по формуле [5]:

$$Фsc = Фo \bullet \alpha \bullet S/(Rs^2) \qquad (1.5.20)$$

где: Фsc - плотность потока рассеянных нейтронов,1/(см²·с)
Фo - максимальная плотность потока прямого нейтронного излучения на рассеивающей поверхности,1/(см²·с)
S - площадь рассеивающей поверхности, м²
α - альбедо нейтронов,
Rs - расстояние от центра рассеивающей поверхности до точки, м.

Для оценки альбедо нейтронов может быть использована средняя энергия спектра.

В дополнение к однократно рассеянному излучению следует учитывать и многократно рассеянное излучение. Для учета влияния рассеянного излучения толщина защиты должна быть увеличена на слой половинного ослабления.

Коэффициент ослабления рассеянного нейтронного излучения определяется формулой:

$$Kr = Фsc \cdot Kfd/Pпр \qquad (1.5.21)$$

где: Kfd - коэффициент перевода плотности потока в мощность эквивалентной дозы,
Pпр - проектная мощность эквивалентной дозы для данной категории помещения.

Толщина защиты в этом случае определяется формулой:

$$Tрас = Twa \bullet \ln Kr + Thv \qquad (1.5.22)$$

где: Thv – слой половинного ослабления нейтронного потока.

В радиационной защите установки необходимо предусматривать различные ослабления, вызванные технологическими причинами: входные двери, кабельные каналы, воздуховоды, трубопроводы и т.п. В тех случаях, когда невозможно обеспечить надежную защиту за счет соответствующего локального усиления неоднородностям в защите придают сложную конфигурацию с тем, чтобы исключить возможность прямого «прострела» излучения.

Многократное отражение излучения от стенок при прохождении его через полость неоднородности приводит к ослаблению интенсивности излучения на выходе. На этом принципе создаются так называемые защитные "лабиринты".

Форма и геометрические размеры лабиринта должны обеспечивать необходимое число отражений для снижения интенсивности излучения до допустимого уровня в наружных проемах радиационной защиты.

Детальный расчет лабиринта представляет собой сложную задачу, где необходимо учитывать влияние множества различных факторов, которые строго количественно зачастую определить невозможно. Поэтому для оценки уровня излучения на выходе лабиринта используются приближенные методы, основанные на целом ряде допущений.

Для усиления защитных свойств лабиринта его геометрическая форма выбирается такой, чтобы исключить прохождение прямого потока через первое колено лабиринта. В связи с этим основной вклад в дозу на выходе лабиринта будет давать альбедная компонента прямого излучения. В ядерной и радиационной физике альбедо характеризует отражение ионизирующих излучений от рассеивающих тел.

При оценке альбедной компоненты ввиду сложности ее определения, а также неопределенности целого ряда физических факторов, связанных с не монохроматичностью спектра тормозного излучения ускорительных установок, приходится делать ряд упрощающих допущений.

В, частности:

- используется геометрия широкого пучка,
- ослабление излучения в защите описывается экспоненциальной функцией,
- рассматривается только однократное рассеянное излучение,
- угловое распределение рассеянных квантов считается изотропным,
- спектр рассеянного излучения рассматривается как монохроматический с энергией равной средней энергии спектра,
- не учитываются различные теневые эффекты.

С учетом этих допущений мощность эквивалентной дозы однократно рассеянного нейтронного излучения будет определяться формулой:

$$P_{рас} = P_s \cdot \frac{\alpha(\theta,E_o)\cdot S1\cdot\cos(\theta)}{R^2} \qquad (1.5.23)$$

где: Ps - мощность эквивалентной дозы нейтронного излучения, падающего на поверхность S1,

α - дифференциальное дозовое альбедо излучения с энергией En, падающего под углом θ на поверхность S1,

S1 - первая рассеивающая поверхность,

R - расстояние до точки расчёта, м.

Величина Ps определяется формулой:

$$P_s = P(\varphi)/ R_o^2 \qquad (1.5.24)$$

где: Pφ - мощность стандартной эквивалентной дозы под углом φ,

Ro - расстояние от источника до центра рассеивающей поверхности.

В конечном итоге для канала или лабиринта с "n" числом колен мощность эквивалентной дозы на выходе приближенно оценивается по формуле [4]:

$$P_n = P_s \bullet \prod_{i=1}^{n} \frac{\alpha i\,(\theta i,Ei)\cdot Si\cdot\cos(\theta i)}{li^2} \qquad (1.5.25)$$

где: αi - альбедо излучения i-того канала,

Si - площадь рассеяния i-того канала,

li - длина i-того колена лабиринта.

Для каналов и лабиринтов с одинаковым сечением и прямоугольными коленами площадь колена определяется величиной Si= h•d :

где: h - высота лабиринта (канала)

d - ширина лабиринта (канала)

θi = 0, следовательно cos(θi) = 1

Поэтому формула (12.4) примет вид:

$$P_n = P_s\cdot\prod_{i=1}^{n} \frac{\alpha(\theta i,Ei)\bullet Si}{li^2} \qquad (1.5.26)$$

где: Ps - мощность эквивалентной дозы на входе в лабиринт (со стороны излучателя) в центре входа, мкЗв/ч.

Способ ослабления нейтронов, проходящих через каналы и трубопроводы, является сложным вопросом технологии защиты. В связи с этим часто каналы для нейтронов проектируются с большим запасом. В некоторых случаях бывает необходимость дополнительного усиления.

Такая неопределенность приводит к тому, что проектировщики чаще предпочитают использование защитных дверей, а не лабиринтов.

Тем не менее, существуют определенные консервативные и эмпирические правила при проектировании лабиринтов или трубопроводов.

Для материалов защиты приято использовать обычный бетон или близкие к нему по коэффициенту отражения нейтронов материалы. Это связано с тем, что заметная часть нейтронного излучения внутри помещения ускорителя является отраженными нейтронами.

Важно подчеркнуть, что основной поток прямого нейтронного излучения не должен падать на вход лабиринта, канала вентиляции или трубопровода.

Трубы и воздуховоды включают в себя необходимые для работы ускорителя технологические газовые и водяные системы, а также устройства транспортировки изделий по пневмопочте.

Сечения таких трубопроводов должны быть малы по сравнению с размерами стен.

Ориентация трубопроводов и воздуховодов должна исключать возможность прямого прострела излучения по их осям.

Изгибы трубопроводов должны быть плавными, чтобы возможность их засорения внутри защиты была минимальной и была удобной прочистка линии.

Допустимо использование прямых каналов для прокладки кабелей и трубопроводов, однако они должны быть расположены ниже уровня поверхности поля, а пространство между кабелями и трубопроводами после их прокладки должно быть заполнено защитным материалом. Для этих целей целесообразно использование сыпучих материалов. В этих случаях они легко принимают любую форму и полностью заполняют свободное пространство между кабелями и трубопроводами.

Обратное рассеяние нейтронного излучения от среды и другие процессы взаимодействия, приводящие к образованию вторичного излучения, покидающего среду через ту же поверхность, на которую падает первичное излучение, при использовании альбедо рассматриваются как явление отражения.

В наиболее общем виде поле обратно рассеянного излучения определяется:

- энергией и угловым распределением излучения, геометрией источника излучения,
- формой, составом и толщиной рассеивателя,
- взаимным расположением источника и рассеивателя, а также составом среды в которой находятся источник, рассеиватель и детектор (обычно это воздушная среда).

Анализ экспериментальных и теоретических работ показывает, что основные характеристики дифференциального альбедо в большой степени зависят от химического состава отражающего материала. При этом значительное влияние на формирование поля отраженного нейтронного излучения оказывает присутствие в составе рассеивателя водорода.

На основе данных по альбедо нейтронов можно выделить несколько групп материалов, для которых в пределах группы основные закономерности формирования поля обратно рассеянных нейтронов можно считать общими, а зависимость дифференциального альбедо от параметров излучения может описать единым соотношением. Условно эти группы материалов можно называть:

а) водородосодержащие,

б) не водородосодержащие,

в) с малым содержанием водорода,

г) гетерогенные композиции из слоев тяжелых материалов и слоев водородосодержащих материалов.

В спектре отраженных нейтронов наблюдаются две ярко выраженные компоненты, соответствующие однократному и многократному рассеянию.

Для материалов с атомным номером A>>1 при высокой энергии нейтронов преобладающую роль в процессе замедления играет неупругое рассеяние. Однако, вероятность неупругого рассеяния быстро падает с приближении к пороговой энергии возбужденного уровня ядра, поэтому замедление энергии нейтронов в дальнейшем происходит

за счет упругих взаимодействий. Форма энергетического спектра многократно рассеянного излучения в основном определяется средними потерями энергии при столкновении. Возможность потерь энергии нейтроном через неупругие и упругие взаимодействия, зависимость потерь энергии от атомного номера ядра и энергетического спектра нейтронов значительно усложняют форму спектра многократно рассеянных нейтронов и не позволяют описать его в простой форме.

В инженерной практике для описания характеристик альбедо нейтронов используют различные эмпирические и полуэмпирические формулы. Для оценочных расчетов дозового альбедо быстрых нейтронов для бетона, железа и грунта предложена довольно простая формула [14,14а]:

$$\alpha(En,\theta o,\theta s) = A(En)\cdot\cos(\theta s) + \frac{B(En) + C(En)\cdot\cos(\theta s)}{1 + k(En)\cdot\frac{\cos(\theta s)}{\cos(\theta o)}} \qquad (1.5.27)$$

где: A(En), B(En), C(En), K(En) - параметры, зависящие от энергии нейтронов и химического состава рассеивателя (в Таблице 4)

θo - угол падения нейтронов

θs - угол отражения нейтронов.

Для источников с непрерывным энергетическим спектром нейтронов расчет альбедо является чрезвычайно сложной задачей. Упрощенную оценку можно провести путем замены непрерывного спектра нейтронов средней энергией спектра, т.е. в формуле (1.5.27) $En = \mathring{E}n(ср)$.

Такой же подход можно использовать и для оценки альбедо многоколенного лабиринта, где отраженному излучению в каждом последующем колене приписывается средняя энергия спектра отраженного в предыдущем колене излучения.

При оценке средней энергии спектра предпочтение следует отдавать экспериментальным данным, т.к. теоретическая оценка средней энергии затруднена неопределенностью теоретического определения спектра нейтронов. Спектральное распределение нейтронов приближенно определяется функцией вида:

$$N(En) = C\cdot E\cdot\exp(-E/T) \qquad (1.5.28)$$

где: C - эмпирическая константа,

En - энергия нейтрона,

T - ядерная температура, зависящая от A и En, (T = 1,5 МэВ).

Энергия рассеянных нейтронов определяется по формуле:

$$En = E\cdot\left[1 - \frac{A}{A+1}\cdot\left(1 + \frac{2}{A+1}\cdot E/En - \mu\cdot 1 - \frac{(A+1)\cdot E}{A\cdot En}\right)\right] \qquad (1.5.29)$$

где: En - средняя энергия спектра нейтронов,

A - масса ядра материала защиты,

E - энергия возбуждения неупругого рассеяния,

μ - косинус угла рассеяния.

Как видно из формулы (1.5.30) для материалов с A>>1 энергия однократно рассеянных быстрых нейтронов (En >E) слабо изменяется за один акт рассеяния, поэтому при оценке утечек излучения быстрых нейтронов через лабиринт при небольшом числе колен (n = 3 - 4) можно приближенно считать, что альбедо быстрых нейтронов слабо изменяется, т.е. α = αi, где αi - альбедо i-того колена.

Для бетона обычного состава (ρ = 2,35 г/см) получена более простая формула для альбедо нейтронов:

$$a(Eo,\theta o,\theta s,) = \frac{A(Eo)\cdot\cos(\theta o)}{\cos(\theta o) + coa(\theta s)} \qquad (1.5.30)$$

где: $A(E_o) = E_o \cdot \exp[O.9719 - 2.895\ E_o + O.3417 E_o]$ (1.5.31)

В таблице 5 приведены значения параметра A(Eo) для различных энергий нейтронов.

Таблица 5

Eo,МэВ	0,10	0,25	0,50	1,00	2,00	3,00	5,0	14,0
A(Eo)	0,1461	0,154	0,157	0,192	0,173	0,155	0,127	0,084

Формулы, учитывающие анизотропию многократного рассеяния имеют значительно более сложный вид. Все эмпирические формулы (1.5.28), (1.5.30), (1.5.31) выведены на основе расчетов, выполненных методом Монте-Карло для конкретного материала. Поскольку между результатами расчетов, выполненных различными авторами существуют заметные расхождения, то использование таких результатов встречает определенные трудности. Однако, расхождение в 20 - 30 % при оценочных расчетах вполне приемлемо.

Для случая прямоугольного лабиринта $\cos(\theta o) = 1$ (т.е. угол падения равен 0°) и $\cos(\theta s) = 0$ (т.е. угол отражения равен 90°). Следовательно в соответствии с формулой (1.5.31) альбедо бетона для нейтронов высоких энергий в первых коленах лабиринта можно считать равным $\alpha = 0.08$. Используя эту величину можно приближённо оценить мощность дозы нейтронного излучения на входе лабиринта (со стороны рабочих помещений).

При расчёте мощности дозы нейтронного излучения на выходе из лабиринта (или вход в лабиринт со стороны рабочих помещений) помимо утечек прямого излучения через лабиринт (по формуле 1.5.26) необходимо учесть утечки через лабиринт однократно рассеянного в камере ускорителя нейтронного излучения. Приближённая оценка такого излучения приведена в работе [5].

Мощность дозы излучения в этой точке определяется по формуле:

$$Pl = Ple + Pse + Pbe \qquad (1.5.32)$$

где: Ple - мощность эквивалентной дозы от прямого излучения на входе в лабиринт (со стороны камеры ускорителя), мкЗв/ч,

Pse – суммарная мощность эквивалентной дозы от однократно рассеянного излучения на боковой стене, полу и перекрытии камеры ускорителя на входе в лабиринт (со стороны камеры ускорителя), мкЗв/ч,

Pbe - мощность эквивалентной дозы от однократно рассеянного излучения на задней стене камеры ускорителя на входе в лабиринт (со стороны камеры ускорителя), мкЗв/ч.

Величины Ple, Pss, Psb определяется по формулам (1.5.23 – 1.5.26 и 1.5.31). Для расчётов использовались следующие геометрические величины

Rf - расстояние от мишени до передней (лобовой) стены камеры ускорителя, м,
Rs - расстояние от мишени до боковой стены камеры ускорителя, м,
Rb - расстояние от мишени до задней стены камеры ускорителя, м,
Rl - расстояние от мишени до центра входа в лабиринт камеры ускорителя, м,
L1 - длина первого колена лабиринта, м,
L2 - длина второго колена лабиринта, м,
L3 - длина третьего колена лабиринта, м,
W1 - ширина 1-го колена лабиринта, м,
W1 - ширина 2-го колена лабиринта, м,
W1 - ширина 3-го колена лабиринта, м,
H - высота лабиринта, м,
Wk- ширина камеры ускорителя, м,
Lk - длина камеры ускорителя, м,
Hk - высота камеры ускорителя, м,

Twk- толщина соответствующей стены камеры ускорителя, м.

С учётом этих величин мощность дозы нейтронного излучения от мишени циклотрона на выходе лабиринта (в центре двери лабиринта со стороны рабочего помещения) будет определяться по формулам[4]:

$$Ple = Plm \cdot П \frac{n \quad \alpha i(\theta i,Eo)\cdot Si\cdot\cos(\theta s)}{i=1 \qquad Li^2} \qquad (1.5.33)$$

где: Plm - мощность эквивалентной дозы нейтронного излучения, падающего на вход лабиринта, мкЗв/ч,

Si - площадь сечения лабиринта, кв. м,

ai - дифференциальное дозовое альбедо излучения с энергией En, падающего под углом θi на рассеивающие поверхности лабиринта,

Li - длина i-того колена лабиринта,

n - число колен лабиринта.

Величина Plm определяется формулой:

$$Plm = P(\varphi)/Rl^2 \qquad (1.5.34)$$

где: P(φ) - мощность эквивалентной дозы (выход излучения) под углом φ к центру входа в лабиринт,

Rl - расстояние от мишени до центра входа в лабиринт, м.

Мощность эквивалентной дозы однократно рассеянного излучения на задней стене бокса на выходе лабиринта (со стороны коридора) будет определяться по формуле:

$$Pbe = Pbs \cdot П \frac{n \quad \alpha(\theta,Eo)\cdot Sbs\cdot Si\cdot\cos(\theta b)}{i=1 \qquad Rss^2\cdot Li^2} \qquad (1.5.35)$$

где: Pbs - мощность эквивалентной дозы нейтронного излучения, падающего на заднюю стену бокса,

Sbs - рассеивающая внутрь лабиринта часть боковой стены, (Sbs = W·H)

ai - дифференциальное дозовое альбедо излучения с энергией En, падающего под углом θ на поверхность Sbs,

Rbs- расстояние до центра рассеивающей поверхности, м. (Rbs = SQR(Rb² + (Rs - Wk/2) ²)

i - число колен лабиринта.

Величина Pbs определяется формулой:

$$Pbs = P(\varphi)/Rss^2 \qquad (1.5.36)$$

где: P(φ) - мощность эквивалентной дозы (выход излучения) под углом φ к центру рассеивающей поверхности задней стены,

Суммарная мощность эквивалентной дозы нейтронного излучения на выходе лабиринтов (со стороны рабочих помещений) с учётом поглощения излучения во входной двери (толщина защиты не менее 8 см материала «нейтронстоп») по результатам оценки составляет 8.2 мкЗв/ч.

1.6 Активация воздуха.

При работе циклотрона в результате взаимодействия интенсивных потоков нейтронов с элементами воздуха происходит их активация. Радиоактивность воздуха в несколько раз превышает допустимые концентрации радионуклидов в воздухе рабочих помещений. В связи с тем, что период полураспада основных радиоизотопов воздуха невелик, доза облучения персонала может составлять лишь несколько процентов от максимально допустимой дозы. Тем не менее необходимо принятие определенных мер для снижения концентрации радионуклидов в воздухе, особенно в случаях когда возможно увеличение параметров пучков ускоренных частиц - тока пучка и энергии.

Состав элементов в воздухе по объёму приведен в работе [22]:

В составе воздуха основной объём занимают три газа, по которым и проводится оценка активации. Содержание по объёму составляет: Азот – 78%, Кислород – 21%, Аргон – 0.93%. Остальные газы занимают объём, который можно не учитывать. Из естественной смеси изотопов в реакции (n,γ) участвуют С-13, N-15, Аргон -40. Из этих изотопов учитывается вклад в активацию воздуха только аргон, т.к. содержание С-13 N-15 в воздухе очень мало. Постоянная распада радионуклида $\lambda i = 0.69/Thvi$, где Thvi – период полураспада i-того элемента. Радиоактивность воздуха в помещении циклотронного зала обусловлена взаимодействием излучения с двумя компонентами воздуха: газовой и аэрозольной. Как правило, рассматривается только газовая компонента, т.к. вес аэрозолей даже при максимально допустимой запыленности помещений, составляет примерно одну миллионную часть от веса чистого воздуха помещения, т.е.:

$$\rho аэр/\rho возд < 1 \cdot E\text{-}6 \qquad (1.6.1)$$

где: ρаэр - удельный вес аэрозолей в единице объёма воздуха при максимальной запыленности (~ 2 мг/куб.м),

ρвозд - удельный вес чистого воздуха.

Распределение удельной активности воздуха в помещении циклотронного зала будет, в основном, определяться пространственным распределением плотности потока излучения нейтронов, а также диффузным и конвекционным перемешиванием потоков воздуха в этих помещениях. Из-за сложного характера пространственного распределения излучения и отсутствия возможности строго учета конвекционных потоков невозможно точно рассчитать распределение удельной активности радионуклидов воздуха в помещениях. Состав, участвующих в активации воздуха изотопов в природной смеси элементов с учётом их объёмного содержания в смеси равен: Азот-14 - 78.09% (Thvi = 7.5 сек), Кислород-16 – 20.95% (Thvi = 29.5 с), Аргон -40 – 0.93% (Thvi = 108 мин)

Постоянная распада азота $\lambda n = 0.092$ 1/с, кислорода $\lambda o = 0.0234$ 1/с, аргона $\lambda a = 0.38$ 1/ч

Основные радионуклиды воздуха приведены в Таблице 6.

Таблица 6

Радио-изотоп	Период полураспада	Постоянная распада 1/h	Сечение реакции барн	Реакция	Ядерная плотность изотопа 1/куб.cm	Акт. n*E-6 Ки/л	tзапр мин
$^{13}_{7}N$	10,48 min	4,104	0,001	$^{14}_{7}N(n,2n)^{13}_{7}N$	2,11*E19	11.3	19.5
	7,35 sec	3,384*E2	0,005		0,56*E19	0.05	0.15
$^{16}_{7}N$	1,97 min	2,117*E1	0,002	$^{16}_{8}O(n,p)^{16}_{7}N$	0,56*E19	.74	0.25
	1,82 h	3,845*E-1	0,0005		2,5*E17	0.06	0.9
$^{15}_{8}O$				$^{16}_{8}O(n,2n)O$			
$^{41}_{18}Ar$				$^{40}_{18}Ar(n,\gamma)^{41}_{18}Ar$			

Для практических целей радиационной безопасности персонала достаточно определить среднюю удельную активность воздуха в помещениях, исходя из того, что них непрерывно происходит интенсивное перемешивание воздуха. Исходя из такого предположения можно определить среднюю удельную активность элемента по формуле:

$$\Phi t \cdot Ni \cdot \sigma i \cdot l$$

$$Ci(t) = \frac{}{V\bullet(\lambda i + Ko)}\bullet\{1 - \exp[-(\lambda i + Ko)\bullet t]\} \qquad (1.6.2)$$

где: Ci(t) - удельная концентрация i-того радионуклида в воздухе, Ки/куб.м
Фt - полный выход нейтронов,
Ni - количество ядер i-того изотопа в кубическом см воздуха,
σi(En) - сечение образования i-того изотопа, бн
l - толщина слоя воздуха, см
V - объём помещения, куб. м,
λi - постоянная распада i-того радионуклида, 1/ч,
Ko - кратность воздухообмена в помещении, 1/ч
t - время работы ускорителя, ч.

Средняя плотность потока быстрых нейтронов для i-того изотопа определяется величиной:

$$\bar{j}i = \eta i\bullet\bar{j}n \qquad (1.6.3)$$

где: ηi - доля потока быстрых нейтронов для i-той реакции, определяемая концентрацией этого изотопа в воздухе,

где: jn - средняя по объёму помещения плотность потока нейтронов, равная:

$$\bar{j}n = Yo/V \qquad (1.6.4)$$

где: Yo(4π) - полный выход нейтронов (Таблица 3)

В этом случае формула (1.6.2) примет окончательный вид:

$$Ci(t) = 10^6\frac{\bar{j}i\bullet Ni\bullet\sigma i\bullet l\bullet\{1 - \exp[-(\lambda i + Ko)\bullet t]\}}{3.7\bullet10^{10}(\lambda i + Ko)}\ (Ки/м^3) \qquad (1.6.5)$$

Для равновесной удельной активности i-того изотопа, когда (λ i + Ko) >> 1 получим выражение:

$$Ci = 10^6\frac{\bar{j}i\bullet Ni\bullet\sigma i\bullet l}{3.7\bullet10^{10}(\lambda i + Ko)}\ (Ки/м^3) \qquad (1.6.6)$$

Суммарная средняя равновесная активность всех радионуклидов воздуха определяется величиной:

$$C = \sum_{i=1}^{n} Ci \qquad (1.6.7)$$

где: n - число элементов воздуха, учитываемых при активации воздуха (четыре).

Для обеспечения безопасности обслуживающего персонала после выключения циклотрона для входа в помещение циклотрона устанавливается запретный период - Tз, в течение которого концентрация наиболее активного радионуклида должна снизиться до СДК (среднегодовой допустимой концентрации) .

Продолжительность запретного периода по i-той компоненте определяется по формуле:

$$Tз = \frac{\ln[Ci(t)/Доа]}{(\lambda i + Ko)} \qquad (1.6.8)$$

где: Ci(t) - средняя концентрация i-того радионуклида воздуха на момент выключения циклотрона после работы в течение t часов,
t - время работы циклотрона с пучком,
λi - постоянная распада i-того изотопа,
Ko - кратность воздухообмена в помещении,

Доа – допустимая объёмная концентрация i-того радионуклида в воздухе,

Время запрета определяется максимальным временем запрета по i-той компоненте воздуха, т.е.

$$Tз \geq Tзi(max) \qquad (1.6.9)$$

При оценке концентрации радионуклидов в помещениях циклотронного комплекса принята кратность воздухообмена Ко = 10 об/ч.

Основные составляющие наведенной активности воздуха приведены в Таблице 6.

Из приведенных в Таблице 6 данных видно, что практический интерес для оценки наведенной активности воздуха представляют изотопы N, O и Ar , так как изотоп углерод-12 с большим периодом полураспада дает очень малый вклад в активность воздуха, а короткоживущие изотопы очень быстро распадаются и не представляют опасности для обслуживающего персонала.

При оценке активности воздуха в помещении циклотрона принята кратность воздухообмена Ко = 10. Приведенные в Таблице 6 данные показывают, что при длительной работе циклотрона в его помещении концентрация радионуклидов в воздухе будет превышать допустимые для персонала нормы и необходимо введение запретного времени для доступа в помещение. Однако, приведенная оценка является, в целом, приближённой. Это связано с тем, что сечения указанных в таблице реакций очень сильно зависят от энергии частиц и использование средних сечений даёт значительную погрешность в оценке. Реальные величины можно получить на основе данных измерений радиоактивности воздуха. Время запрета определяется по изотопу азот-13.

В Таблице 7 приведена оценка времени запрета в зависимости от времени облучения и кратности воздухообмена в камере ускорителя.

Таблица 7

Время облучения час	Время запрета Tz, мин			
	Ко = 10 1/ч	Ко = 15 1/ч	Ко = 20 1/ч	Ко = 25 1/ч
0.125	34.1	24.3	18.6	15.01
0.25	34.7	24.5	18.7	15.05
1.0	35.05	24.6	18.8	15.1
1.5	35.05	24.6	18.8	15.1
2.0	35.05	24.6	18.8	15.1
2.5	35.05	24.6	18.8	15.1

Как видно из результатов оценки равновесная концентрация активности воздуха наступает, практически, через полчаса работы ускорителя и, в дальнейшем, время запрета определяется только кратностью воздухообмена.

Концентрация радионуклидов в равновесном состоянии составляет (оценка по формуле 1.6.6) при Ко = 10, 1/ч

N-13 - 8.1E-3 мкКи/куб.м

N-16 - 4.02 мкКи/куб.м

Ar-41 - 4.36E-8 мкКи/куб.м

Эти данные можно использовать при расчёте выбросов в атмосферу. В связи с тем, что период полураспада изотопа N-16 составляет 7.5 сек при оценке выбросов в атмосферу его можно не учитывать.

1.7 Активация деталей циклотрона.

Активация деталей циклотрона происходит как за счет взаимодействия пучка ускоренных частиц с этими деталями, так и за счет взаимодействия нейтронного излучения со всем оборудованием в помещении. Кроме того, активации нейтронами подвергаются воздух помещения и защитные сооружения. Все активированные элементы становятся источниками гамма- и бета- излучений. При длительной работе циклотрона некоторые его узлы становятся источниками интенсивного излучения, которое необходимо учитывать при проведении

персоналом работ с этими узлами. Наибольшей активации подвергаются узлы и детали циклотрона, которые непосредственно подвергаются воздействию пучка ускоренных частиц - токоприемники, дефлектор, дуанты. Точная оценка активации деталей и узлов циклотрона расчетным путем затруднена из-за отсутствия реальных данных по потерям тока пучка в процессе ускорения, энергетического распределения частиц, плотности их потока и др. На основе опыта эксплуатации существующих циклотронов можно сказать, что мощность дозы гамма-излучения наведенной активности отдельных узлов циклотрона может в десятки превышать допустимый уровень. Это обстоятельство необходимо учитывать при проведении обслуживания циклотрона и ремонтно-профилактических работ. Для приближённой оценки активации различных элементов быстрым нейтронным излучением для i-того элемента материала сложного состава можно воспользоваться формулой:

$$Qi(R,t) = ni \cdot fi \cdot pi \cdot [1 - \exp(-\lambda i \cdot t)] \cdot \sigma i(E) \cdot \Phi(R,E) \qquad (1.7.1)$$

где: Qi(R,t) - удельная активность i-того нуклида в материале, расположенном в точке на расстоянии R от источника,

ni - ядерная плотность i-того изотопа в материале,
fi - содержание i-того нуклида в естественной смеси,
pi - содержание i-того элемента в материале,
λi - постоянная распада i-того нуклида,
t - время облучения,
σi(E) - дифференциальное сечение реакции образование i-того нуклида,
Φ(R,E) - плотность потока нейтронов в точке на расстоянии R от источника,
En - средняя энергия нейтронного спектра.

Для оценок достаточно использовать приближенное значение дифференциального сечения в виде:

$$\sigma i(E) = \sigma i(En) \qquad (1.7.2)$$

где: σi(En) - сечение реакции i-того изотопа для средней энергии спектра.

В этом случае формула (1.7.1) примет вид:

$$Qi(R,t) = pi \cdot fi \cdot ni \cdot [1 - \exp(-\mu i \cdot t)] \cdot \sigma i(E) \cdot \Phi(R) \qquad (1.7.3)$$

где: μi – коэффициент поглощения излучения активации в материале i-того элемента

В целом, для многоэлементного материала величина наведённой активности будет определяться формулой:

$$Q(R,t) = \sum_{i=1}^{n} Qi(R,t) \qquad (1.7.4)$$

где: n – число элементов в составе материала

В таблицах 8, 9 и 10 приведены физические параметры для ряда элементов, которые могут использоваться в конструкционных материалах. Под воздействием протонного пучка и нейтронного излучения происходит активация этих элементов за счёт реакций типа (p,n), (n,p) и (n,γ). Эти данные могут быть использованы при расчёте наведённой активности.

Таблица 8

Радио-нуклид	Реакция	Энергия,MeV		f,	ϕ,	ni, $*10^{20}$ 1/cm	δi(E) мбарн	λi, 1/c	Гi, Р*кв.м/мКи*ч
		бета	гамма	%	%				
25 Na	27 25 Al(p,2np)Na	3.7	0.4	100	10	17.1	0.07	1.3*E-2	18.1
27 Si	27 27 Al(pn) Si	1.59	0.511	100	3.4	17.1	O.3	1.2*E-3	5.09
26	27 26								

Si	Al(p2n) Si	2.94	0.8	100	31.8	17.1	4.0	5.0*E-3	8.60
52	52 52								
Mn	Cr(pn) Mn	2.47	0.09	83.8	< 0.3	2.3	105.0	4.4*E-3	0.44
56	56 56								
Co	Fe(pn) Co	0.75	0.84	91.7	3.8	8.4	9.0	7.4*E-5	8.42
57	58 57								
Ni	Ni(n2n) Ni	0.84	1.37	67.9	< 0.3	1.6	34.0	7.7*E-7	13.01
58	58 58								
Cu	Ni(pn) Cu	0.84	1.37	67.9	< 0.3	1.6	34.0	7.7*E-7	13.01
60	60 60								
Cu	Ni(pn) Cu	0.84	1.37	67.9	< 0.3	1.6	34.0	7.7*E-7	13.01

Таблица 9

Радио-нуклид	Реакция	Энергия,MeV		f,	Ф,	ni, 20 *10 1/кубст	δ(E),	λi, 1/с	Гi,
		бета	гамма	%	%		мбарн		Р*кв.м мКи*ч
16 N	16 16 O(np) N	4.77	6.14	99.8	51.4	89.0	90.0	9.3*E-2	16.83
24 Na	24 24 Mg(np) Na	1.39	0.47 1.37 2.75	78.7	0.9	4.0	1.2	1.3*E-5	19.06
27 Mg	27 27 Al(np) Mg	1.59	0.84	100	3.4	17.1	0.3	1.2*E-3	5.09
28 Al	28 28 Si(np) Al	2.87	1.78	92.2	31.8	142.4	4.0	5.0*E-3	8.60
56 Mn	56 56 Fe(np) Mn	0.75	0.84	91.7	3.8	8.4	9.0	7.4*E-5	8.42
52 V	52 52 Cr(np) V	2.47	0.09	83.8	0.3	2.3	105.0	4.4*E-3	0.44
53 V	53 53 Cr(np)V	2.53	1.00	9.6	0.3	0.2	40.0	8.3*E-3	1.29
57 Ni	58 57 Ni(n2n) Ni	0.84	1.37	67.9	0.3	1.6	34.0	7.7*E-7	13.01
57 Ni		0.67	1.36	67.8	86	1.6	7.0	7.5*E-3	13.05

Таблица 10

Радио-нуклид	Реакция	Энергия,MeV		f,	ф,	ni, 10^{19} *1O 1/cm	b(E), мбарн	i, 1/c	Гi, Р*кв.м мКи*ч
		бета	гамма	%	%				
28 Al	27 28 Al(nγ) Al	1.59	O.84	OO	3.4	17.1	O.3	1.2*E-3	5.O9
52 Mn	52 52 Cr(nγ) Mn	2.47	O.O9	83.8	< O.3	2.3	1O5.O	4.4*E-3	O.44
56 Co	56 56 Fe(nγ) Co	O.75	O.84	91.7	3.8	8.4	9.O	7.4*E-5	8.42
57 Ni	58 57 Ni(nγ) Ni	O.84	1.37	67.9	< O.3	1.6	34.O	7.7*E-7	13.O1
60 Cu	60 60 Ni(nγ) Cu	O.84	1.37	67.9	< O.3	1.6	34.O	7.7*E-7	13.O1

Плотность потока быстрых нейтронов в точке с координатой R с учетом геометрического фактора и фактора ослабления нейтронов в слое материала защиты определяется формулой:

$$\Phi(R) = [\Phi o/(R^2)]\bullet\exp(-d/L) \qquad (1.7.5)$$

где: Фо - выход нейтронов, н·м²/(с·см²)
d - толщина слоя защиты, см
L - длина релаксации, см
R - расстояние от источника до точки, м.

В таблицах 8, 9 и 10 приведены основные ядерно-физические константы реакций активации для ряда элементов, входящих в состав конструкционных материалов оборудования циклотрона и радиационной защиты.

При оценке активации оборудования необходимо учитывать также и тепловые нейтроны, поскольку сечение, активации для этих нейтронов имеет значительно большую величину. Удельная активация тепловыми нейтронами определяется формулой:

$$Qitherm(R,t) = \Phi therm\,(R)\bullet\sigma(therm)i\bullet ni\bullet fi\bullet pi\bullet[1 - \exp(-\mu it\bullet t)] \qquad (1.7.6)$$

где: Фtherm(R) - плотность потока тепловых нейтронов в точке с координатой R,
b(therm)i - сечение активации i-того изотопа тепловыми нейтронами,
ni,pi,fi - определены в формуле (1.7.1),
μit - сечение поглощения тепловых нейтронов в материале

Плотность потока тепловых нейтронов в камере циклотрона можно оценить по эмпирической формуле [20]:

$$\Phi т = 1.2\cdot\Phi o/S \qquad (1.7.7)$$

где: Фо - выход быстрых нейтронов из мишени ускорителя, н/сек
S - внутренняя поверхность бетонной защиты, кв. м.

Точный расчёт мощности дозы гамма-излучения наведённой активности в помещении циклотрона при проектировании комплекса затруднён из-за многих факторов. К ним, в частности, относятся сложное пространственное распределение источников гамма-излучения, меняющееся во времени, а также ряд других факторов. По возможности следует учитывать данные по наведённой активности на ускорителях, близких по энергии к проектируемой установке. Спектр гамма-излучения наведённой активности сложный и зависит от времени, что связано с различием периодов полураспада различных элементов, входящих в состав конструкционных материалов. Для расчета защиты от наведённой активности основных конструкционных материалов (Fe, Cu) можно сложный спектр заменить эффективной моноэнергетической линией 1,2 Мэв [13].

В работе [11] приведены основные соотношения для расчёта удельной активности. Число радиоактивных ядер Ni i-того изотопа в 1 грамме элемента j с атомным весом Aj связано с сечением образования $\sigma_{i,j}$ и плотностью потока частиц Ф, (т.е. нейтронов в данном случае), следующим соотношением (активность в единицах Кюри/кг) :

$$Qi = \frac{1}{3.7 \cdot 10^{10}} \cdot Na \cdot \Phi \frac{\sigma i,j}{Aj} \cdot (1 - e^{-\lambda i t}) \cdot e^{-\lambda i \tau} \qquad (1.7.8)$$

где Na - число Авогадро
λi - постоянная распада i-того изотопа
τ - время распада
t - время облучения

Расчёт активации деталей и узлов циклотрона, а также системы транспортировки пучка и узла мишени будет произведён в процессе разработки циклотрона.

По результатам оценки мощности дозы активированного ионопровода (для изотопа алюминий-27) запретное время для мощности дозы 6 мкГр/с на расстоянии 10 см от поверхности ионопровода составляет 67 секунд .

Приближённую оценку мощности дозы активации внутренней поверхности циклотрона можно провести с использованием геометрии не поглощающего цилиндра [24], исходя из предположения о равномерных потерях тока ускоренных частиц. Величина этих потерь по оценке специалистов составляет примерно 5% тока ускоряемых частиц.

Диаметр камеры - 190 см, высота камеры - 20 см. Толщина стенки камеры - 2 см.

Оценка активации производится для алюминия-27, поскольку внутренняя часть дуантов покрыта листовым алюминием, который полностью поглощает потери ускоряемых частиц.

Мощность дозы в точке за боковой поверхностью камеры по центру высоты (т.е. в плоскости ускорения частиц) определяется по формуле:

$$P_{s\gamma} = \frac{Sv \cdot h}{2} \cdot \varphi a\left(\frac{h}{2R}\right) \exp(-t \cdot \mu), \text{ мкГр/ч} \qquad (1.7.9)$$

где: Sv - мощность объёмного источника, 1/см³·с,
hк - высота центра камеры, см,
φa - геометрическая функция, определяемая по формуле (1.7.10)
R - радиус камеры циклотрона, см
t - толщина стенки камеры циклотрона, см.
μ - коэффициент поглощения γ-излучения, 1/см.

Функция φa определяется формулой [24]:

$$\varphi a = 0.5[1 + \ln(0.5(1 + SQR(1+4(R/h)^2))] + 2R/h - SQR(1+4(R/h)^2) \qquad (1.7.10)$$

Эта функция имеет табулированные значения для различных величин R/h (таблица 4.4.3 [24]).

Мощность дозы в плоскости перпендикулярной плоскости ускорения (без учёта поглощения боковыми стенками камеры циклотрона) определяется формулой:

$$P_{h\gamma} = 0.25Sv\{(hk+a)[\ln(1+R^2/(hk+a)^2) + (2R/(hk+a))arctg((hk+a)/R) - -a[\ln(1+R^2/a^2) + (2R/a)arctg(a/R)]\}, \text{ мкГр/ч} \qquad (1.7.11)$$

где: a – высота расчётной точки относительно центра камеры, см

Расчёт мощности дозы $P_{s\gamma}$ и $P_{h\gamma}$ в режиме насыщения (т.е. время работы циклотрона значительно больше времени полураспада изотопа активации) проведённый по формулам 1.7.9 и 1.7.11 на момент остановки циклотрона и, соответственно время запрета Tзh и Tзs показали, что максимальное время запрета по активации дуантов циклотрона не превышает 5 мин. Таким образом эта активация практически не имеет значения при эксплуатации циклотрона.

Активация мишени.

Активация мишенного узла представляет основную проблему при работе циклотрона, т.к. на мишени высаживается весь пучок ускоренных частиц (за исключением незначительных потерь в ионопроводе). Мишенное устройство представляет собой комбинированное чередование слоёв материалов: 20-50 мкм Ti (фольга), слой He, 20-50 мкм Ti (фольга), 10 мм Ta. Материал Ti состоит из природной смеси изотопов. Ниже приведены возможные реакции на Ti и Ta их характеристики [25].

Таблица 11

Содержание в естественной смеси, %	Реакция	Тип превращения	Период полураспада	Сопутствующее γ-излучение, МэВ (выход на распад %)
^{46}Ti – 7.3	^{46}Ti(p,α)^{43}Sc	β+	3.95 ч	0.37 (160) 0.511 (180) 0.627 (40)
^{47}Ti - 7.8	^{47}Ti(p,α)^{44m}Sc	β+	52 ч	0.269 (87)
^{47}Ti - 7.8	^{47}Ti(p,α)^{44}Sc	β+	3.9 ч	0.511 (180) 1.160 (100)
^{48}Ti - 73	^{48}Ti(p,n) ^{48}V	β+	16.2 дн	0.511 (180) 0.983 (100) 1.330 (100)
^{49}Ti - 5.5	^{49}Ti(p,2n) ^{48}V	β+	16.2 дн	- " -
^{49}Ti - 5.5	^{49}Ti(p,α)^{46}Sc	β-	84 дн	0.900 (100) 1.120 (100)
^{50}Ti - 5.5	^{50}Ti(p,α)^{47}Sc	β-	3.45 дн	0.159 (73.5)
^{50}Ti - 5.5	^{50}Ti(p,2np)^{48}Sc	β-	43.3 ч	0.990 (100) 1.037 (100)
^{181}Ta – 99.98	^{181}Ta(p,n)^{181}W	α	145 дн	-

Из выше приведённых реакций наибольшую вероятность имеет реакция ^{48}Ti (p,n) ^{48}V, поскольку имеет наименьший энергетический порог.

Плотность Ti составляет $\rho ti = 4.54$ г/см³, Ta - $\rho ta = 16.6$ г/см³.

Для определения выхода нейтронов из Ti фольги можно воспользоваться экспериментальным выходом нейтронов, принятым за основу расчёта радиационной защиты, т.е. $Yp = 3.5 \cdot 10^{12}$ н/сек. В этом случае выход нейтронов из фольги будет пропорционален отношению толщины фольги к длине пробега протонов в толстом слое материала мишени, т.е.

$$Y\phi = Yp \cdot (T\phi / Rp) \qquad (1.7.12)$$

где: Tф – суммарная толщина фольги, мм,
Rp – пробег протонов в материале мишени, мм.

Максимальный пробег протонов для некоторых элементов приведён в работе [12]. Как показали экспериментальные исследования [9] пробег протонов в массовых единицах (г/см²) в диапазоне энергий до 95 МэВ по отношению к пробегу в алюминии практически стабильно определяется коэффициентом 1.2. Таким образом пробег Rp в Ti для энергии 18 МэВ можно приближённо определить величиной $1.2 \cdot Ral/\rho_{ti}$, т.е. $1.2 \cdot 0.4766/4.64 = 0.123$ см.

Расчётная мощность дозы гамма-излучения на расстоянии 10 см от мишени по реакции (nγ) после 6 часов работы циклотрона с пучком протонов (по формуле 1.7.1) составляет 0.25 мкГр/ч. С учётом достаточно большого периода полураспада элемента ^{48}V (16.2 дн) при систематической работе циклотрона будет происходить постепенное повышение мощности дозы наведённой активности.

При организации ремонтно-профилактических работ следует проводить предварительный дозиметрический контроль в местах повышенного уровня наведённой радиации с тем, чтобы определить допустимое время проведения таких работ.

1.8 Мероприятия по обеспечению радиационной безопасности

1.8.1 В настоящем проекте предусмотрены следующие архитектурно-строительные решения, технические и организационные мероприятия, которые обеспечивают радиационную безопасность эксплуатационного персонала ПЭТ-центра при работе ЦК с пучком и облучением мишеней.

1.8.2 Радиационная защита

При работе ЦК СС18/9М в режиме облучения мишеней штатная (существующие ограждающие железобетонные конструкции) радиационная защита, предусмотренная ранее для циклотрона МГЦ–20, помещений № 001, 002, 008 не может обеспечивать требуемые допустимые значения эквивалентной дозы излучений для нового циклотрона. Для обеспечения допустимых значений эквивалентной мощности дозы на наружных поверхностях ограждающих радиационно-защитных конструкциях помещения № 001 циклотронного зала и смежных с ним помещениям, как по вертикали, так и по горизонтали предусматриваются следующие архитектурно-строительные решения. Для ослабления нейтронного излучения до требуемого значения в направлении от дальних мишеней через лобовую стенку (ось № 132) рекомендуется увеличить ее толщину до 2150 мм, т.е. дополнительно забетонировать слой в 650 мм. Для снижения до допустимого значения мощности дозы на наружной поверхности стен по оси № 207 и вдоль оси 129 цокольной части стен, примыкающих к отмостке устраивается дополнительная набетонка (утолщение стены на 800 мм) на глубину 2500 мм от уровня верхней поверхности отмостки.

Монтажный проем, расположенный над основным электромагнитом (с ускоряющей структурой внутри вакуумной камеры) и примыкающими к нему ближними мишенями, должен перекрываться четырьмя рядами железобетонных балок (сечением 400х500 мм и длиной 6500 мм), которые формируют суммарную толщину железобетонного перекрытия в 2000 мм, что обеспечивает требуемую радиационную защиту и герметичность циклотронного зала при условии, когда балки укладываются со смещением в поперечном сечении относительно друг друга, что исключает образование прямых щелей.

Для обеспечения над железобетонным перекрытием циклотронного зала в районе дальних мишеней допустимых значений мощности дозы на пол помещения № 100 укладываются в ряд железобетонные балки (с сечением каждой 300х300 мм) от монтажного проема до оси № 131+1500 мм (до въездных ворот).

Для обеспечения допустимого значения эквивалентной дозы на уровне не более 1,2 мкЗв/ч на лестничной клетке (оси 205÷206) и в коридоре эваковыхода на I этаж целесообразно вход (на отм. -3.100) с лестничной клетки в коридор № 009 забетонировать на глубину 1400 мм.

В связи с тем, что коридор пом.№ 009 прямолинеен провести ослабление нейтронного излучения до требуемого значения с помощью 2-х радиационно-защитных дверей, установленных на выходе из циклотронного зала (ось 206) и на входе (ось 205) в помещение № 008 (систем питания) теоретически возможно, но установить радиационно-защитные двери из NEUTROSTOP (с толщиной ~ 400 мм), облицованных свинцом, очень дорого и технически сложно при монтаже в условиях высокой стесненности.

Снизить нейтронное излучение до допустимых значений в помещении систем питания рекомендуется путем устройства дополнительной железобетонной преграды (стенки толщиной 800 мм и длиной 3500 мм), облицованной изнутри коридора «кирпичами» NEUTROSTOP типа СО в четыре слоя, что дает суммарную толщину полиэтилена – 160 мм. Облицовка изнутри дополнительно железобетонной стенки производится после проведения такелажных работ по транспортировке по коридору всех стоек из помещения циклотронного зала в помещение систем питания.

Устройство дополнительной перегородки трансформирует коридор в одноколенный лабиринт, который в сочетании с двумя радиационно-защитными откатными дверями отсекает циклотронный зал со стороны ближних мишеней от помещения систем питания.

Для снижения нейтронного излучения, распространяющегося через коридор, дверь выхода из циклотронного зала выполняется из NEUTROSTOP («кирпичи» СО) в четыре слоя, образующих толщину 160 мм, а для ослабления гамма-излучения дверь изнутри (со стороны циклотронного зала) облицовывается листовой сталью Ст.10 (толщиной 10 мм) с минимальным содержанием примесей по отношению к Fe. Двери, ограждающие доступ персонала в помещение циклотронного зала через одноколенный и многоколенный лабиринт, одинаковы по своему конструктивному исполнению, в частности в сечении они представляют собой сэндвич, состоящий из: 80 мм – NEUTROSTOP и облицовка с обеих сторон – сталь листовая толщиной 5 мм.

Все три откатные радиационно-защитные двери (с высотой чистого проема $\leq$ 2100 мм) из NEUTROSTOP должны иметь притворы (вертикальные и горизонтальные (H=300мм) над дверью), которые исключают образование прямых сквозных щелей.

Вертикальные притворы и горизонтальные перемычки (стенки) над откатными дверями соответствуют в сечении по толщине и конструктивному исполнению дверным полотнам.

ВЧ-фидер трассируется к циклотрону от ВЧ-генератора по коридору над откатными дверями на подвесах. Над дверьми ВЧ-фидер прокладывается через «косые» (под углом) гильзованные круглые проходки, которые после прокладки ВЧ-фидера заполняются полиэтиленовой стружкой.

Двери: вход в зумпфовую и в помещение систем питания, являются радиационно-защитными и идентичны по конструктивному исполнению, выполняются распашными, с дверным полотном толщиной 10 мм из «черной» стали.

Для предотвращения (ослабления) нейтронного излучения кабельные подвесные лотки в коридоре пом. № 009 исключаются из применения, а сильноточные и высоковольтные кабели, трассируемые из помещения систем питания по коридору, прокладываются в каналах (сечением 400х250 мм), предусмотренных в железобетонном полу.

После прокладки кабелей в каналах в районах дверных проемов кабели накрываются мешочками, наполненными полиэтиленовыми шариками и свинцовой дробью, а затем каналы накрываются крышками (толщиной не менее 5 мм) из рифленой стали.

«Косые» проходки для прокладки слаботочных кабелей управления и трубопроводов (после их прокладки), трассируемые из помещения систем питания в многоканальный лабиринт циклотронного зала, уплотняются полиэтиленовыми канатиками и стружкой.

При работе циклотрона на ближние мишени последние накрываются транспортабельной нейтронной ловушкой, которая по опорным направляющим, расположенным в железобетонном полу, передвигается вплотную к наружной поверхности электромагнита. Нейтронная ловушка, выполненная из NEUTROSTOP, и внутренняя несущая конструкция – из «черных» стальных листов толщиной 20 мм ослабляет нейтронное излучение в 10^3 раз. Такое ослабление возможно при условии, когда лобовая стенка и крышка ловушки по полиэтилену составляет 240 мм, а боковые стенки по толщине не менее 160 мм.

В связи с отсутствием данных по конструктивному исполнению проходки через железобетонную стену по оси № 207 для воздуховода системы вытяжной вентиляции рекомендуется в углу (район пересечения осей № 207 и 129) установить дополнительно локальную стенку толщиной 240 мм из NEUTROSTOP, защищающую выходной воздуховод от нейтронного излучения.

Для устройства дополнительной радиационной защиты ориентировочно потребуется:

– «кирпичей» CO NEUTROSTOP – 2800 шт. (~ 4,0 м^3; 3,68 т);

– железобетонных окантованных металлическим угольником балок (размерами Ш × Д × В = 400 × 500 × 6500 мм, плотность бетона – 2,35 г/см^2) – 71 шт.;

– железобетонных окантованных металлическим угольником балок (размерами Ш × Д × В = 300 × 300 × 6500 мм, плотность бетона – 2,35 г/см^2) – 24 шт.;

– монолитного железобетона в объеме ~ 58 м^3;

– листовой стали (различной толщины) ~ 3,2 т.

1.8.3 Инженерные системы, обеспечивающие радиационную безопасность.

Основными системами, обеспечивающими безопасность эксплуатационного персонала циклотронного комплекса, являются:

– системы приточно-вытяжной вентиляции и локальных отсосов воздуха в зонах облучения мишеней;

– системы блокировки и сигнализации;

– система радиационного контроля нейтронного излучения;

– система радиационного контроля гамма–излучения;

– система автоматической сигнализации обнаружения пожара.

Все перечисленные инженерные системы взаимосвязаны между собой и подключаются к штатной системе блокировки-сигнализации (УБС) циклотронного комплекса, которая при срабатывании любой из перечисленных систем отключает контактор ЦК.

Системы вентиляции укрупненно обеспечивают:

– полное удаление из циклотронного зала продуктов активации воздуха в течение запретного периода по входу после отключения ЦК;

– разряжение в помещении № 001 на уровне не менее 50Па, что исключает проникновение в другие помещения продуктов активации воздуха;

– отсос озона из зон расположения мишеней;

– очистку воздуха при его удалении через «выхлопную» трубу высотой 32 м, что обеспечивает весьма малую концентрацию Азота-13 в приземном слое атмосферы вокруг лабораторного корпуса.

Система блокировки и сигнализации, взаимосвязанная с системами радиационного контроля, многократно дублирующая работу устройств блокировки полностью обеспечивает защиту персонала и контролирует радиационную обстановку при эксплуатации циклотрона и возникновении нештатных ситуаций (полное описание системы приведено в Разделе 1.9).

Радиационная обстановка по уровням гамма и нейтронного излучения контролируется во всех помещениях ЦК. При превышении верхнего аварийного порога по уровням нейтронного и гамма–излучения ЦК отключается. Срабатывание любого устройства блокировки приводит к остановке работы циклотрона в режиме излучения.

Двери, ограничивающие доступ в помещения ЦК, разблокируются при выполнении следующих условий:

– отключение ЦК;

– истечение запретного периода;

– снижения уровней излучений ниже допустимых значений.

При срабатывании системы обнаружения пожара ЦК вентиляционные системы отключаются, а огнезащитные клапана, отсекающие поступление воздуха, закрываются.

1.8.4 Радиационный контроль

При облучении мишеней штатные (стационарные) системы радиационного контроля ЦК проводят постоянный мониторинг текущих значений мощностей эквивалентной дозы нейтронного и гамма-излучения в помещениях № 001, 008, 112 и в пультовой. Вся информация о текущих уровнях нейтронного и гамма-излучения может быть получена с основного компьютера управления ЦК и постоянно отображается.

Индивидуальный дозиметрический контроль персонала и периодический оперативный контроль за уровнями нейтронного и гамма-излучения на наружных поверхностях защиты, на

рабочих местах персонала группы А, в помещениях смежных по вертикали и горизонтали с помещениями циклотронного зала производится штатной (существующей) службой радиационной безопасности (СРБ) предприятия НИИТФА в соответствии с «Программой производственного радиационного контроля», разрабатываемой СРБ предприятия совместно с разработчиками циклотронного комплекса при проведении пуско-наладочных работ.

1.9 Система блокировки, сигнализации и радиационного контроля (СБСР)

1.9.1 Назначение СБСР

Система СБСР предназначена как для обеспечения безопасной и безаварийной эксплуатации ЦК, так и для постоянного мониторинга радиационной обстановки в помещениях № 001, 002, 005, 007, 008, 009, 112, 201, в которых размещается электрофизическое оборудование ЦК и мишенных устройств.

1.9.2 Функциональная структура СБСР

Разработанная система СБСР конструктивно и функционально соответствует требованиям СанПиН.2.6.1.2573-10.

СБСР ЦК функционально обеспечивает как предупреждение, блокировку возникновения нештатных предаварийных ситуаций, так и постоянный мониторинг (радиационный контроль) уровней нейтронного и гамма-излучения в помещениях ЦК № 001, 002, 005, 007, 008, 009, 112, 201.

Система СБСР состоит из 3-х подсистем:

- блокировки и сигнализации;
- радиационного контроля нейтронного излучения;
- радиационного контроля гамма–излучения.

Подсистемы СБСР взаимосвязаны между собой как аппаратно, так и программно.

Система СБСР также взаимосвязана с системами приточно-вытяжной вентиляции и обнаружения пожара.

При срабатывании любого устройства блокировки, воздушных реле потока (сигнализирующих о работе вентиляции) и любого из датчиков обнаружения пожара система управления ЦК отключает контактор электросилового питания циклотрона.

Отключение и/или запрещение включения циклотрона осуществляется СБСР при следующих условиях, если:

- не включены или не работают системы приточной и вытяжной вентиляции циклотронного зала;
- не проведен круговой осмотр (не включены все кнопки осмотра) циклотронного зала;
- не работает (не включен) звуковой оповещатель, сигнализирующий о необходимости покинуть помещение;
- не работает (выключен) световой оповещатель, предупреждающий о необходимости покинуть помещение;
- не закрыты радиационно-защитные двери (5 шт.) циклотронного зала, зумпфовой и помещения систем питания;
- не работают кнопки аварийной остановки ЦК и открытия изнутри радиационно-защитных дверей (5 шт.);
- не включены ключом электромагнитные замки радиационно-защитных дверей;
- не включены подсистемы радиационного контроля;
- превышен уровень нейтронного и гамма-излучения в помещениях (циклотронном зале, систем питания, № 100) выше заданного максимально-допустимого значения (верхнего порога).

Основные входные радиационно-защитные двери, ограничивающие вход в циклотронный зал из помещения систем питания, блокируются по двум пороговым значениям, как для нейтронного излучения, так и для гамма-излучения.

Верхний порог срабатывания свидетельствует о предпосылках возникновения аварийной ситуации, т.е. о превышении максимальной мощности эквивалентной дозы излучения более чем в 2 раза (значение коэффициента запаса).

Нижний порог – это параметры излучения, имеющего место при номинальном режиме работы циклотрона.

После штатного или нештатного отключения циклотрона основные входные радиационно-защитные двери, обеспечивающие доступ (вход) в циклотронный зал открываются с 30-минутной задержкой (время запретного периода, за которое из циклотронного удаляется озон и окислы азота).

В процессе работы ЦК текущие значения нейтронного и гамма-излучений отображаются на цифровых табло, а при достижении пороговых значений светофоры (устройства световой сигнализации) сигнализируют красным и оранжевым светом о достижении соответственно верхнего и нижнего порога излучений.

1.9.3 Устройство СБСР

Блочный состав и месторасположение технических средств, структурная электрическая схема системы СБСР, состоящей из 3-х подсистем (блокировки и сигнализации, радиационного контроля нейтронного излучения, радиационного контроля гамма-излучения), приведена на чертеже (Рис. 1).

Состав, месторасположение блоков и структурная электрическая схема подсистемы радиационного контроля нейтронного излучения, обеспечивающей измерение, отображение (сигнализацию о достижении пороговых уровней) и регистрацию значений мощности дозы или плотности потока (флюенса) нейтронного излучения в 3-х помещениях: № 100, 008, 001 (в помещении № 001 устанавливаются два блока детектирования), приведен на чертеже (Рис.2).

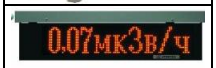
Подсистема радиационного контроля гамма-излучения, состав и электрическая структурная схема которой представлена на Рис. 3, обеспечивает в 7-и помещениях (№ 001, 001[1], 005, 008, 007, 100, 201) измерение, отображение, сигнализацию о достижении 2-х пороговых уровней, программное архивирование результатов измерения мощности дозы гамма-излучения.

Месторасположение щитов сигнализации, блоков детектирования, устройств сигнализации и технических средств системы СБСР и ее подсистем приведено на чертежах (Рис. 4, 5,6).

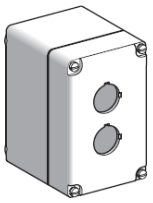
Перечень основных покупных компонентов, приборов, датчиков и оборудования системы СБСР приведен в Таблице 12.

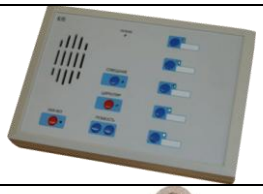
Таблица 12

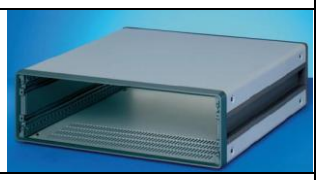
Наименование	Куда входит	Кол-во	Производитель	Рисунок или фото.
1	2	3	4	5
Пульт управления ПУ-АТ900	Подсистема радиационного контроля	2	АТОМТЕХ	
БДКН-04 Блок детектирования нейтронного излучения		4		

Наименование	Куда входит	Кол-во	Производитель	Рисунок или фото.
1	2	3	4	5
БДКГ-02 Блок детектирования гамма излучения		7		
Устройство сигнализации УС-АТ991		11		
Табло электронное информационное ТЭИ-АТ		7		
Адаптер интерфейсный USB-COMi-SI-M		4		
Коммутаторы, кабели связи и т.д.				
Источник бесперебойного питания БИРП-12/2,5 с аккумуляторными батареями		4	www.k-eng.ru	
Адаптер сигналов DL и WL		11		
Программное обеспечение Измерителя-сигнализатора и табло электронное.		2		
Промышленный компьютер Advantix		1		

1	2	3	4	5
Пост звуковой сигнализации ПСВ-С-73 ХЛ-1	Щит сигнализации	4	ЗАО «Новочебоксарский электромеханический завод»	
Оповещатель световой ExОППС-1В-ПМ-А-З-К		4	Научно–производственная компания «Эталон»	

Наименование		Куда входит	Кол-во	Производитель	Рисунок или фото.
1		2	3	4	5
Кнопки (авар. ост. и осм. помещ.) и корпус для них 9001KY2		6		Schneider Electric	
Металлоконструкции щита, провода, разъемы					
Табло световое Universal BS-140-1x9(24 В)	Оборудование двери	7		www.belysvet.com	
Электромагнитный замок AL-200FB 24 VDC		5		www.alerlock.ru	
ВК-300-БР-11-67У2-11 Выключатель концевой		5			
Кнопки (откр. и закр. двери) и корпус для них 9105.210		5		Schneider Electric, Rittal	
Ключ управлением замком 9001KS11K3R с контактами.		5		Schneider Electric	
коробка клеммная 1521.010 с комплектом доп. крепежа и др. металлоконструкциями.		5		RITTAL	
Металлоконструкции оборудования, провода, разъемы, клеммы		5			

1	2	3	4	5
ДР-П Реле потока воздуха		4	ООО «Торговый дом «Энергосервис»	
Переговорное устройство, в составе:		1		
Центральный пульт переговорного устройства ПД-5Ц		1	www.commteh.ru	
Колонка переговорная ПЦС-3М	Щит сигнализации	4		
Кабели связи, разъемы и т.д.				
клемма 279-501	Щит управления системой	200	WAGO	
Реле 857-304		50		
Реле 59.54		20	FINDER	
CPM704 Контроллер узла сети PROFIBUS DP-V1.		1	FASTWAL	
DIM762 Модуль дискретного ввода		15		
DIM718 модуль дискретного вывода		5		
OM752 Оконечный модуль.		1		
Одноканальный блок питания RPL2410W-S		1	MICHAEL RIEDEL	
Источник бесперебойного питания RDCUSV 40D		1		
Одноканальный блок питания RPL2405W		1		
Блок питания с управляемым выходным напряжением D-IPC 250C		1	Deutronic	
Световые индикаторы			Schneider Electric	
Кнопки				
Металлоконструкции щита			RITTAL	
Клеммы и аксессуары к ним, разъемы, провода и т.д.				

1	2	3	4	5
CPM704 Контроллер узла сети PROFIBUS DP-V1.	Дополнительный щит управления системой	1	FASTWAL	
DIM762 Модуль дискретного ввода		5		
DIM718 модуль дискретного вывода		4		
OM752 Оконечный модуль				
Одноканальный блок питания RPL2410W-S		1	MICHAEL RIEDEL	
Источник бесперебойного питания RDCUSV 40D		1		
Металлоконструкции щита			RITTAL	
Клеммы и аксессуары к ним, разъемы, кнопки, провода и т.д.			WAGO	
Кнопка авар. остановки и командный ключ	Блок аварийного управления		Schneider Electric	
Корпус compacPRO 2U 42HP 271D № по каталогу 14575-023 с комплектом доп. крепежа и др. металлоконструкциями.		1	Schroff	
Металлические шильды на клеевой основе.				
Металлорукав МРПИ		1 км	Техэлектро	
Кабели связи		2 км		
Маркировка кабелей и проводов				
Провода,разъемы, клеммы и т.д.				
Инструмент и оборудование для монтажа системы, маркировки проводов и кабелей				

Для контроля функционирования систем проточной и вытяжной вентиляции $В_{001}$, $П_{001}$, $В_{008}$, $П_{008}$ в напорно-вытяжные воздуховоды устанавливаются реле протока, сигнализирующие о работе вентиляционных систем в штатном режиме.

Каждая из 5-и радиационно-защитных дверей, ограничивающих во время работы ЦК в штатном режиме доступ персонала в помещения № 001, 005, 002, 008, 009, оборудована следующими техническими средствами:

- выключатель концевой (установлен на полотне двери);
- электромагнитный замок;
- кнопка открытия двери (установлена изнутри и обеспечивает беспрепятственное открытие двери для аварийного выхода персонала);
- кнопка закрытия двери (установлена изнутри);

– «ключ-переключатель» управления электромагнитным замком (установлен снаружи, служит для включения-выключения с помощью механического ключа, вставляемого в личину переключателя);

– табло световое «Опасно! Радиация!» (устанавливается снаружи над дверью и включается о закрытии двери изнутри с помощью кнопки);

– устройство светозвуковой сигнализации УС-АТ991, которое входит в состав соответствующей подсистемы радиационного контроля и обеспечивает цветным (красным, оранжевым, зеленым) светофором отображение уровней излучения, устанавливается над дверью.

В радиационно-опасных помещениях № 001, 008, 100, где временно работает персонал группы «А», осуществляющий эксплуатацию, ТО и планово-предупредительный ремонт ЦК, устанавливается щит сигнализации, технические средства которого позволяют оператору ЦК провести полный комплекс мероприятий по осмотру помещений.

Щит сигнализации включает в себя:

– кнопку остановки работы циклотрона;

– кнопку осмотра (включаемую после осмотра всех частей помещения);

– оповещатель световой;

– сирену.

Для стационарного мониторинга радиационной обстановки в составе подсистем радиационного контроля устанавливаются в помещениях:

– 4-е блока детектирования БДКН-04, обеспечивающих измерение мощности дозы нейтронного излучения в диапазоне от 0,1 мкЗв/ч до 10 мЗв/ч или плотность потока нейтронов от 0,1 до 104 н/см^2·с;

– 7 блоков детектирования БДКГ-02, обеспечивающих измерение мощности дозы гамма-излучения в диапазоне от 0,1 мкЗв/ч до 10 Зв/ч.

Сигналы от блоков детектирования через коммутатор поступают в микропроцессорный пульт управления ПУ-АТ900 (контроллер), который преобразует сигнал в физическую величину и формирует сигналы о достижении пороговых уровней. Кроме того, контроллер проводит архивирование измеряемых параметров с указанием времени и даты нейтронного излучения. Вся информация с пультов управления по интерфейсу RS 485 передается в ПЭВМ подсистемы радиационного контроля, которая формирует для центральной ПЭВМ ЦК сигналы об аварийных порогах излучения.

Устройства сигнализации АТ-991 подключаются через адаптер интерфейсный к пульту управления АТ-900 и обеспечивают звуковую и двухуровневую световую сигнализацию:

– нормальное состояние – звука нет, зеленый светофор горит (излучение отсутствует);

– индикация превышения рабочего порога излучения – прерывистый звук, включается желтый светофор;

– индикация превышения аварийного порога – прерывистый звук, включается красный светофор;

– состояние окончания инициализации и отсутствие управляющих сигналов – звука нет, прерывистый режим индикации зеленого света.

Для визуального отображения в составе подсистем радиационного контроля параметров излучений в помещениях № 008 (систем питания), 201 (пультовая) устанавливаются соответственно два и пять штук табло электронных информационных типа ТЭИ-АТ, которые через коммутатор и адаптер подключаются к пульту управления АТ-900.

Все сигналы с технических средств блокировки и сигнализации поступают в контроллеры (с релейной логикой) СРМ704 узла сети FASTWEL, размещенные в центральном щите управления системы СБСР, расположенном в помещении № 008 (систем питания).

Аппаратура центрального щита управления СБСР формирует суммарные сигналы в виде «сухой контакт», которые передаются:

– в цепь управления ВЧ-генератора;

– в цепь управления силовым контактором циклотрона;

– в центральную систему управления ЦК.

В помещении № 201 (пультовой), где находится центральная система управления ЦК и ПЭВМ системы СБСР, также размещаются:

– центральный пульт переговорного устройства, обеспечивающий связь с помещениями № 001, 008, 100;

– блок аварийного управления, который включает кнопку оперативной аварийной остановки ЦК и главный командный «ключ-переключатель» (поворот механического ключа снимает запрет на включение циклотрона при условии выполнения осмотра и включения этим же механическим ключом остальных «ключ-переключателей» радиационно-защитных дверей);

– ПЭВМ подсистем радиационного контроля;

– пять цифровых табло, отображающих текущие значения параметров нейтронного и гамма-излучения в радиационно-опасных помещениях;

– блок детектирования БДКГ-02 и устройство светозвуковой сигнализации АТ-900, обеспечивающие контроль уровня гамма-излучения в пультовой, где на постоянной основе при штатной работе ЦК пребывают операторы – персонал группы «А».

1.9.4 Работа системы СБСР

Алгоритм работы системы задаётся релейной автоматикой и программой логического контроллера CPM704. Более важные цепи системы, такие как кнопка аварийного отключения или срабатывание концевых выключателей радиационно-защитных дверей, блокируют режим включения циклотрона путём срабатывания релейной автоматики.

Менее важные цепи, такие как кнопки осмотра помещений или включение оповещателей, управляются через контроллер. Тем не менее, все сигналы, приходящие на центральный щит управления системы СБСР, заводятся в контроллер для передачи их по шине PROFIBUS в систему управления циклотрона.

Функциональные действия (последовательность операций) оператора перед включением циклотрона:

– исходное положение – все 5 дверей радиационно-опасных помещений № 001, 005, 002, 008, 009 открыты;

– оператор входит в дверь многоколенного лабиринта в помещение циклотронного зала и закрывает её кнопкой включения электромагнитного замка (при этом световое табло АТ-991 снаружи загорается);

– оператор производит осмотр помещения циклотронного зала;

– после завершения осмотра нажимает на 2-х щитах сигнализации кнопку осмотра (после этого подаётся сигнал сирены, включается световой оповещатель);

– затем, выходя из циклотронного зала в коридор, оператор закрывает радиационную дверь с помощью механического ключа, подающего питание на электромагнитный замок, двигаясь по коридору, по пути следования закрывает механическим ключом дверь в зумпфовую;

– на выходе из коридора оператор закрывает дверь на электромагнитный замок с помощью единого командного механического ключа, после поворота которого в личине выключателя подаётся питание на электромагнитный замок;

– после осмотра помещения систем питания его выходная дверь закрывается аналогично, как и предыдущие двери;

– после закрытия всех 5 радиационно-защитных дверей помещений №001, 002, 005, 009, 008, находящихся на отметке -3.100, оператор поднимается по лестнице на II этаж в пультовую № 201;

– в пультовой оператор проверяет наличие всех разрешающих сигналов на включение как системы СБСР (в том числе вентиляции), так и системы управления циклотроном, после чего загорается световое табло, работа циклотрона разрешена (если не

сработало какое-то из устройств блокировки, процедуры осмотра и закрытия помещений следует повторить);

– после проведения всех выше указанных действий оператор вставляет единый командный ключ в личину выключателя (расположенного в блоке аварийного управления СБСР) и поворотом ключа подаёт сигнал на включение силового контактора подачи основного силового электропитания циклотрона.

В случае превышения значения заданного верхнего порогового уровня нейтронного излучения в циклотронном зале система СБСР блокирует открытие всех дверей и отключает основное электропитание циклотрона.

Штатное выключение циклотрона и системы СБСР производится оператором следующим образом:

– после подачи сигнала от системы управления циклотроном (сигнал «Циклотрон выключен») начинается отсчёт времени запретного периода (~ 30 мин.) и только после этого и при условии наличия допустимого уровня наведённой активности (излучения), допустимого для персонала группы «А», можно вынуть командный ключ, а все двери при этом разблокируются и снимается запрет на вход во все помещения ЦК.

1.10 Аварийные ситуации. Мероприятия и средства по их предупреждению.

Циклотрон, его электрофизическое оборудование и мишенные устройства снабжены необходимыми устройствами, обеспечивающими безопасную и безаварийную эксплуатацию циклотронного комплекса.

Безаварийная эксплуатация ЦК заключается в строгом выполнении обслуживающим персоналов требований инструкций по эксплуатации, своевременным проведением технического обслуживания и регламентных работ. Однако при нарушении правил и условий эксплуатации ЦК и неправильных действий персонала могут возникнуть аварийные ситуации, которые могут привести к переоблучению персонала.

Облучение персонала выше допустимых уровней теоретически возможно при выполнении следующих работ и возникновении неисправностей оборудования:

– пуско-наладка и регулировка систем ЦК при его выходе на номинальный штатный режим работы;

– отработка режимов облучения мишеней;

– наладка систем транспортировки произведенных радионуклидов из циклотронного зала к модулям синтеза радиофармпрепаратов;

– разгерметизация гибких трубопроводов подачи жидкого радионуклида, подаваемого от мишеней в помещения синтеза;

– повреждение (прожог) фольги мишени;

– образование дефектов и нарушение целостности радиационной защиты.

Все причины и сами перечисленные аварийные ситуации, а также их последствия не распространяются за пределы помещений циклотронного комплекса и в целом здания и не приводят к переоблучению персонала и радиационному загрязнению окружающей среды.

Порядок действий обслуживающего и эксплуатационного персонала ЦК при возникновении и ликвидации радиационной аварии определяется действующей в НИИТФА «Инструкцией по действиям персонала в аварийных ситуациях в подразделениях института, применяющих радиоактивные вещества и другие источники ионизирующих излучений» № 250, утвержденной 03.05.2010г.

Литература.

1. НРБ –99/2009 Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523 – 09, Москва 2009

2. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99) СП 2.6.1.799-99 Минздрав России 2000.

3.Гигиенические требования к размещению и эксплуатации ускорителей электронов с энергией до 100 МэВ, Приложение 3. Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2573-10 Москва 2010

4. Унифицированные правила устройства и безопасной эксплуатации радиационно-технологических установок, Москва 1980

5.NCRP Publication 51 "Radiation Protection Design Guidelines for O.1 - 1OO MeV Particle Accelerator Facilities". National Council on Radiation Protection and Measurements, USA.

6. N. Metropolis et al. "Neutron Yields from thick targets bombarded by 18 and 22 protons" Phys. Rev. v.109 №6 p.2086 1958

7. M.A. Lone et al. "Thick target neutron yields and spectral distributions from the Li-7(d/p,n) and Be(d/p,n) reactions" Nucl. Instr. Meth. 143, 1977.

8. Н.А. Власов "Нейтроны" Москва, 1971.

9. Э. Сегре "Экспериментальная ядерная физика. Москва 1965.

10. М.М. Комочков “Основы защиты от излучения ускорителей протонов, дейтронов и альфа-частиц” ОИЯИ, Р-1349, Дубна 1953

12. Л.Н. Зайцев, М.М. Комочков, Б.С. Сычёв “Основы защиты ускорителей”, Москва, Атомиздат 1971

13. М.М. Комочков, В.Н. Лебедев “Практическое руководство по радиационной безопасности на ускорителях заряженных частиц” Москва, Энергоатомиздат 1986

14. I.T. Song "Semiempirical formula for albedo of fast neutrons" Transaction NSA v.10 No2, 1967.

. I.T. Song "Differential dose albedo for fast neutrons" Nucl. Sci. Ing. v.35 No3, 1969.

15. Н.Г. Гусев и др. "Защита от ионизирующих излучений". V.1-2. Москва, Атомиздат, 1980.

16. под ред. А.П. Веселкина "Основы инженерного проектирования защиты атомных станций". Москва, Атомиздат,1976.

17. Х.Б. Меднис. Справочник "Таблицы для нейтронно-активационного анализа" Зинатне, Рига, 1976.

18. В.П. Машкович Справочник "Защита от ионизирующих излучений". Москва, Энергоатомиздат, 1982.

19. под ред. В.Б. Дубровского "Строительство атомных станций" Москва, "Энергия", 1979.

20. Д.Л. Бродер и др. “Бетон в защите ядерных установок” Атомиздат, Москва 1966

21. В.Е. Алейников, В.Г. Бескровная, А.З. Крылов «Расчёт дозы нейтронов за бетонной защитой ускорителей заряженных частиц на энергии до 100 МэВ» препринт ОИЯИ, Р16-2002-254, Дубна, 2002

22. А.С. Енохович “Краткий справочник по физике” Москва, Высшая школа, 1976

23. Б.М. Яворский, А.А. Детлаф “Справочник по физике” Москва, Наука, 1974

24. Под редакцией Д.Л. Бродера и др. «Руководство по радиационной защите для инженеров» т.2, Москва, Атомиздат 1973

25. И.П. Селинов “Изотопы” Справочные таблицы Т. 1-2, Москва, Наука 1970

26. L.R. Carroll et al. “Radiation Measurement Related To The Design Of A Self- Shielded Accelerator System” University of Wisconsin, Madison, Wi, изд. SIEMENS, 1985