

Проект МНТЦ № 2267 «Создание подкритической сборки (ПСД) с комбинированным спектром нейтронов, управляемой протонным ускорителем с энергией протонов 659 МэВ для проведения экспериментов по трансмутации долгоживущих продуктов деления и минорных актинидов (Этап I: проектирование, проектная документация и обоснование безопасности)»

РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ УСТАНОВКИ SAD

1. КРИТЕРИИ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ, КОНЦЕПЦИЯ РАДИАЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ И БЕЗОПАСНОСТИ

Принципы радиационной защиты и безопасности, на которых должен основываться проект, в кратком виде сводятся к следующему:

- индивидуальные дозы персонала групп А и Б, обусловленные сочетанием всех радиационных факторов, не должны превышать установленных пределов (НРБ-99 [1], ОСПОРБ-99 [2]);
- установка, как источник излучения, должна быть обеспечена мерами защиты и безопасности так, чтобы величина и вероятность облучения и число лиц, подвергшихся облучению, сохранялось на разумно достижимом низком уровне с учетом экономических и социальных факторов, и чтобы дозы облучения от установки и связанные с ними риски были ограничены;
- меры эшелонированной защиты должны быть включены в проект, как и регламент по эксплуатации установки в целом, с тем, чтобы компенсировать возможные отказы мер защиты и безопасности;
- защита и безопасность должны обеспечиваться за счет рационального управления и инженерно-технических средств, обеспечения качества контроля, подготовки и аттестации персонала, а также результатов проведенных исследований;
- должны быть рассмотрены все возможные аварийные ситуации и мероприятия на случай радиационной аварии.

Радиационную защиту и безопасность можно условно разделить на четыре взаимосвязанные части, обеспечивающие не превышение дозовых пределов: защиту от излучений, радиационный мониторинг, влияние установки на окружающую среду и организационно-технические меры. Далее рассматриваются основные проектные решения, основанные на перечисленных выше принципах.

Результаты исследований радиационной обстановки вокруг фазотрона при различных режимах его работы приведены в Приложении 1.

2. КРИТЕРИИ КОНСТРУИРОВАНИЯ ЗАЩИТЫ ОТ ИЗЛУЧЕНИЯ

Целью проектирования эффективной защиты установки является ослабление уровней излучений, возникающих при её эксплуатации, до приемлемых уровней, при оптимальной стоимости защиты и без ухудшения параметров установки, необходимых для достижения целей предусмотренных проектом. Это достигается последовательным решением трех проблем:

- определением источников излучений;
- определением требуемых уровней эффективной эквивалентной дозы за защитой (удовлетворение установленным пределам доз излучений);
- проектированием защиты с адекватным ослаблением излучений, т. е. таким, чтобы обеспечить не превышение установленных пределов доз персонала групп А и Б при штатной работе установки.

Защита должна быть спроектирована с достаточной "гибкостью", чтобы позволить эффективно эксплуатировать установку при использовании доступных материалов и оптимальной стоимости.

3. ИСТОЧНИКИ ВНЕШНЕГО И ВНУТРЕННЕГО ОБЛУЧЕНИЯ НА УСТАНОВКЕ SAD

Источниками внешнего излучения при работе установки SAD являются:

- a) нейтроны и гамма-кванты утечки из защиты фазотрона;
- b) вторичное излучение (адроны, гамма-кванты), обусловленное потерями пучка вдоль тракта проводки пучка протонов на мишень подкритической сборки;
- c) излучение (нейтроны и гамма-кванты) из активной зоны сборки;
- d) излучение (гамма-кванты) из части контура воздушного охлаждения, расположенного вне активной зоны и обусловленное активацией охлаждающего воздуха.

Источниками внутреннего облучения при работе установки SAD являются радионуклиды, образующиеся при активации воздуха вторичным нейтронным излучением в помещениях установки, и попадающие в организм в газообразной форме или с аэрозолями.

Источником внешнего облучения при неработающей установке SAD является излучение (гамма-кванты и бета-частицы) наведенной в оборудовании активности, а источником внутреннего облучения – радиоактивное загрязнение поверхностей гамма, бета и альфа излучающими радионуклидами.

3.1. Излучение из защиты фазотрона.

Излучение, выходящее из защиты фазотрона, обусловлено потерями протонов в камере ускорителя, потерями в системе вывода пучка из камеры и потерями пучка по тракту транспортировки. Защита фазотрона представляет собой сплошную стену из обычного бетона ($\rho = 2,4 \text{ г/см}^3$) толщиной 2 м. Основным дозообразующим компонентом излучения за защитой являются нейтроны широкого энергетического спектра (от тепловой энергии до сотен МэВ). Помимо нейтронов в поле излучения присутствуют гамма-кванты и небольшое количество заряженных адронов (протоны и π -мезоны). В сплошной защите фазотрона имеется два вентиляционных проема диаметром 1,5 м, через которые непосредственно выходит излучение из зала ускорителя (преимущественно многократно рассеянные в зале медленные нейтроны).

Пространственное распределение плотности потока нейтронов за защитой неравномерно. Максимальное значение мощности дозы нейтронов наблюдается в районе отверстий в защите, и при некоторых режимах работы фазотрона может достигать 4-5 мЗв/час.

3.2. Излучение, обусловленное потерями протонов по тракту в помещении 101.

Согласно техническому заданию на проектирование установки потери пучка протонов на двух поворотных магнитах и четырех парах квадрупольных линз в помещении 101 заданы равными 5 %. Вторичное излучение, обусловленное взаимодействием протонов с энергией 660 МэВ со стенками и остаточным газом в протоновом тракте, формируется преимущественно в направлении прямо-вперед в сравнительно узком конусе относительно точки взаимодействия протонов с веществом тракта транспортировки. Основными компонентами вторичного излучения являются адроны высокой энергии (вплоть до энергии первичных протонов). В расчетах было принято следующее распределение потерь по элементам тракта: магниты – по 2 %, каждая пара линз – по 0,25 %.

3.3. Излучение активной зоны.

Активная зона установки является мощным источником нейтронов (спектра деления), а также гамма-квантов. Полный выход нейтронов из подкритической сборки (за свинцовым отражателем) при токе протонов на мишени 1,5 мкА достигает $1 \cdot 10^{15}$ н/с.

3.4. Излучение из контура охлаждения активной зоны.

Осушенный воздух, используемый в установке для охлаждения активной зоны, активируется в ней мощным нейтронным излучением. Часть воздушной массы, охлаждающей мишень зоны, активируется также вторичными протонами. Замкнутый контур воздушного охлаждения зоны выходит в помещения 402 и 401, создавая в них уровни повышенного внешнего облучения гамма-квантами за счет распада радионуклидов в контуре.

Возможные утечки воздуха из контура охлаждения и систем спецвентиляции могут приводить к внутреннему облучению персонала гамма и бета нуклидами.

3.5. Излучение, обусловленное наведенной активностью оборудования, воздуха и строительных материалов.

Наиболее активируемыми частями оборудования установки, в поле излучения которых будет периодически находиться персонал при эксплуатации установки, являются элементы магнитной оптики в помещении 101. Активация магнитов и линз в помещении 101 обусловлена потерями в них пучка протонов с энергией 660 МэВ. Радиоактивные нуклиды образуются за счет взаимодействия потерянных протонов пучка и вторичных адронов с материалами тракта транспортировки пучка. Активация стен и воздуха происходит за счет вторичного адронного излучения в помещении. Результатом распада гамма и бета активных радионуклидов является внешнее и внутренне облучение персонала.

Выбывшее из эксплуатации активированное оборудование и активные расходные материалы будут выдерживаться и храниться в помещении и будут создавать в нем повышенные уровни гамма и бета излучения.

Высокой наведенной активностью будут обладать образцы, облученные в исследовательских каналах сборки.

Еще одним источником облучения будет являться радиоактивное загрязнение поверхностей гамма, бета и альфа излучающими радионуклидами, образующееся за счет активации пыли или попадающее в помещения установки из зоны в при её перегрузке.

4. ИЗЛУЧЕНИЕ И РАДИОАКТИВНОСТЬ ВО ВНЕШНЕЙ СРЕДЕ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ РАБОТОЙ УСТАНОВКИ SAD

При работе установки во внешней среде вокруг неё формируется поле нейтронов и гамма-квантов, многократно рассеянных в воздухе (skyshine), грунте и окружающих зданиях. Основная доза внешнего облучения вне здания установки обусловлена нейтронами с энергией менее 20 МэВ.

Грунт и подпочвенная вода под помещением 101 установки активируются нейтронами вторичного излучения, образующимися за счет потерь пучка по тракту транспортировки.

В атмосферу из установки попадает активированный воздух, который является источником внешнего и внутреннего облучения людей.

Источниками радиационной опасности могут являться также активированные или поверхностно загрязненные материалы, детали, одежда и т.д., вынесенные за пределы здания установки.

5. ОБОСНОВАНИЕ РАСЧЕТОВ МОЩНОСТИ ДОЗ ИЗЛУЧЕНИЯ ЗА ЗАЩИТОЙ УСТАНОВКИ И НАВЕДЕННОЙ АКТИВНОСТИ

В зависимости от степени потенциальной опасности облучения персонала от указанных выше источников облучения и от режимов работы установки и фазотрона устанавливаются две зоны радиационного воздействия – зона наблюдения (ЗН) и санитарно-защитная зона (СЗЗ). СЗЗ – территория, где облучение людей может превысить предел дозы для населения, ЗН – территория за пределами СЗЗ, в которой проводится радиационный контроль, но специальные требования к пребыванию в ней людей не

устанавливаются. В соответствии с [3] предлагается внутри СЗЗ выделить: а) контролируемую зону (КЗ), т. е. территории или помещения, в которых уровень облучения людей может превысить предел дозы для персонала группы Б (5 мЗв), но не может превысить предел дозы для персонала группы А (20 мЗв); б) зону спецдопуска (ЗСД), т. е. территории или помещения в которых уровень облучения людей может превысить предел дозы для персонала группы А, но не может превысить 200 мЗв/год; в) зону запрета (ЗЗ), т. е. территории или помещения, в которых уровень облучения людей может превысить 200 мЗв/год. К контролируемой зоне относятся также помещения для работ с открытыми источниками излучения 3-го класса, а к зоне спецдопуска – помещения для работ с открытыми источниками излучения 1-го и 2-го классов. Важнейшими требованиями, предъявляемыми к зоне запрета, являются:

- исключение доступа персонала в зону;
- наличие физических границ зоны;
- наличие электромеханической системы блокировки на всех входных дверях в помещения зоны запрета;
- наличие системы сигнализации, подающей сигнал перед возникновением источника, создающего зону запрета;
- наличие возможности выхода из помещения зоны в любое время.

К зоне специального допуска будут относиться помещения, в которых дозы облучения персонала могут превысить годовой предел в случае непринятия специальных мер безопасности, но в которых допускается пребывание персонала в течение короткого времени для выполнения неотложных работ. Основными требованиями, предъявляемыми к организации работ в этой зоне, являются:

- измерение уровней излучений на конкретном рабочем месте оперативными средствами до начала работ;
- оформление наряда-допуска на проведение конкретной работы с указанием исполнителей, объема работ, средств индивидуального контроля и защиты, дополнительных защитных экранов и др.;
- проведение работ под непосредственным контролем дозиметриста.

Санитарно-защитная зона при работе установки SAD проходит границе здания установки. В то же время, в ОИЯИ вокруг реактора ИБР-2 установлена санитарно-защитная зона радиусом 1 км вокруг здания реактора, а зоной наблюдения является вся территория г. Дубна. Поскольку санитарно-защитная зона установки SAD находится внутри санитарно-защитной зоны реактора ИБР-2, выделение специальной санитарно-защитной зоны установки SAD не требуется. То же относится и к зоне наблюдения вокруг установки SAD.

Распределение зон радиационного воздействия внутри здания установки SAD в зависимости от рабочего состояния установки и фазотрона приведены в таблице 1.

Таблица 1.

| Помещения установки SAD | Установка работает | Установка не работает, но работает ускоритель | Установка и ускоритель не работают |
|--|--------------------|---|------------------------------------|
| Помещение магнитов (101) | ЗЗ | ЗСД | ЗСД |
| Помещения 1-го, 2-го и 3-го этажей, кроме | КЗ | КЗ | КЗ |
| Центральный зал установки (501) | ЗСД | ЗСД | КЗ* |
| Хранилище р/а отходов () | КЗ | КЗ | КЗ |
| Остальные помещения установки | ЗСД | КЗ | КЗ |

* ЗСД при работах, связанных со вскрытием активной зоны сборки.

Концепция расчета защиты установки основывается на недопущении при работе установки изменений зон радиационного воздействия в помещениях прилегающих к ней зданий ЯСНАПП и корпуса 4 (медико-технический комплекс). Согласно действующему санитарно-эпидемиологическому заключению установленный уровень мощности дозы в контролируемой зоне фазотрона ЛЯП составляет 25 мкЗв/час с учетом неполного времени работы фазотрона в году. Все помещения ЯСНАПП, в части здания, прилегающей к установке SAD, относятся к категории помещений временного пребывания персонала. Со стороны фазотрона стена здания ЯСНАПП представляет собой сплошную защиту из обычного бетона ($\rho = 2,4 \text{ г/см}^3$) толщиной 1 м. Эти исходные данные определяют конструкцию защиты между помещением магнитов (101) и зданием ЯСНАПП. Стена корпуса 4 в простенке между зданиями фазотрона и ЯСНАПП обычная (кирпичная) с двумя большими оконными проемами. На первом этаже корпуса 4 (под обваловкой) проходит канал транспортировки пучка протонов в здание ЯСНАПП, являющийся зоной запрета или спецдопуска. На втором этаже корпуса 4, на высоте примерно соответствующей расположению активной зоны установки SAD, находится помещение разводки пучков медико-технического комплекса (МТК). В этом помещении установлена контролируемая зона при отсутствии вывода в него пучка протонов. Рабочих мест в помещении нет, и оно также может быть отнесено к категории помещений временного пребывания персонала. Таким образом, защита активной зоны установки в направлении клинично-технического комплекса также должна гарантировать не превышение в нем уровня мощности дозы 25 мкЗв/час.

Расчет защиты установки проводился по МК программе переноса излучений MCNPX [4]. Программа позволяет рассчитывать межъядерный каскад адронов в веществе защиты для реальных геометрий облучения. Свертка спектральных распределений флюенсов частиц, выходящих из защиты, с энергетической зависимостью удельной эффективной дозы позволяет получить значения мощностей доз компонентов излучения за защитой. В расчетах принимался во внимание только нейтронный компонент поля излучения за защитой (в диапазоне энергий от тепловых нейтронов и выше), поскольку известно, что за массивной и сплошной биологической защитой, облучаемой адронами с энергией до 1 ГэВ, нейтроны дают подавляющий вклад в полную дозу излучения. НРБ-99 декларирует энергетическую зависимость дозы нейтронов только до энергии 20 МэВ. Спектр же нейтронов за защитой простирается по энергии до сотен МэВ. Поэтому в расчетах использовалась энергетическая зависимость удельной эффективной дозы нейтронов до энергии 160 МэВ, предложенная в Публикации МКРЗ № 74 [5] (до энергии нейтронов 20 МэВ она практически совпадает с приведенной в НРБ-99 зависимостью).

Состав обычного бетона брался следующим: Н – 1 %, О – 53 %, Mg – 0,46 %, Si – 37,25 %, Са – 8,29 % ($\rho = 2,3 \text{ г/см}^3$).

Для конструирования защиты от излучения, обусловленного потерями протонов по тракту в помещении 101, рассчитывались значения мощностей доз нейтронов в некоторых, наиболее критических точках за защитой (т. е. в здании ЯСНАПП), нормированные на ток пучка протонов 1,5 мкА и на заданные значения потерь по тракту его транспортировки. Полагалось, что 5 % потерь пучка, заданные в помещении 101, распределены следующим образом: потери на поворотных магнитах – по 2 %, потери на двух парах квадрупольных линз – 1 %. Реальная геометрия магнитов и линз учитывалась с достаточной степенью детализации. Потери протонов пучка разыгрывались равномерным разбросом части протонов в диапазоне угла $\pm 3^\circ$ по отношению к их траектории. Пространственное распределение потерь задавалось равномерным вдоль тех частей протоновода, которые заключены внутри магнитов. Проверка показала, что форма пространственного распределения потерь пучка слабо сказывается на результатах расчета мощности дозы нейтронов за защитой. В расчетах поля нейтронов за защитой учитывались падающие на защиту вторичные протоны с энергией более 10 МэВ и нейтроны с энергией более 1 МэВ. Транспорт π -мезонов и гамма-квантов в защите не

рассматривался. При расчетах защиты учитывалась также существующая бетонная защита ЯСНАПП толщиной 1 м. Критические точки за защитой выбирались таким образом, что мощности доз нейтронов в них заведомо достигают максимальных значений. При этом, не превышение установленного уровня мощности дозы в них гарантирует достаточность защиты во всех других точках.

Для расчета мощности дозы нейтронов за защитой от активной зоны использовалась детальная модель сборки с отражателем, предложенная НИКИЭТ. Расчет выхода нейтронов из неё и транспорта нейтронов через защиту проводился по программе MCNPX. В состав комбинированной защиты активной зоны входит обычный бетон (см. выше), тяжелый бетон и железо.

6. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ЗАЩИТЫ УСТАНОВКИ SAD

В таблице 2 приведены значения мощностей доз нейтронов H (мкЗв/час) в 8-ми выбранных критических точках в помещениях ЯСНАПП, корпуса 4 и здания установки SAD, обусловленные вторичным излучением тракта транспортировки пучка в помещении 101 установки SAD при указанных выше величинах тока протонов и потерь пучка. Положение соответствующих точек указано на рис. 1, 2.

Таблица 2.

| № точки | Помещение | H от 1-го магнита | H от 2-го магнита | Σ | % |
|---------|--|-------------------|-------------------|----------|-----|
| 1 | ЯСНАПП, зал вытяжной вентиляции, отметка +6.15, по оси X | 0,31 | 2,05 | 2,36 | 10 |
| 2 | ЯСНАПП, зал вытяжной вентиляции, отметка +10.05, по центру первого проема в защите | 0,04 | 0,83 | 0,87 | 6,3 |
| 4 | Корпус 4, отметка +4.50, 5,0 от стены фазотрона | 0,92 | 0,21 | 1,13 | 22 |
| 5 | Корпус 4, отметка +4.50, 9,5 м от стены фазотрона | 1,86 | 1,56 | 3,42 | 18 |
| 6 | Корпус 4, отметка +4.50, 11,5 м от стены фазотрона | < 0,05 | 1,24 | 1,24 | 25 |
| 7 | Корпус 4, отметка +4.50, 7,5 м от стены фазотрона | 2,22 | 0,96 | 3,18 | 25 |
| 8 | ЯСНАПП, 1-й этаж, канал пучка, по оси пучка, отметка 0 | | | 7,6 | 6 |

Примечание: 1) все точки отстоят от стен помещений на 1 м; 2) точки в корпусе 4 находятся в зале разводки пучков в медицинские кабины МТК; 3) в шестой колонке указана средняя статистическая погрешность расчетов.

При предлагаемой компоновке защиты наибольшее значение мощности дозы нейтронов, определяемое данным источником излучения, достигается внутри здания ЯСНАПП в точках 2 и 3 (точка 3 также располагается в зале вытяжной вентиляции на отметке +10,05 м по центру второго проема). При существующих проемах в стене ЯСНАПП диаметром 1,4 м значение мощности дозы за ними будет составлять около 20 мкЗв/час. Для снижения уровня мощности дозы внутри здания ЯСНАПП планируется уменьшить диаметры проемов до 0,35 м и усилить бетонную защиту в направлении помещения магнитов стальной вставкой толщиной 0,5 м. При выполнении этих условий мощность дозы нейтронов за первым проемом (т. 2), обусловленная вторичным излучением тракта транспортировки пучка, составит 0,87 мкЗв/час (в т. 3 доза будет равна 0,8 мкЗв/час). Однако, в эти точки дает также вклад излучение из критической сборки. Мощность дозы в точке 2 от сборки составит 1,02 мкЗв/час, а в точке 3 – 0,004 мкЗв/час. Полная мощность дозы нейтронов от двух источников в точке 2 будет равна 1,9 мкЗв/час.

Зал вытяжной вентиляции ЯСНАПП является помещением временного пребывания персонала. Рабочие места (помещения постоянного пребывания персонала ЯСНАПП) удалены от этих точек на расстояние ~ 10 м и располагаются за двумя кирпичными стенами. Оценки показывают, что значения мощностей дозы нейтронов в них будет еще на порядок ниже, чем в точках 2 и 3.

Таким образом, защита установки SAD обеспечит значения мощности дозы нейтронов на рабочих местах персонала существенно ниже установленного уровня.

Влияние фазотрона, как источника излучения, на мощность дозы нейтронов в этих точках будет пренебрежимо мало, т.к. здание установки SAD с мощной защитой активной зоны полностью поглощает нейтроны утечки из защиты фазотрона.

При компоновке защиты активной зоны установки SAD рассчитывались мощности дозы нейтронов в нескольких точках центрального зала установки над активной зоной (помещение 501, точки 15 и 16) при работе сборки. Помимо этого, рассчитывались мощности дозы нейтронов в точках 2, 3 и 9 здания ЯСНАПП, в точке 14 в корпусе 4 и в точках 10-13 установки SAD. В таблице 3 показаны расчетные значения мощности дозы нейтронов за защитой, обусловленные излучением активной зоны установки. Положение соответствующих точек указано на рис. 3.

Таблица 3.

| № точки | Помещение | Мощность дозы нейтронов, мкЗв/час |
|---------|--|-----------------------------------|
| 9 | ЯСНАПП, зал вытяжной вентиляции, отметка +9.8 | $2,2 \cdot 10^{-4}$ |
| 2 | ЯСНАПП, зал вытяжной вентиляции, отметка +9.8, по центру первого проема в защите | 0,51 |
| 3 | ЯСНАПП, зал вытяжной вентиляции, отметка +9.8, по центру второго проема в защите | $1 \cdot 10^{-2}$ |
| 10 | SAD, центральный зал, отметка +9,8 | 33,5 |
| 11 | SAD, помещение АВМ (401), отметка +9,8 | 0,15 |
| 12 | SAD, центральный зал, отметка +9,8 | 0,23 |
| 13 | SAD, центральный зал, отметка +9,8 | 80,7 |
| 14 | Корпус 4, зал разводки пучков в медицинские кабинеты, отметка +9.8 | $1,2 \cdot 10^{-12}$ |
| 15 | SAD, центральный зал, над защитой зоны, отметка +15,0 | 0,12 |
| 16 | SAD, центральный зал, над хранилищем ТВЭЛов, отметка +15,0 | 7,9 |

В помещении зала установки SAD значительный вклад в мощность дозы нейтронов дают также нейтроны утечки из защиты фазотрона, и, в первую очередь, медленные нейтроны, натекающие в зал из двух проемов диаметром 1,4 м каждый в защите фазотрона для труб спецвентиляции. При этих условиях мощность дозы нейтронов утечки от фазотрона в районе проемов может составлять при работе установки SAD более 150 мкЗв/час. Поэтому было предложено данные вентиляционные проемы сузить до диаметра 0,35 м и выполнить их в виде лабиринта в защите. Эти меры приведут к снижению мощности дозы в районе проемов до 3 мкЗв/час.

Постоянные рабочие места персонала при работе установки располагаются в пультовой (помещение 301). Мощность дозы нейтронов в этом помещении определяется двумя источниками: активной зоной сборки и нейтронами утечки из защиты фазотрона. Согласно предложенной компоновке здания SAD предполагается усилить защиту фазотрона слоем обычного бетона толщиной 1,2 м. Большая часть пультовой экранируется ярмом магнита фазотрона от излучения, генерируемого в камере ускорителя и в мишенях в главном зале. Измеренное пространственное распределение мощности дозы нейтронов вдоль защиты фазотрона на отметке +11,0 м представлено на рис. 12 в Приложении 1. Там же показана ближняя к активной зоне граница помещения пультовой. Мощность дозы нейтронов в этой точке может достигать 250 мЗв/час без дополнительной защиты. Чтобы оценить коэффициент ослабления мощности дозы дополнительной защитой толщиной 1,2 м бетона, был рассчитан спектр нейтронов, падающий изнутри на защиту в этом месте. Источником являлась толстая медная мишень внутри мишенной станции (толщина стали защиты станции 20 см). Угол между осью пучка протонов и направлением на данную точку задавался равным 58° . Результаты расчета за защитой толщиной 2 м бетона нормировались на результаты измерений, и затем учитывался дополнительный слой бетона толщиной 1,2 м. Было показано, что дополнительная защита и уменьшение диаметра вентиляционных проемов снизит мощность дозы в углу пультовой до 13 мкЗв/час (в других точках внутри пультовой мощность дозы нейтронов

существенно меньше).

7. РАСЧЕТ МОЩНОСТИ ДОЗЫ НЕЙТРОНОВ УТЕЧКИ ИЗ ЗАЩИТЫ АКТИВНОЙ ЗОНЫ УСТАНОВКИ SAD В ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

Фазотрон в целом, как источник нейтронов и гамма-квантов, испускаемых во внешнюю среду, создает на местности вблизи него поле многократно рассеянного в воздухе, грунте и зданиях излучения. Основным компонентом этого излучения являются нейтроны с энергией менее 20 МэВ (90 - 95 % по мощности дозы). Измеренные пространственные распределения мощностей доз нейтронов при различных режимах работы фазотрона приведены в приложении 1. Наиболее критичной точкой вне здания фазотрона, расположенной вблизи установки SAD, является точка 5 (см. рис. 4) на углу корпуса 5Ф (рядом с дорогой), в которой установлен стационарный датчик радиационного контроля в окружающей среде. Измерения показали, что при некоторых режимах работы фазотрона и при токе выведенного пучка 1,5 мкА, мощность дозы нейтронов в этой точке составляет до 3 мкЗв/час. Основным источником нейтронов, создающий 60-70 % мощности дозы в этой точке – это относительно тонкая верхняя защита здания фазотрона. Остальная доля мощности дозы в этой точке формируется за счет излучения из северо-западной стены фазотрона. Строительство здания установки SAD с её мощной защитой активной зоны полностью перекроет локальный источник нейтронов утечки из северо-западной стены фазотрона, что приведет к снижению ~ на 1/3 мощности дозы нейтронов в точке 5. Таким образом, защита активной зоны установки SAD, в первую очередь, защита над зоной, должна быть такой, чтобы многократно рассеянные нейтроны утечки из неё не создавали в точке 5 мощность дозы более 1 мкЗв/час. При этом радиационная обстановка вокруг фазотрона ЛЯП при работе установки SAD не ухудшится.

Активная зона является мощным источником нейтронов широкого энергетического спектра. При токе протонов 1,5 мкА из боковой поверхности свинцового отражателя выходит $2,93 \cdot 10^{14}$ н/с, из верхнего торца – $1,67 \cdot 10^{14}$ н/с, из нижнего торца – $2,17 \cdot 10^{14}$ н/с. По программе MCNPX рассчитывался суммарный выход нейтронов из всей площади зала установки SAD и усредненные по всей площади зала угловое и спектральное распределения нейтронов утечки. Полученные данные использовались как характеристики источника нейтронов во внешнюю среду. Расчет мощности дозы от нейтронов этого источника в точке 5 проводился по программе MCNP с учетом наличия грунта при нормальном атмосферном давлении воздуха. В расчетах учитывались существующие здания фазотрона, ЯСНАПП, корпусов МТК и 5Ф. План прилегающей к установке местности и положение точек расчета мощности дозы показан на рис. 4.

Мощности дозы нейтронов рассчитывались в указанных на рисунке точках, а также на расстояниях до 1000 м по направлению N (до проходной площадки ЛЯП) в трех диапазонах высот над уровнем грунта: 0-2 м; 2-4 м; 4-6 м. Прогнозируемые значения мощности дозы нейтронов в точках 1 – 12 на высоте 0-2 м при токе пучка протонов установки 1,5 мкА приведены в таблице 4. Точки 1 – 4 находятся внутри ограждения зоны радиационного воздействия фазотрона. Мощность дозы в точке 5 составит не более $4 \cdot 10^{-3}$ мкЗв/час, что существенно меньше указанного выше ограничения и установленной [2] проектной мощности эквивалентной дозы для населения.

Таблица 4.

| Точка | Мощность дозы, мкЗв/час | Точка | Мощность дозы, мкЗв/час |
|-------|-------------------------|-------|-------------------------|
| 1 | 8,5E-03 | 7 | 3,2E-03 |
| 2 | 7,2E-03 | 8 | 2,8E-03 |
| 3 | 5,5E-03 | 9 | 1,6E-03 |
| 4 | 4,5E-03 | 10 | 2,5E-03 |
| 5 | 3,8E-03 | 11 | 2,8E-03 |
| 6 | 3,4E-03 | 12 | 4,4E-03 |

В районе проходной мощность дозы нейтронов снижается до $\sim 4 \cdot 10^{-5}$ мкЗв/час.

8. АКТИВАЦИЯ ГРУНТА И ПОЧВЕННЫХ ВОД ПОД УСТАНОВКЕЙ SAD

Точный расчет активации грунта и почвенной воды представляет собой очень сложную задачу и требует большого количества физико-химических данных о составе и свойствах почвы, гидрологическом режиме почвенных вод и т. д. Задачи оценки фиксированной активации грунта и активации подвижных почвенных вод с точки зрения их возможного попадания в водозаборы питьевой воды, принципиально различны по значимости. Считается [6], что сколько-нибудь значимая активации грунта и воды возникает при потоках нейтронов на грунте $> 10^7$ н·см⁻²·с⁻¹. В случае установки SAD

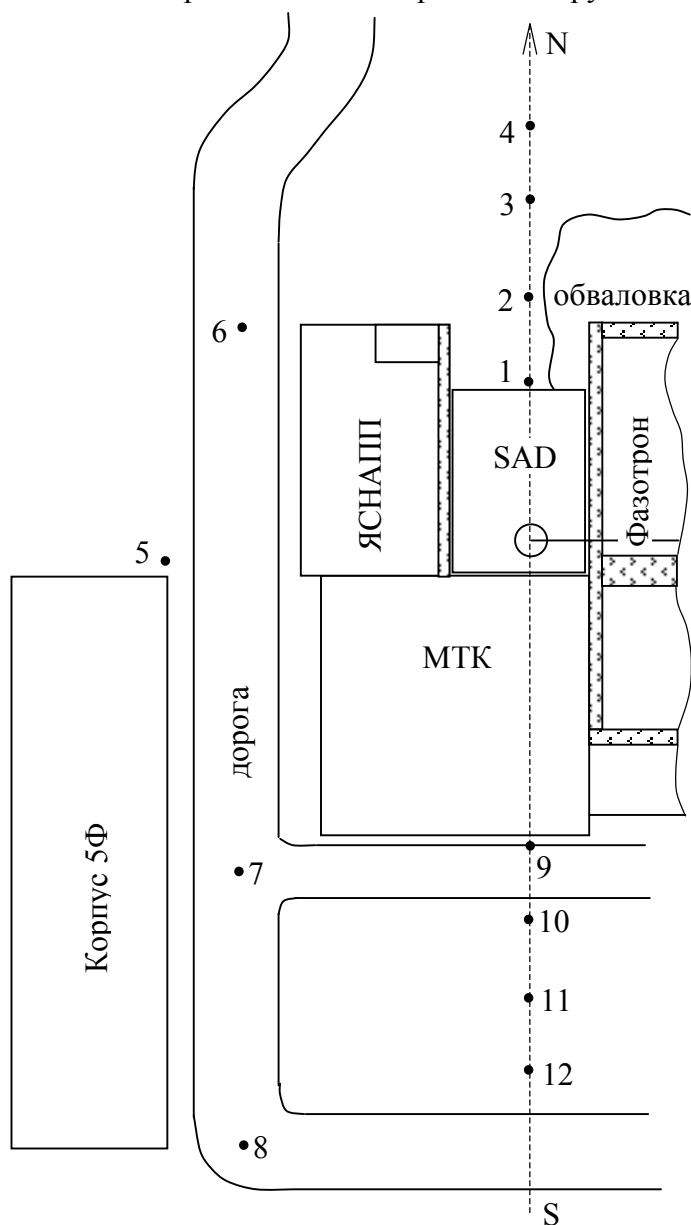


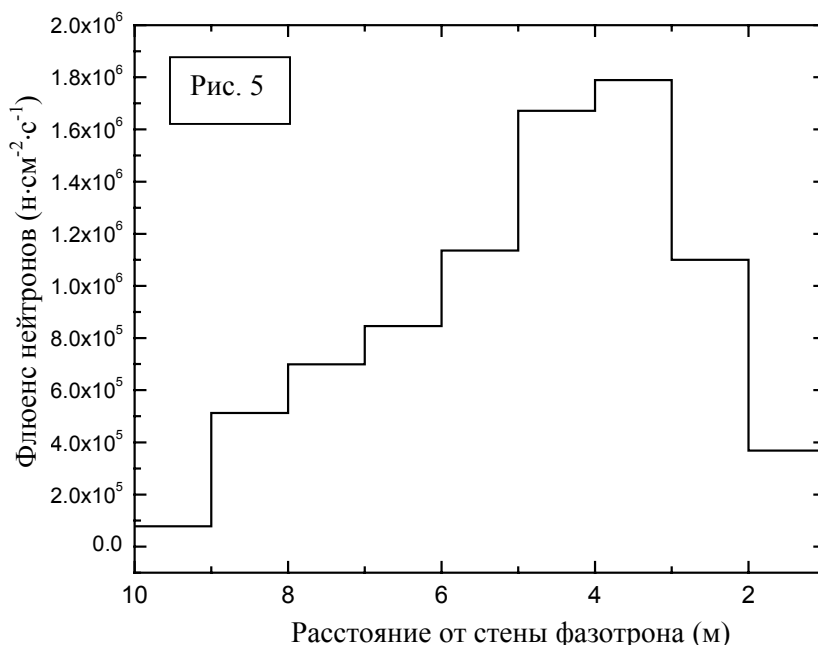
Рис. 4. Расположение на местности точек расчета мощности дозы нейтронов из верхнего перекрытия активной зоны установки, многократно рассеянных в окружающей среде. Расстояния от центра активной зоны до точек 1, 2, 3, 4 составляют, соответственно, 25, 35, 45 и 55 м. Расстояния между точками 10, 11, 12 составляют 10 м.

грунт будет активироваться только за счет вторичных нейтронов, обусловленных потерями пучка на 1-м отклоняющем магните в помещении 101. Толщина бетонного основания установки составляет по проекту 2 м. Предварительные расчеты флюенса нейтронов за слоем бетона толщиной 0,5 м под первым магнитом показали, что его величина не превысит $2 \cdot 10^6$ н·см⁻²·с⁻¹. Пространственное распределение флюенса нейтронов по оси X показано на рис. 5. Пространственное распределение флюенса нейтронов по оси Y существенно уже, поэтому фактически облучается грунт только

непосредственно под магнитом и объем наиболее активного грунта не превысит нескольких м³.

За слоем бетона толщиной 2 м значение флюенса нейтронов будет меньшим примерно в 20 раз (т. е. $\sim 10^5$ н·см⁻²·с⁻¹ максимум). Оценки показали, что за планируемое время работы установки SAD удельная активность грунта под ней заведомо не достигнет уровня отнесения его к радиоактивным отходам. Радиоактивные нуклиды, обусловленные активацией воды в грунте под установкой SAD, в систему водоснабжения города попасть не могут, и никакого внутреннего облучения пероральным путем население города от работы установки SAD не получит.

Измерения объемной радиоактивности почвы обваловки фазотрона в районе расположения SAD (под трубами спецвентиляции в точке, где мощности дозы нейтронов



может доходить до 3-4 мЗв/час) сразу же после окончания длительного сеанса фазотрона не показали какого-либо отличия от естественной радиоактивности почвы (в сравнении с контрольным образцом почвы). Это означает, что активация грунта обваловки нейтронами утечки из защиты за 40 лет работы фазотрона также практически отсутствует.

9. АКТИВАЦИЯ ВОЗДУХА В ПОМЕЩЕНИЯХ УСТАНОВКИ SAD

При работе установки радионуклиды в воздухе образуются в помещении магнитов 101 за счет двух источников излучения: а) вторичного излучения из тракта транспортировки пучка; б) нейтронов утечки, попадающих в помещение из нижней части активной зоны. Для расчета активации воздуха в помещении 101 использовался следующий весовой состав: N – 25,08 %, O – 71,41 %, Ar – 3,51 % ($\rho = 0,00121$ г/см³). Радионуклиды, образующиеся из азота, кислорода и аргона под действием протонов и нейтронов приведены в таблице 5.

Таблица 5.

| Радионуклиды, образующиеся в реакциях с протонами | Реакция | T _{1/2} (час) | Радионуклиды, образующиеся в реакциях с нейтронами | Реакция | T _{1/2} (час) |
|---|-----------------|------------------------|--|-----------------|------------------------|
| Be-7 | N nat (p,x)Be-7 | 1280,88 | N-13 | N-14(n,2n)N-13 | 0,1665 |
| C-11 | N-14(p,a)C-11 | 0,34 | C-11 | N-14(n,d2n)C-11 | 0,34 |
| O-14 | N-14(p,n)O-14 | 0,01972 | O-15 | O-16(n,2n)O-15 | 0,03444 |

| | | | | | |
|-------|------------------------|---------|-------|-------------------------|-----------------------|
| N-13 | N-14(p,pn)N-13 | 0,1665 | N-16 | O-16(n,p)N-16 | 0,00198 |
| C-10 | N-14(p,dT)C-10 | 0,00539 | Ar-41 | Ar-40(n,g)Ar-41 | 1,83 |
| N-13 | O-16(p, α)N-13 | 0,1665 | Ar-39 | Ar-40(n,2n)Ar-39 | 2,323·10 ⁶ |
| C-11 | O-16(p,3p3n)C-11 | 0,34 | S-37 | Ar-40(n, α)S-37 | 0,08433 |
| Be-7 | O nat (p,x)Be-7 | 1280,88 | Cl-40 | Ar-40(n,p)Cl-40 | 0,02333 |
| O-15 | O-16(p,pn)O-15 | 0,03444 | | | |
| O-14 | O-16(p,p2n)O-14 | 0,01972 | | | |
| Mg-28 | Ar nat(p,x)Mg-28 | 21,3 | | | |
| Cl-38 | Ar-40(p,T)Cl-38 | 0,62167 | | | |

По программе MCNPX рассчитывалась активность в насыщении A_i^s всех приведенных в таблице 4 нуклидов от вторичных нуклонов, вылетающих из одного магнита при потерях в нем 2 % протонов. Для того, чтобы учесть вторичное излучение от всех элементов тракта с суммарными потерями 5 %, полученные результаты были умножены на коэффициент 2,5.

Расчет активации воздуха, обусловленной нейтронами из активной зоны, выполнялся следующим образом. По программе MCNPX рассчитывался поток нейтронов за нижней поверхностью свинцового отражателя сборки ($2,17 \cdot 10^{14}$ н/с) и усредненные по площади поверхности спектр нейтронов и их угловое распределение. Затем рассчитывался транспорт этих нейтронов через стальную плиту толщиной 5 см и бетонную ($\rho = 2,4$ г/см²) защиту сборки толщиной 0,5 м. Активация воздуха рассчитывалась в воздушном цилиндрическом объеме диаметром 3 м без учета рассеянных нейтронов. Средняя концентрация радионуклидов в помещении 101 в насыщении определялась делением суммарной активности от двух источников на объем помещения (475 м³).

Средняя концентрация A_i Бк/м³ через время $t_{\text{обл}}$ работы ускорителя (час) и выдержки $t_{\text{выд}}$ определяется как:

$$A_i = A_i^s \frac{\lambda_i}{\lambda_i + m} \{1 - \exp[-(\lambda_i + m)t_{\text{обл}}]\} \exp[-(\lambda_i t_{\text{выд}})]$$

где $\lambda_i = 0,693/T_{1/2}$ (час⁻¹), m – кратность воздухообмена в помещении за счет вентиляции.

Активности радионуклидов в воздухе, образованных в помещении 101 за счет обоих источников на момент остановки после 50 часов работы без вентиляции помещения ($m = 0$) приведены в таблице 6.

Таблица 6.

| Нук-лид | Объемная актив-ность (Бк) за счет потерь пучка | Объемная актив-ность (Бк) за счет активной зоны | Σ объемная актив-ность в помещении (Бк) | Средняя актив-ность (Бк/м ³) в помещении | Допустимая среднегодовая актив-ность для персонала (Бк/м ³) [1] |
|------------------|--|---|--|--|---|
| ⁷ Be | 1,810E+06 | | 1,810E+06 | 3,811E+03 | 1,7E+05 |
| ¹⁰ C | 9,799E+06 | | 9,799E+06 | 2,063E+04 | |
| ¹¹ C | 9,453E+07 | 1,396E+05 | 9,466E+07 | 1,993E+05 | 2,5E+06 |
| ¹⁴ O | 1,142E+07 | | 1,142E+07 | 2,405E+04 | |
| ¹⁵ O | 3,459E+07 | 1,048E+05 | 3,470E+07 | 7,305E+04 | 3,8E+04* |
| ¹³ N | 4,292E+07 | 1,711E+05 | 4,309E+07 | 9,072E+04 | 6,3E+04* |
| ¹⁶ N | 1,103E+07 | 2,922E+05 | 1,133E+07 | 2,385E+04 | 6,3E+04* |
| ²⁸ Mg | 4,831E+04 | | 4,831E+04 | 1,017E+02 | 1,3E+04 |
| ³⁸ Cl | 1,650E+06 | | 1,650E+06 | 3,474E+03 | 3,0E+05 |
| ⁴¹ Ar | 1,028E+08 | 2,387E+08 | 3,415E+08 | 7,190E+05 | |
| ³⁹ Ar | 1,212E+01 | 3,159E-01 | 1,243E+01 | 2,617E-02 | |
| ⁴⁰ Cl | 5,890E+06 | 1,583E+05 | 6,048E+06 | 1,273E+04 | |
| ³⁷ S | 4,845E+06 | 1,294E+05 | 4,974E+06 | 1,047E+04 | |

Примечание: 1) МЗА – минимально значимая активность; 2) *ДОА получены пересчетом данных [] на действующие в России нормы.

Результаты расчета показывают, что активация воздуха никаких ограничений на работу персонала в помещении 101 не накладывает.

Оценим выброс радионуклидов в атмосферу в течение 50-часового сеанса при постоянном воздухообмене мощностью 2000 м³/час ($m = 4,21$). При этом время движения воздуха в вентиляционной системе от помещения 101 до момента выброса в атмосферу ($t_{\text{выд}}$) полагалось равным 1 мин. Данные расчета приведены в таблице 7. В этом случае суммарная активность радионуклидов, выброшенных в атмосферу, составит 347,4 мКи (сумма по колонке 5 таблицы 7).

Таблица 7.

| Нук-лид | Средняя активность (Бк/м ³) в помещении 101 | Объемная активность (Бк) в помещении 101 | Мощность выброса активности в атмосферу (Бк/час) | Суммарная активность, выброшенная в атмосферу за сеанс (Бк) |
|------------------|---|--|--|---|
| ⁷ Be | 1,835E+01 | 8,715E+03 | 3,669E+04 | 1,835E+06 |
| ¹⁰ C | 9,820E-06 | 4,664E-03 | 1,964E-02 | 9,818E-01 |
| ¹¹ C | 4,629E+04 | 2,199E+07 | 9,256E+07 | 4,628E+09 |
| ¹⁴ O | 6,145E+01 | 2,919E+04 | 1,229E+05 | 6,145E+06 |
| ¹⁵ O | 2,112E+03 | 1,003E+06 | 4,224E+06 | 2,112E+08 |
| ¹³ N | 2,254E+04 | 1,071E+07 | 4,507E+07 | 2,254E+09 |
| ¹⁶ N | 1,109E-21 | 5,268E-19 | 2,218E-18 | 1,109E-16 |
| ²⁸ Mg | 9,656E-01 | 4,587E+02 | 1,931E+03 | 9,655E+04 |
| ³⁸ Cl | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ⁴¹ Ar | 5,571E+04 | 2,646E+07 | 1,114E+08 | 5,570E+09 |
| ³⁹ Ar | 1,243E-04 | 5,906E-02 | 2,486E-01 | 1,243E+01 |
| ⁴⁰ Cl | 7,899E+01 | 3,752E+04 | 1,580E+05 | 7,898E+06 |
| ³⁷ S | 1,760E+03 | 8,362E+05 | 3,520E+06 | 1,760E+08 |

Часть образующихся радионуклидов имеет короткие периоды полураспада, и даже при больших значениях m их активность достигает насыщения. Поэтому работа вентиляции помещения 101 в период проводки пучка протонов на мишень сборки мало меняет среднюю концентрацию нуклидов в помещении и приводит лишь к увеличению выброшенной в атмосферу суммарной активности. Целесообразно включение вентиляции только после остановки работы SAD для гигиенического обмена воздуха в помещении 101. Суммарная активность, однократно выброшенная в атмосферу после выключения отработавшей сутки установки, составит максимум 11,2 мКи, т. е. в 31 раз меньше, чем при постоянно работающей вентиляции с $m = 4,21$.

10. АКТИВАЦИЯ ОБОРУДОВАНИЯ В ПОМЕЩЕНИИ 101

Активация металлов магнитов и линз происходит за счет двух источников излучения: 1) в результате ядерных реакций с первичным (протонами пучка) и вторичным излучением (главным образом, адронами широкого спектра энергий), обусловленным потерями пучка по тракту транспортировки в помещении 101; 2) при облучении металлов нейтронами утечки, выходящими из активной зоны в помещение 101. Предполагалось, что активация железа первого и второго магнитов происходит только за счет собственных потерь пучка протонов, а активация второй линзы – за счет собственных потерь пучка протонов, вторичных нуклонов из второго магнита и нейтронов утечки из защиты активной зоны. Точный расчет мощности дозы вблизи второй магнитной линзы особенно важен, поскольку при наладке систем диагностики пучка при вводе его в активную зону персонал установки будет находиться непосредственно у этой линзы. Активация первой линзы не рассматривалась.

Материал ярма магнита и насадок – низкоуглеродистая сталь СТ-10 (максимальное

содержание примесей: С – 0,13 %; Si – 0,37 %), поэтому при расчете активации магнитов рассматривалась активация только железа. Протоновод (камера) выполнен из нержавеющей стали толщиной 5 мм, т.е. его масса пренебрежимо меньше массы магнита. Вследствие этого наличие присадок в протоноводе также не учитывалось, и он полагался выполненным из железа.

Обмотки магнитных линз изготовлены из чистой (электротехнической) меди. Общий вес железа и меди в магнитной линзе составляет 350 и 150 кг соответственно.

Расчет активации магнитов проводился по программе MCNPX. Были выполнены расчеты межъядерного каскада нуклонов по объему магнита при токе пучка протонов 1,5 мкА и заданных потерях пучка (2 % на магните) и по объему магнитной линзы (0,5 % потерь пучка), а также пространственных распределений радионуклидов в объемах магнита и линзы, образовавшихся в рассматриваемых ядерных реакциях. В таблице 8 приведены радионуклиды, учтенные при расчете активации железа, а в таблице 9 – радионуклиды, учтенные при расчете активации меди.

Таблица 8.

| Радионуклиды, образующиеся в реакциях с протонами | Реакция | T _{1/2} (час) | Радионуклиды, образующиеся в реакциях с нейтронами | Реакция | T _{1/2} (час) |
|---|-------------------|------------------------|--|-------------------|------------------------|
| Co-58 | Fe nat (p,x)Co-58 | 1699,2 | Mn-56 | Fe-57 (n,np)Mn-56 | 2,578 |
| Co-57 | Fe nat (p,x)Co-57 | 6501,6 | Mn-54 | Fe-54 (n,p)Mn-54 | 7504,8 |
| Co-56 | Fe nat (p,x)Co-56 | 1890,24 | Mn-52 | Fe-54 (n,T)Mn-52 | 134,184 |
| Co-55 | Fe nat (p,x)Co-55 | 18,2 | Mn-54 | Fe-56 (n,T)Mn-54 | 7504,8 |
| Mn-56 | Fe nat (p,x)Mn-56 | 2,578 | Fe-53 | Fe-54 (n,2n)Fe-53 | 0,1416 |
| Mn-54 | Fe nat (p,x)Mn-54 | 7504,8 | Cr-51 | Fe-54 (n,α)Cr-51 | 664,896 |
| Mn-52 | Fe nat (p,x)Mn-52 | 134,184 | Mn-56 | Fe-56 (n,p)Mn-56 | 2,578 |
| Cr-51 | Fe nat (p,x)Cr-51 | 664,896 | Mn-56 | Fe-58 (n,T)Mn-56 | 2,578 |
| Cr-49 | Fe nat (p,x)Cr-49 | 0,7015 | Fe-59 | Fe-58 (n,γ)Fe-59 | 1071,12 |
| Cr-48 | Fe nat (p,x)Cr-48 | 23,0 | | | |
| V-48 | Fe nat (p,x)V-48 | 383,304 | | | |
| Sc-48 | Fe nat (p,x)Sc-48 | 43,67 | | | |
| Sc-47 | Fe nat (p,x)Sc-47 | 82,128 | | | |
| Sc-46 | Fe nat (p,x)Sc-46 | 2011,2 | | | |
| Sc-44 | Fe nat (p,x)Sc-44 | 3,927 | | | |
| Fe-53 | Fe nat (p,x)Fe-53 | 0,1416 | | | |
| Fe-52 | Fe nat (p,x)Fe-52 | 8,275 | | | |
| K-43 | Fe nat (p,x)K-43 | 22,6 | | | |
| K-42 | Fe nat (p,x)K-42 | 12,36 | | | |
| Be-7 | Fe nat (p,x)Be-7 | 1282,56 | | | |
| Na-22 | Fe nat (p,x)Na-22 | 22809,13 | | | |
| Mg-28 | Fe nat (p,x)Mg-28 | 20,91 | | | |
| Cl-38 | Fe nat (p,x)Cl-38 | 0,6202 | | | |
| Ti-45 | Fe nat (p,x)Ti-45 | 3,08 | | | |
| Al-26 | Fe nat (p,x)Al-26 | 1,727·10 ⁷ | | | |

Таблица 9.

| Радионуклиды, образующиеся в реакциях с протонами | Реакция | T _{1/2} (час) | Радионуклиды, образующиеся в реакциях с нейтронами | Реакция | T _{1/2} (час) |
|---|-------------------|------------------------|--|--------------------|------------------------|
| Zn-65 | Cu nat (p,x)Zn-65 | 5865,6 | Cu-62 | Cu-63 (n,2n) Cu-62 | 0,1623 |

| | | | | | |
|-------|-------------------|---------|-------|-----------------------------|------------------------------|
| Zn-63 | Cu nat (p,x)Zn-63 | 0,6333 | Co-60 | Cu-63 (n, α) Co-60 | 4,62 \cdot 10 ⁴ |
| Zn-62 | Cu nat (p,x)Zn-62 | 9,26 | Cu-64 | Cu-63 (n, γ) Cu-64 | 12,701 |
| Cu-64 | Cu nat (p,x)Cu-64 | 12,701 | Cu-64 | Cu-65 (n,2n) Cu-64 | 12,701 |
| Cu-61 | Cu nat (p,x)Cu-61 | 3,408 | Co-61 | Cu-65 (n,n' α)Co-61 | 1,65 |
| Cu-60 | Cu nat (p,x)Cu-60 | 0,3833 | Ni-65 | Cu-65 (n,p) Ni-65 | 2,52 |
| Ni-57 | Cu nat (p,x)Ni-57 | 36,08 | | | |
| Ni-56 | Cu nat(p,x)Ni-56 | 146,4 | | | |
| Co-60 | Cu nat (p,x)Co-60 | 51981,3 | | | |
| Co-58 | Cu nat (p,x)Co-58 | 1699,2 | | | |
| Co-57 | Cu nat (p,x)Co-57 | 6501,6 | | | |
| Co-56 | Cu nat (p,x)Co-56 | 1890,24 | | | |
| Co-55 | Cu nat (p,x)Co-55 | 18,2 | | | |
| Fe-59 | Cu nat (p,x)Fe-59 | 1071,12 | | | |
| Fe-52 | Cu nat (p,x)Fe-52 | 8,275 | | | |
| Mn-56 | Cu nat (p,x)Mn-56 | 2,578 | | | |
| Mn-54 | Cu nat (p,x)Mn-54 | 7504,8 | | | |
| Mn-52 | Cu nat (p,x)Mn-52 | 134,184 | | | |
| Cr-51 | Cu nat (p,x)Cr-51 | 664,896 | | | |
| Cr-49 | Cu nat (p,x)Cr-49 | 0,7015 | | | |
| Sc-48 | Cu nat (p,x)Sc-48 | 43,67 | | | |
| Sc-47 | Cu nat (p,x)Sc-47 | 82,128 | | | |
| Sc-46 | Cu nat (p,x)Sc-46 | 2011,2 | | | |
| Sc-44 | Cu nat (p,x)Sc-44 | 3,927 | | | |
| V-48 | Cu nat (p,x)V-48 | 383,304 | | | |
| K-42 | Cu nat (p,x)K-42 | 12,36 | | | |
| Na-24 | Cu nat (p,x)Na-24 | 15,0 | | | |
| Na-22 | Cu nat (p,x)Na-22 | 22809,1 | | | |
| Be-7 | Cu nat (p,x)Be-7 | 1282,56 | | | |
| Cu-62 | Cu-63 (p,x)Cu-62 | 0,1623 | | | |
| Cu-62 | Cu-65 (p,x)Cu-62 | 0,1623 | | | |

Прогноз наведенной активности оборудования в помещении 101 важен как с точки зрения накопления долгоживущих радионуклидов в металле к концу срока эксплуатации установки, так и с точки зрения облучаемости персонала при оперативном обслуживании оборудования в процессе работы установки. Поэтому в табл. 8-9 радионуклиды отбирались с периодом полураспада от нескольких минут и более.

Энергетические зависимости сечений реакций активации железа протонами получены фитированием экспериментальных данных из библиотеки EXFOR [7]. Доступные сечения реакций активации железа нейтронами (как расчетные, так и экспериментальные) ограничены, т.к. отсутствуют данные по реакциям деления и многочастичным реакциям. Далее, сечения реакций из библиотеки ENDF ограничены сверху энергией нейтронов 20 МэВ, т.е. в программе при больших энергиях нейтронов сечение считается постоянным и равным значению сечения при энергии 20 МэВ. Это приводит к некоторой недооценке активации материала по вторичным нейтронам.

В расчетах была использована упрощенная модель магнита, в которой траектория движения протонов пучка была спрямлена. Для оценки мощности дозы гамма-квантов в нескольких точках вблизи магнита с учетом их ослабления в железе, весь объем магнита

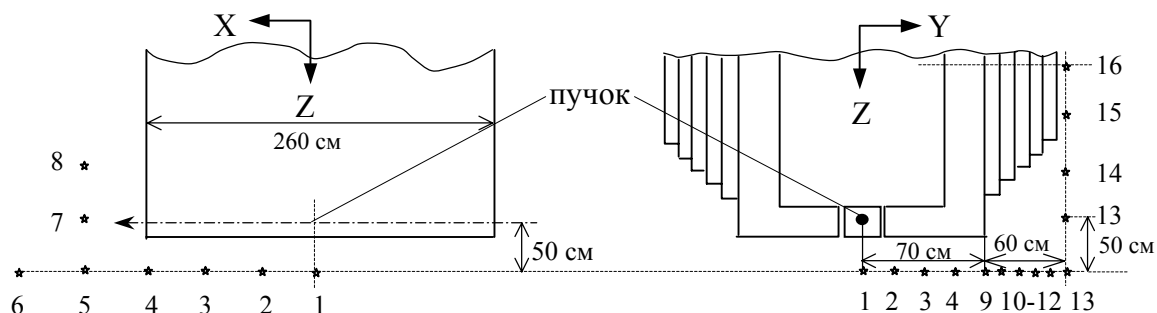


Рис. 6. Расположение точек расчета мощности дозы гамма-квантов вокруг магнита.

был разбит численно на ячейки. Для каждого радионуклида в каждой такой ячейке задавался источник гамма-квантов, соответствующий равномерно усредненной по ячейке активности данного радионуклида в насыщении и выходу гамма-квантов соответствующих энергий. Для расчета переноса гамма-квантов в материале магнита брались линии с энергией более 0,1 МэВ и выходом более 0,03 на распад. Полученное спектральное распределение гамма-квантов в выбранных точках вне магнита сворачивалось с энергетической зависимостью эффективной эквивалентной дозы гамма-квантов [1]. Расположение точек вокруг магнита показано на рис. 6. Точка 6 совпадает с началом траектории пучка во 2-м магните. Значения мощности дозы в точках 5, 7 и 8 умножаются на 2, т.к. в эти точки дают вклад оба магнита.

Расчет мощностей доз велся для активностей нуклидов в насыщении. Для оценки мощностей доз в заданный момент времени при планируемом расписании работы установки учитывались затем времена облучения в каждом сеансе и времена выдержки между сеансами. Предполагалось следующее расписание работы установки в течение срока эксплуатации (10 лет): в течение каждого года проводится равномерно 20 непрерывных сеансов длительностью по 50 часов. Следовательно, время выдержки между сеансами постоянно и равно 388 часа.

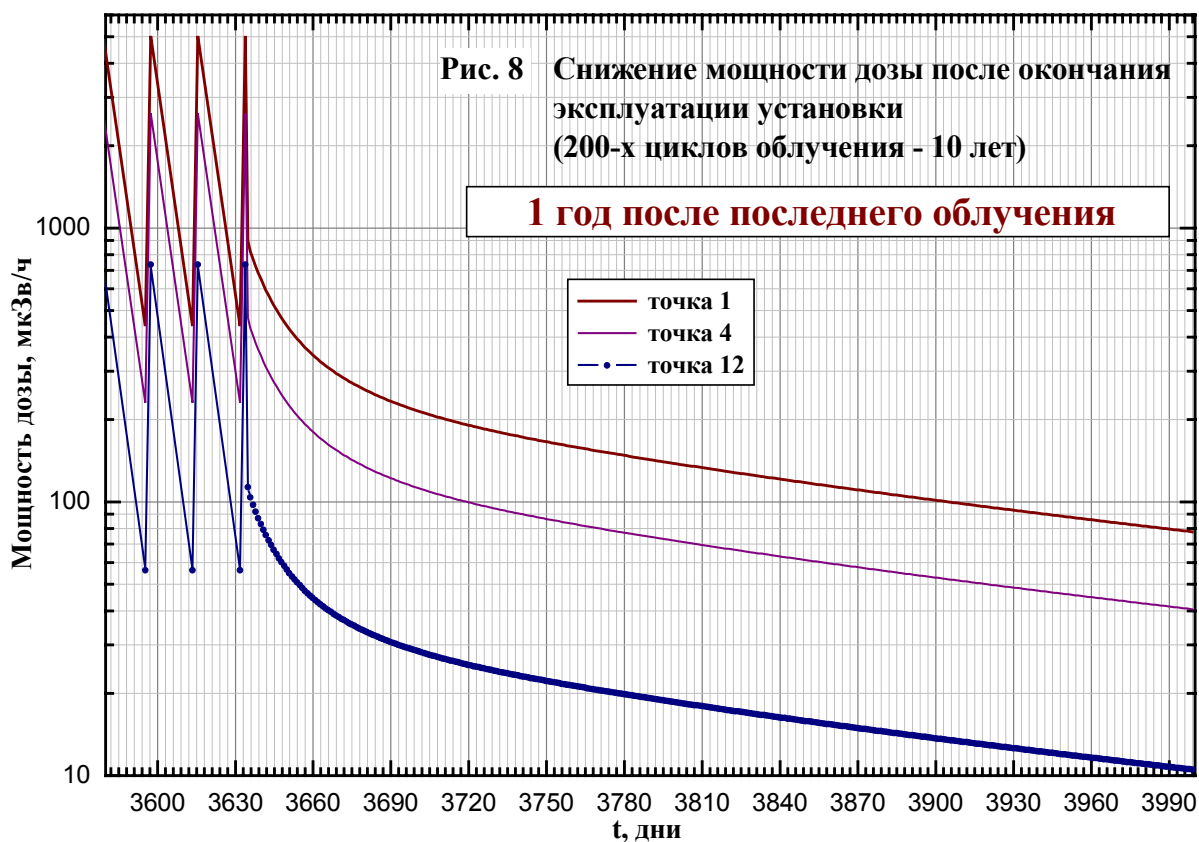
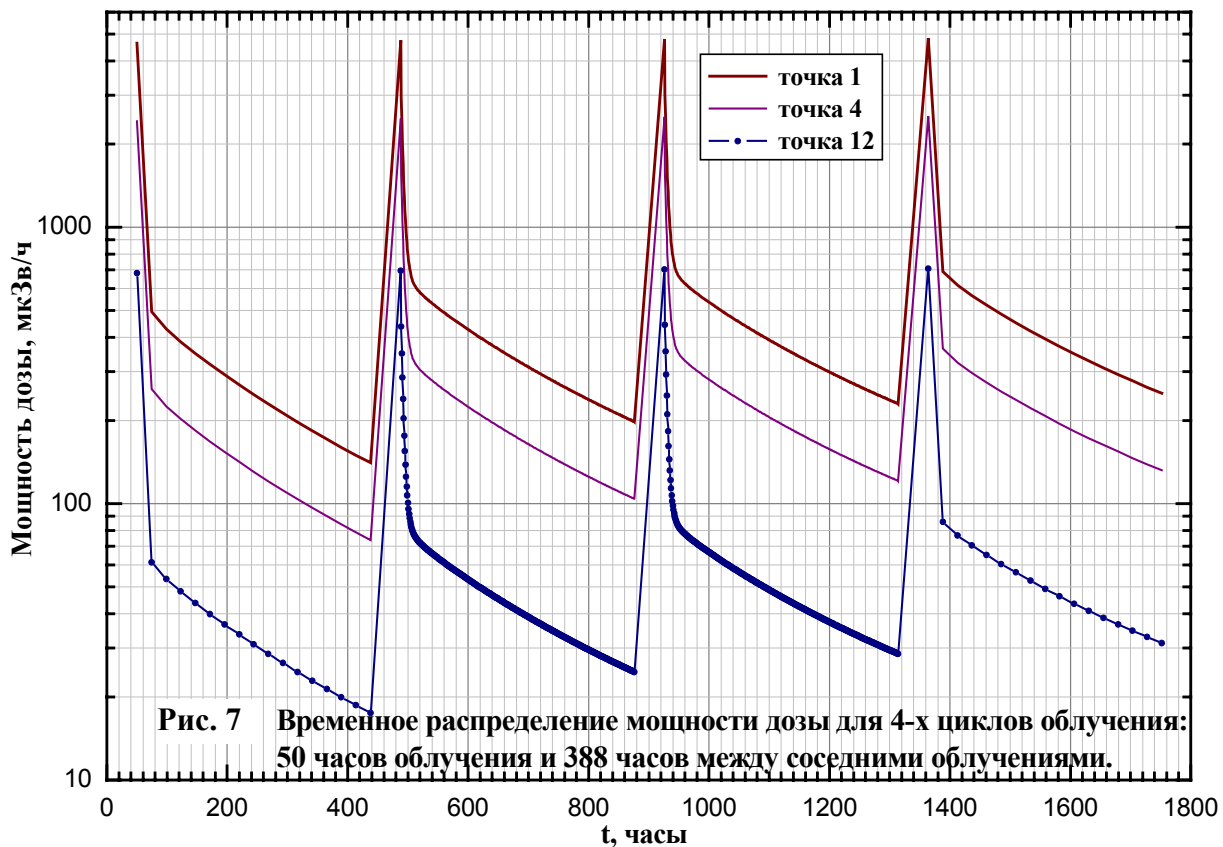
Из-за недооценки активации материалов нейтронами полученные значения мощностей доз гамма-квантов в выбранных точках умножались на коэффициент запаса 1,5. Значения прогнозируемых мощностей доз H (мкЗв/час) по сеансам (на конец облучения) приведены в таблице 10 для некоторых точек вокруг магнита.

Таблица 10.

| Номер сеанса (год) | Номер точки | H_1 | Номер точки | H_4 | Номер точки | H_7 | Номер точки | H_{13} | Номер точки | H_{15} |
|--------------------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|
| 1 (1) | 1 | 4,626E+03 | 4 | 2,412E+03 | 7 | 7,481E+02 | 13 | 3,297E+02 | 15 | 4,731E+00 |
| 10 (1) | 1 | 4,908E+03 | 4 | 2,561E+03 | 7 | 7,938E+02 | 13 | 3,464E+02 | 15 | 4,812E+00 |
| 20 (1) | 1 | 4,961E+03 | 4 | 2,588E+03 | 7 | 8,026E+02 | 13 | 3,498E+02 | 15 | 4,844E+00 |
| 40 (2) | 1 | 5,006E+03 | 4 | 2,612E+03 | 7 | 8,098E+02 | 13 | 3,527E+02 | 15 | 4,875E+00 |
| 60 (3) | 1 | 5,024E+03 | 4 | 2,621E+03 | 7 | 8,130E+02 | 13 | 3,539E+02 | 15 | 4,890E+00 |
| 100 (5) | 1 | 5,034E+03 | 4 | 2,627E+03 | 7 | 8,146E+02 | 13 | 3,546E+02 | 15 | 4,899E+00 |
| 200 (10) | 1 | 5,039E+03 | 4 | 2,628E+03 | 7 | 8,152E+02 | 13 | 3,549E+02 | 15 | 4,901E+00 |

Примечание: цифры в третьей колонке – значения мощностей доз гамма-квантов на конец сеанса.

Из таблицы 10 видно, что вклад долгоживущих радионуклидов в мощность дозы гамма-квантов от магнита невелик и после первого года эксплуатации установки уровни мощности дозы от магнита практически перестают меняться. С другой стороны, если



вначале работы установки за время перерыва между сеансами (388 час) мощность дозы от магнита падает ~ в 30 раз, то к концу срока эксплуатации установки мощность дозы за время перерыва будет снижаться в 11 раз из-за

накопления долгоживущих радионуклидов. Временное распределение мощности дозы гамма-квантов в некоторых точках вокруг магнита за первые 4 рабочих цикла приведено на рис. 7. Рис. 8 демонстрирует скорость распада активности в железе магнита в течение года после окончания срока эксплуатации установки.

Расчет мощности дозы гамма-квантов от активности, наведенной в двух парах квадрупольных линз после второго магнита (перед вводом пучка в активную зону), проводился для упрощенной геометрии линз (рис. 9) и в предположении гомогенной смеси материалов (Fe и Cu). При этом общая масса линз предполагалась равной 637,5 кг, а весовой состав смеси материалов задавался следующим: 76,47 % Fe и 23,53 % Cu. Габариты упрощенной цилиндрической модели линз для расчетов определялись таким образом, чтобы удовлетворить заданной массе. Расстояние от верхнего торца линз до бетонного перекрытия зоны задавалось равным 2,5 м. Потери на двух парах линз задавались равными 0,25 % протонов пучка.

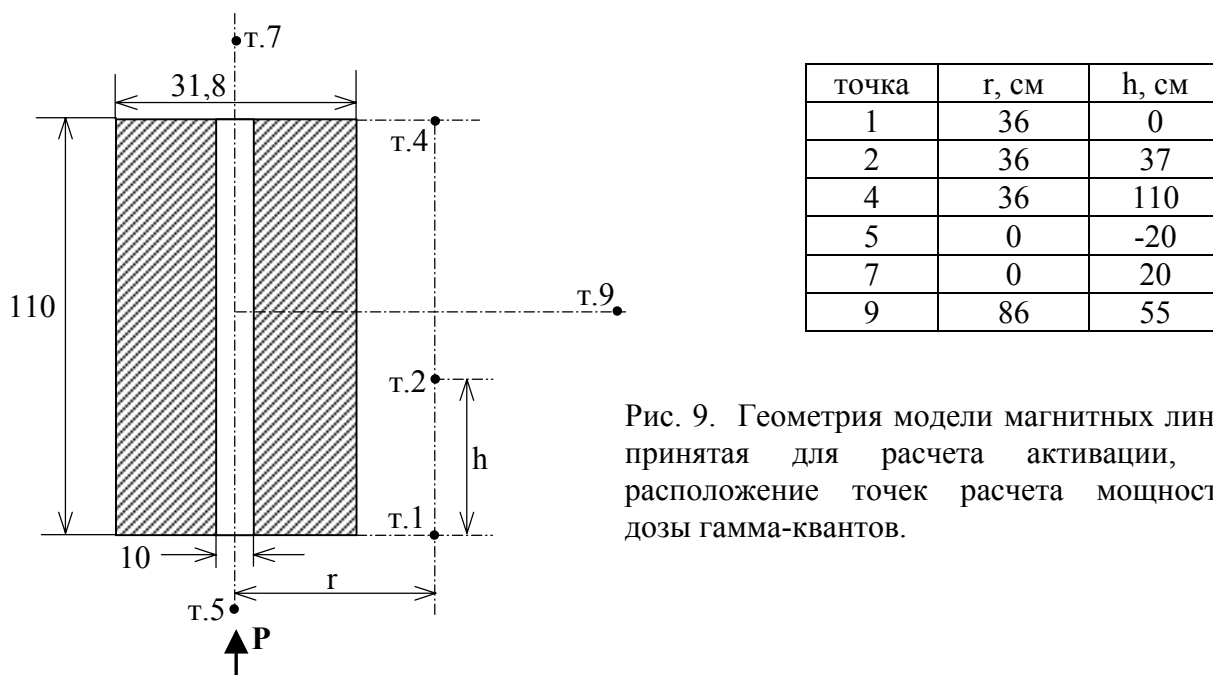


Рис. 9. Геометрия модели магнитных линз, принятая для расчета активации, и расположение точек расчета мощности дозы гамма-квантов.

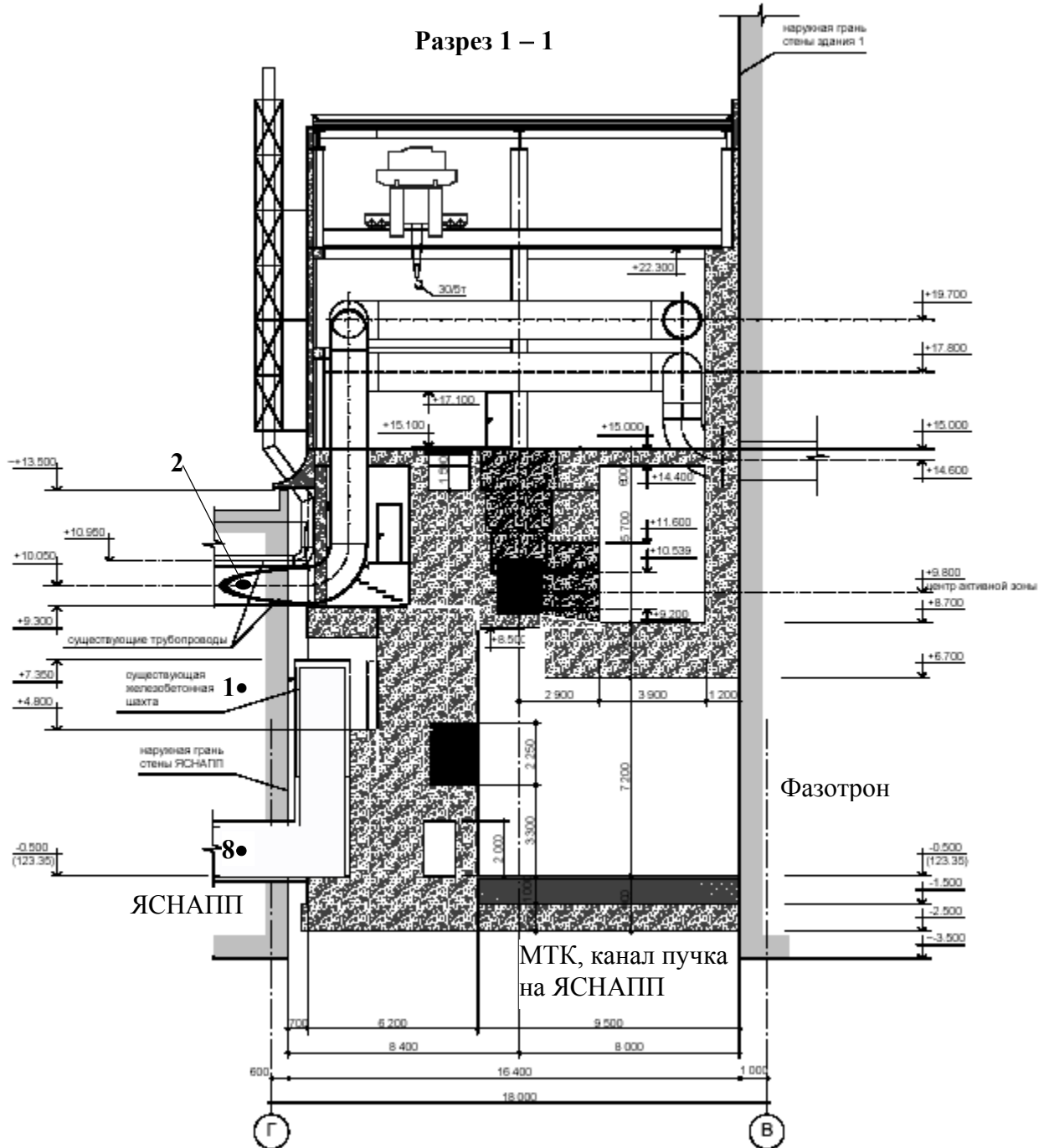
Значения прогнозируемых мощностей доз гамма-квантов H (мкЗв/час) по сеансам (на конец сеанса) приведены в таблице 11.

Таблица 11.

| Номер сеанса (год) | H_1 | H_2 | H_4 | H_5 | H_7 | H_9 |
|--------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1 (1) | 8,583E+03 | 1,146E+04 | 2,345E+03 | 1,323E+04 | 2,634E+03 | 2,483E+03 |
| 10 (1) | 8,913E+03 | 1,181E+04 | 2,367E+03 | 1,380E+04 | 2,702E+03 | 2,562E+03 |
| 20 (1) | 8,978E+03 | 1,189E+04 | 2,381E+03 | 1,391E+04 | 2,715E+03 | 2,579E+03 |
| 40 (2) | 9,029E+03 | 1,195E+04 | 2,393E+03 | 1,399E+04 | 2,727E+03 | 2,591E+03 |
| 60 (3) | 9,035E+03 | 1,197E+04 | 2,397E+03 | 1,402E+04 | 2,732E+03 | 2,597E+03 |
| 100 (5) | 9,060E+03 | 1,199E+04 | 2,399E+03 | 1,404E+04 | 2,735E+03 | 2,600E+03 |
| 200 (10) | 9,063E+03 | 1,200E+04 | 2,400E+03 | 1,405E+03 | 2,736E+03 | 2,601E+03 |

В целом, динамика распада активности в линзах в промежутке между сеансами и после окончания всего срока эксплуатации установки близка к той, что прогнозируется для магнитов, поскольку доля меди, создающей радионуклиды с большими периодами полураспада, относительно невелика в линзах. В то же время, уровни мощностей доз от линз, несмотря на меньшие в 4 раза потери пучка протонов, превышают уровни мощности доз от магнитов в 3-4 раза на примерно тех же расстояниях. Активация линз нейтронами

из активной зоны сборки незначительна, существенно более весом вклад в активацию нижнего торца линз от вторичных нуклонов, обусловленных потерями пучка во втором магните (сравнить точки 1; 5 и 4; 7). Суммарная мощность дозы гамма-квантов на тело человека, занятого оперативным обслуживанием систем диагностики пучка сразу же после отключения пучка, может составлять до 3-3,5 мЗв/час.



Приложение 1.

Исследования радиационной обстановки в 2004 г.

Радиационная обстановка на ближайшей территории вокруг фазотрона ЛЯП в период его работы является весьма напряженной. Это связано с недостаточностью существующей защиты фазотрона при возросшем после реконструкции токе выводимого из ускорителя пучка протонов. При работе ускорителя внешнее излучение за защитой фазотрона формируется как нейтронами утечки из защиты, так и многократно рассеянными в воздухе, почве и окружающих сооружениях нейтронами (эффект “skyshine”). Толщина внешней боковой защиты здания фазотрона – 2 м обычного бетона ($\rho = 2,4 \text{ г/см}^3$). Толщина сплошного верхнего перекрытия – 0,5 м обычного бетона, поэтому крыша здания является мощным источником вторичного нейтронного излучения во внешнюю среду. Для мониторинга радиационной обстановки вокруг здания ускорителя расположено пять стационарных датчиков радиационного контроля по нейтронам на основе пары термолюминесцентных детекторов ТЛД-600 и ТЛД-700 в полиэтиленовом замедлителе. Смена детекторов и определение интегральной дозы нейтронов во внешней среде производится ежеквартально. Район обваловки ускорителя и простенок между зданием фазотрона и зданием ЯСНАПП является при работе ускорителя, по существу, зоной спецдопуска и имеет физическое ограждение, не блокирующее полностью доступ людей в эту зону.

Измерения радиационной обстановки за западной защитной стеной ускорителя и в здании ЯСНАПП были проведены при различных режимах работы фазотрона.

1) Режим работы фазотрона на установку “ТРИТОН” (μ -катализ). Данный режим является наиболее жестким с точки зрения формирования радиационного поля на обваловке фазотрона в простенке между зданием ЯСНАПП и западной стеной ускорителя. Пучок протонов с энергией 660 МэВ тормозился в толстой углеродной мишени (54 г/см^2), установленной внутри мишенной станции в главном зале ускорителя. Расположение зданий и точек измерения приведены на рис. 10 (вид сверху) и 11 (разрез). Измерения выполнялись аттестованным и поверенным дозиметром нейтронов ДКС-96н с рабочим диапазоном до энергии нейтронов 20 МэВ. Значение мощности дозы в точке 1 непосредственно за защитой фазотрона скорректировано ($\times 1,3$) с тем, чтобы учесть вклад нейтронов с энергией более 20 МэВ по результатам измерения спектра нейтронов в данной точке.

В здании ЯСНАПП измерения были проведены за бетонной защитой со стороны фазотрона:

- а) на 1-м этаже у санпропускника (мощность дозы нейтронов пренебрежимо мала);
- б) на втором этаже в коридоре перед вентиляционной комнатой (3,4 мкЗв/ч);
- в) на третьем этаже у двери на пожарную лестницу (92 мкЗв/ч).

2) Вывод пучка на толстый углеродный поглотитель для сброса энергии протонов до ~ 200 МэВ, установленный вблизи защиты, разделяющей зал фазотрона и экспериментальный зал; транспортировка оставшейся части пучка через экспериментальный зал в Медико-технический комплекс (МТК), и затем в кабину протонной терапии (медицинский пучок);

3) Проводка пучка с энергией 660 МэВ из зала ускорителя через коллиматор в защите в экспериментальный зал, затем вывод пучка с помощью двух поворотных магнитов на первый этаж фазотрона на толстую π -мезонную мишень (тракт IX). Данный режим, с точки зрения формирования радиационной обстановки вокруг ускорителя, тождествен режиму проводки пучка протонов с энергией 660 МэВ через первый этаж в здание ЯСНАПП и далее в ловушку пучка.

Результаты измерений, нормированные на ток выведенного пучка протонов 1 мкА, приведены в таблице 12.

Таблица 12. Мощности дозы нейтронов (мкЗв/час) в различных режимах работы фазотрона при токе выведенного из камеры фазотрона пучка протонов 1 мкА.

| Точки измерений | Режимы работы фазотрона | | |
|-----------------|-------------------------|---------------------|----------------------------------|
| | Установка "ТРИТОН" | Медицинский пучок** | Тракт IX, π -мезонная мишень |
| 1 | 1628* | 490 | 555 (575)*** |
| 2 | 152,4 | 51,2 | 83,5 (84) |
| 3 | 31,7 | – | – |
| 4 | 4,6 | – | 2,0 (2,0) |
| 5 | 3,05 | 1,5 | 2,2 (2,5) |
| 6 | – | – | 106 (166) |

*Примечание: В спектре нейтронов в точке 1 содержится 37 % нейтронов с энергией более 20 МэВ, поэтому результаты измерений в т. 1 скорректированы ($\times 1,3$).

**В данном режиме излучение носит эпизодический характер, т.е. имеют место длительные паузы (до 30 и более мин) и короткие сеансы облучения пациентов (3-5 мин). Мощность дозы измерялась в течение сеанса облучения пациента.

***Результаты в третьей колонке вне скобок соответствуют гашению пучка протонов в ловушке пучка, результаты в скобках соответствуют облучению протонами толстой ($\varnothing 9,6$ см \times 45 см) свинцовой мишени.

В 2003 г. в режиме вывода пучка протонов током 1,5 мкА на толстую медную мишень (179,2 г/см²), установленную внутри мишенной станции в главном зале ускорителя измерялось дозиметром нейтронов ДКС-96н пространственное распределение мощности дозы нейтронов вдоль западной стены фазотрона. Результаты измерений представлены на рис. 12.

Помимо этого, в режиме вывода пучка протонов на толстую (36 г/см²) бериллиевую мишень в главном зале ускорителя (эксперимент ТРИТОН) было измерено вертикальное распределение мощности дозы нейтронов по стене фазотрона в районе точки 1 и вентиляционных проемов. Результаты, нормированные на ток пучка 1,5 мкА, приведены в таблице 13.

Таблица 13. Мощности доз нейтронов по вертикали западной стены фазотрона в районе точки 1 и вентиляционных труб.

| Расположение точки измерения | Мощность дозы, мкЗв/час |
|---|-------------------------|
| Отметка на 3 м ниже крыши фазотрона | 162,5 |
| Средняя часть стены фазотрона | 382 |
| Отметка на два метра выше вентиляционных труб | 2047 |
| Отметка между трубами | 2562 |
| Уровень обваловки (точка 1) | 1684 |

Одновременно были выполнены измерения мощности дозы на крыше фазотрона. В районе крыши над камерой и мишенной станцией мощность дозы составила 760 мкЗв/час по нейтронам и 14,5 мР/час по гамма-квантам.

Для измерения радиоактивности грунта на обваловке, наведенной за все время работы фазотрона, были взяты две пробы поверхностного слоя почвы в районе точек 1 и 2. Для сравнения, в качестве фоновой пробы, была взята проба почвы в районе деревни Юркино. Измерения наведенной гамма-активности проводились на низкофоновой установке с гамма-спектрометром на основе кристалла NaI(Tl) большого размера. Измерения не выявили какого-либо различия между пробами с обваловки и фоновой пробой, т.е. присутствуют только радионуклиды естественного происхождения в концентрациях, соответствующих средним значениям их концентраций в земной коре.

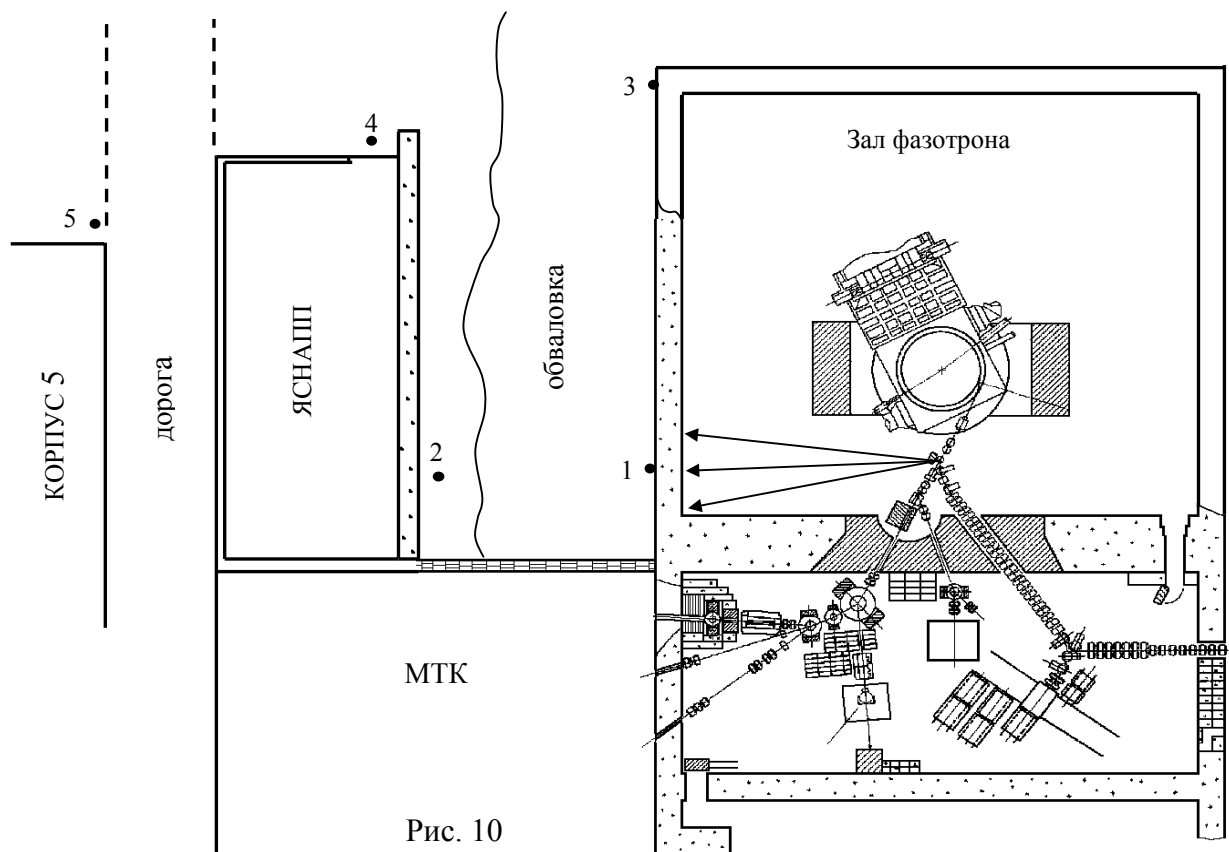


Рис. 10

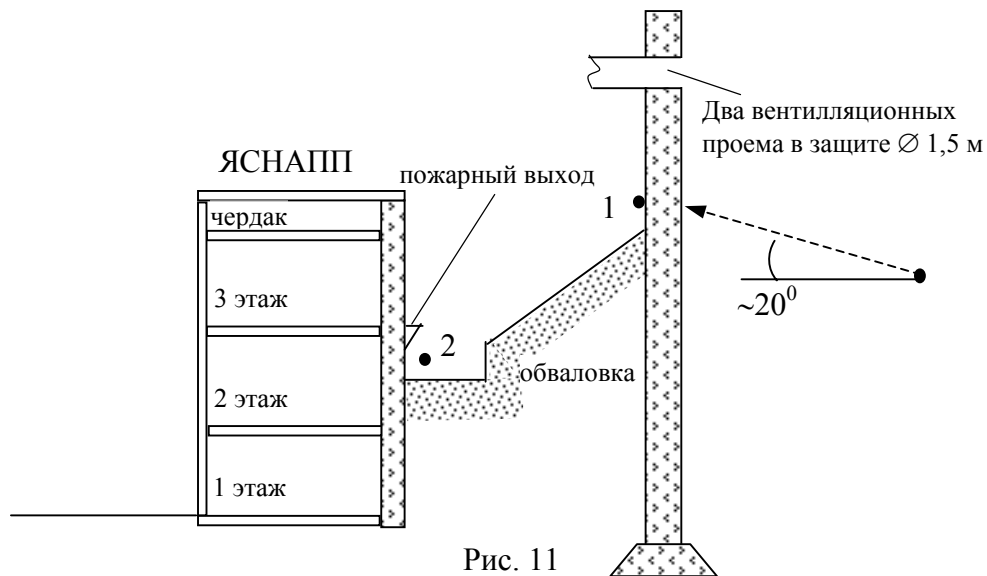


Рис. 11

ВЫВОДЫ

1. Наиболее критичной точкой является точка 5 (дорога). Измерения в ней проводились непосредственно у стационарного датчика радиационного контроля № 7 на углу корпуса 2. Здание ЯСНАПП исключает возможность прямого попадания излучения из боковой стены фазотрона в данную точку, поэтому поле нейтронов в ней формируется за счет многократно рассеянных нейтронов;
2. При проводке протонов в тракт IX больших потерь пучка в зале фазотрона нет, однако мощность дозы нейтронов в точке 1 в этом режиме практически та же, что и в режиме медицинского пучка. Это означает, что основным источником, формирующим мощность дозы в точке 1, являются потери протонов в камере на последних радиусах и на выводном устройстве. Отсюда следует, что заметно снизить значение мощности

- дозы в точке 5 при существующем состоянии фазотрона невозможно без кардинального улучшения качества вывода пучка из камеры или увеличения защиты;
3. Основной вклад в формирование поля рассеянных нейтронов в точке 5 дают нейтроны утечки из верхнего перекрытия здания фазотрона и нейтроны, прошедшие через проемы в защите. Это подтверждается тем, что значительное снижение мощности дозы нейтронов в локальной области поля в районе точки 1 (в ~ 3 раза) при изменении режима работы фазотрона приводит к снижению мощности дозы в точке 5 лишь на 30 %. Здание установки SAD полностью перекроет район точки 1, что приведет к снижению мощности дозы в точке 5 примерно на одну треть. Таким образом, защита активной зоны должна проектироваться таким образом, чтобы нейтроны утечки из её верхней части создавали бы в точке 5 мощность дозы рассеянных нейтронов не более 1 мкЗв/час. В этом случае радиационная обстановка в окружающей ускоритель среде при создании установки SAD не ухудшится по сравнению с нынешней ситуацией.
 4. В зале установки SAD над верхней защитой активной зоны мощность дозы нейтронов будет определяться не столько защитой зоны, сколько натеканием в зал медленных нейтронов из проемов в защите фазотрона. Частичное снижение мощности дозы таких нейтронов может быть достигнуто монтажом локальной защиты в зале.

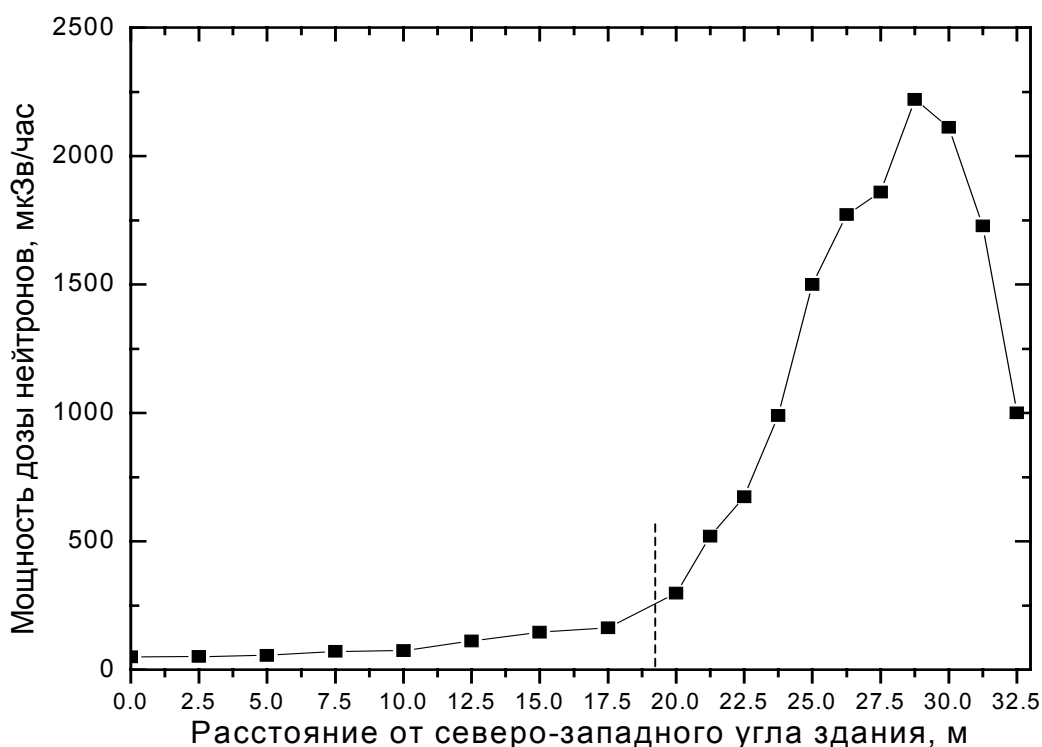


Рис. 12. Пространственное распределение мощности дозы нейтронов вдоль западной защиты фазотрона.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99): Гигиенические нормативы СП 2.6.1.758-99. М., Центр санитарно-эпидемиологического нормирования, гигиенической сертификации и экспертизы Минздрава России, 1999.
2. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности ОСПОРБ-99, М., Апрохим, 2000.
3. Положение № 1Р о порядке проведения работ в полях ионизирующих излучений в ОИЯИ, ОИЯИ 7-8011, Дубна, 2001.
4. RSICC Computer Code Collection. MCNPX 2.1.5. (Monte Carlo N-Particle Transport Code

- System for Multiparticle and High Energy Applications). LANL CCC-705, 2000.
5. Conversion Coefficients for Use in Radiological Protection Against External Radiation. Report of the Joint Task Group, ICRP Report No. 74, Pergamon Press, Oxford and New York, 1996, ICRP and ICRU Report No. 57, Bethesda, MD, 1998.
 6. Thomas R.H., Stevenson G.R. Radiobiological safety aspects of the operation of proton accelerators, IAEA Technical report series No. 283, Vienna, 1988.
 7. EXFOR System Manual, Brookhaven National Laboratory report BNL-NCS-63330, 1999.