

РАСЧЕТ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ ВЫСОКОИНТЕНСИВНОГО РЕЗОНАНСНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ

Николаев Владимир Рудольфович (otd4@expd.vniief.ru), Курапов Николай Николаевич, Опекунов Александр Михайлович

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Цель работы – провести оценку текущей биологической защиты и определить такую конфигурацию биологической защиты ускорительного зала, при которой поглощенная доза в эквивалентах биологической ткани не будет превышать допустимого уровня значений для персонала ускорителя.

Численными методами проанализированы радиационные условия за пределами помещения ускорителя при различных режимах его работы (средняя энергия электронов от 1,5 до 7,5 МэВ и ток пучка 40 мкА). Рассмотрены такие варианты модификации биологической защиты, как введение локальной свинцовой защиты и утолщение стен.

Расчетные данные могут быть использованы для модернизации биологической защиты помещения для размещения ускорителя, а также при переносе ускорителя в другое помещение.

Ключевые слова: ускоритель электронов, радиационная доза, численное моделирование, биологическая защита.

HIGH-INTENSITY RESONANT ELECTRON ACCELERATOR BIOLOGICAL SHIELD CALCULATION

Nikolaev Vladimir Rudolfovich (otd4@expd.vniief.ru), Kurapov Nikolay Nikolaevich, Opekunov Alexander Mikhailovich

FSUE «RFNC-VNIIEF», Sarov Nizhny Novgorod region

The research purpose is to evaluate current biological shield and to determine accelerator chamber biological shield configuration, whereby radiation-absorbed dose level in biological tissue equivalents would be lower than permissible irradiation level for personnel.

Numerical simulation methods were used for analysis of radiation environment outside of the accelerator chamber under different modes of operation – electron energy varied from 1,5 MeV to 7,5 MeV, electric current was constant 40 microampere. Such methods of upgrading biological shield as local lead screen insertion and wall augmentation were discussed.

Calculation data can be used to improve accelerator chamber biological shield or to transport accelerator to chamber with acceptable biological shield.

Keywords: electron accelerator, radiation dose, numerical simulation, biological shield.

Введение

В РФЯЦ-ВНИИЭФ создается резонансный ускоритель электронов БЕТА-8 [1] с высокой средней мощностью электронного пучка, который рассчитан на работу в импульсно-периодическом и непрерывном режимах.

Принцип ускорения электронов основан на многократном прохождении электронного пучка через

ускоряющие зазоры коаксиального полуволнового резонатора на уровне медианной плоскости (рис. 1). Максимальная энергия электронов (7,5 МэВ) достигается после пятикратного прохождения электронного пучка через ускоряющий резонатор.

Многократный проход электронов через ускоряющие зазоры резонатора осуществляется с помощью поворотных электромагнитов D1 – D4, расположенных снаружи корпуса резонатора. С помощью

электромагнитов D5 – D7 ускоренный пучок с различными энергиями электронов транспортируется к выводному устройству. Фокусировка осуществляется с помощью квадрупольных магнитов Q1 – Q9.

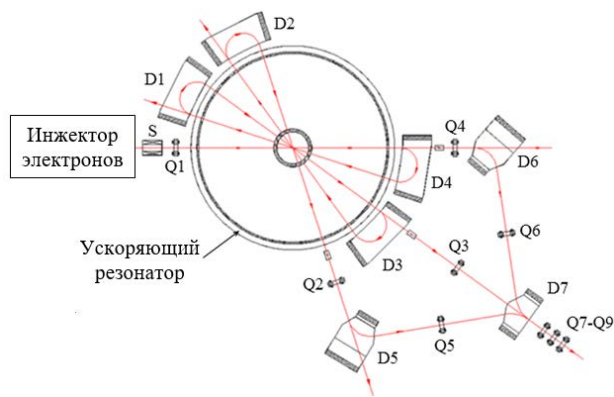


Рис. 1: Схема ускорения: D1 – D7 – поворотные дипольные магниты; S – фокусирующий соленоид; Q1 – Q9 – квадрупольные магнитные линзы; → – траектория движения пучка

Расчет конфигурации для помещения с размещенным ускорителем

В работе был проведен расчет поглощенной дозы от ускоренных электронов и тормозного излучения в аналогах биологической ткани в программе C-007, которая используется для решения систем связанных линейных уравнений переноса нейтронов, гамма-квантов, электронов и позитронов методом Монте-Карло [2]. Были смоделированы помещение и основные части ускорителя электронов. На рис. 2 приведена схема проведения расчета для первого прохода, соответствующего средней энергии ускоренных электронов 1,5 МэВ.

На рис. 2 стрелкой показано направление излучения из ускорителя. Помещение ускорителя электронов, рис. 2, окружено радиационной защитой из бетонных стен 7 толщиной 50 см. За стенами помещения находятся эквиваленты биологической ткани 8 (состав: O – 76 %, C – 11 %, H – 10 %, N – 3 %). Модели инжектора 4 и генераторов 5 представляют собой упрощенные геометрические фигуры из алюминия, модель резонатора 1 – из хромированной стали. Источник электронов 2 в виде диска диаметром 20 мм испускает электроны с энергией от 1,5 МэВ. Поскольку электроны приобретают нужную энергию после прохождения через резонатор 1, то для расчета источник размещается на выходе из резонатора. С каждым последующим проходом через ускоряющий резонатор средняя энергия ускоренных электронов возрастает на 1,5 МэВ – до 7,5 МэВ после пятого прохода. Пучок ускоренных электронов полностью поглощается в цилиндре Фарадея с образованием тормозного излучения.

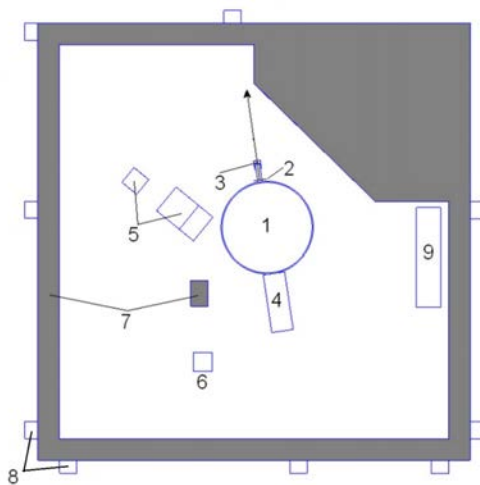


Рис. 2. Помещение ускорителя электронов, вид сверху (схема расчета для первого прохода): 1 – ускоряющий резонатор, 2 – источник электронов, 3 – цилиндр Фарадея, 4 – ВЧ инжектор, 5 – ВЧ генератор, 6 – генератор ВЧ инжектора, 7 – бетонные колонна и стены, 8 – образцы биологической ткани, 9 – кран

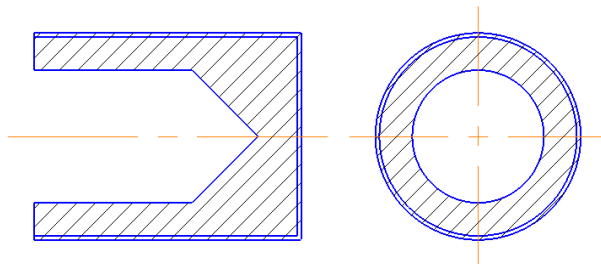


Рис. 3. Схема цилиндра Фарадея (в сечении)

Схема цилиндра Фарадея представлена на рис. 3. Цилиндр Фарадея 3, рис. 2, в расчете выполнен из алюминия со стальной окантовкой ($D = 7,5$ см, $h = 20$ см) и находится на расстоянии 50 см от источника электронов 2. Тормозное излучение, выходящее из цилиндра Фарадея 3, попадает в бетонную стену 7, за которой находятся эквиваленты биологической ткани 8, схема расположения которых приведена на рис. 2. Геометрические параметры образцов биологической ткани – $190 \times 30 \times 40$ см, плотность – $0,8$ г/см³. В расчетах принимается средний ток пучка ускоренных электронов ускорителя, равный 40 мкА. Необходимо рассчитать поглощенную дозу, накопленную в образцах, при каждом из режимов работы – от одно- до пятипроходного.

Ускоренные электроны со средней энергией 1,5 МэВ практически полностью поглощаются в цилиндре Фарадея. Энерговыведение от тормозного излучения было зафиксировано только в одном блоке с образцом биологической ткани, расположенном за стеной на пути выхода излучения из ускорителя (на рисунке 2 по направлению стрелки), и составило 0,23 эВ на 1 частицу. При пересчете на единицу массы образца, удельное энерговыведение составило $1,25 \cdot 10^{-6}$ эВ/г, что соответствует мощности дозы

$3 \cdot 10^{-4}$ рад/мин или $1,8 \cdot 10^{-4}$ Гр/час. Допустимая годовая доза для персонала группы А (20 мЗв в год) набирается за 111 часов при непрерывной работе ускорителя на заданном уровне мощности.

Расчеты показывают, что уровень излучения, образующегося после первого прохода через ускоряющий резонатор, является опасным для персонала, находящегося в смежных помещениях.

Аналогичные расчеты были проведены и для других режимов работы, от двух- до пятипроходного, в каждом из которых был зафиксирован опасный уровень излучения, сильно превышающий допустимый для персонала группы А.

Исходя из результатов расчета биологической защиты имеющегося помещения для размещения ускорителя электронов БЕТА-8, можно сделать вывод, что биологическая защита данного помещения не подходит для реализации режима безопасной работы ускорителя.

Расчет конфигурации с дополнительной свинцовой защитой

Одним из возможных путей модернизации является размещение дополнительной локальной свинцовой защиты, окружающей цилиндр Фарадея и тракт проводки пучка. Дополнительная защита представляет собой обкладку из свинцовых кирпичей с габаритами $5 \times 10 \times 20$ см. Пучок ускоренных электронов поглощается в цилиндре Фарадея, а затем тормозное излучение частично рассеивается и частично поглощается в свинцовой защите. Схема цилиндра Фарадея, окруженного свинцовой защитой, представлена на рис. 4. В расчетах ток пучка ускоренных электронов был принят равным 40 мкА.

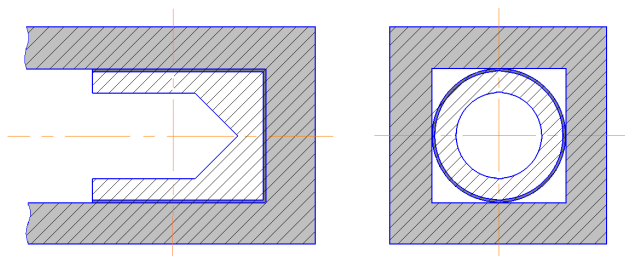


Рис. 4. Схема цилиндра Фарадея, окруженного свинцовой защитой (в сечении)

Расчеты показали, что при использовании локальной свинцовой защиты толщиной 10 см за пределами помещения опасного уровня излучения для персонала зафиксировано не было, за исключением случая пятипроходного режима работы ускорителя.

В пятипроходном режиме энерговыделение было выявлено только в блоке, стоящем на пути выхода ускоренных электронов из ускорителя, и составило 7,41 эВ на 1 частицу, что соответствует мощности дозы в 5,8 мГр/час, и набору годовой дозы за 3,4 ч.

Данный уровень излучения является опасным, следовательно, для пятипроходного режима работы

ускорителя требуется дополнительное увеличение слоя свинцовой биологической защиты.

Дополнительно для пятипроходного режима были проведены расчеты со свинцовой защитой толщиной 15 см, где энерговыделение составило 0,15 эВ на частицу, что эквивалентно мощности поглощенной дозы в 0,12 мГр/ч или времени набора годовой дозы в 169 ч, что больше безопасного уровня. И со свинцовой защитой толщиной 20 см, где энерговыделение было незначительно.

Согласно проведенным расчетам, было выявлено, что работа ускорителя вплоть до четырехпроходного режима работы не представляет радиационной опасности при применении дополнительной локальной защиты из свинца толщиной 10 см вокруг цилиндра Фарадея и тракта проводки пучка ускоренных электронов. В пятипроходном режиме работы ускорителя требуется увеличение толщины дополнительной свинцовой защиты до 20 см.

Недостатком данного метода является ограниченность его применения. Например, при работе с крупногабаритными объектами возведение дополнительного свинцового короба для объекта является весьма трудоемкой и затратной задачей.

Расчет конфигурации с утолщением стен

Для выполнения более широкого спектра задач потребуется увеличить толщину биологической защиты, что означает перенос установки в помещение с подходящей толщиной стен. Расчетным путем была определена толщина биологической защиты такого помещения, необходимая для безопасной работы персонала в смежных помещениях.

Из предыдущих расчетов следует, что толщина биологической защиты в 0,5 м является недостаточной, поэтому дальнейшие расчеты велись для стен толщиной не менее 1 м. В расчетах ток пучка ускоренных электронов составлял 40 мкА.

Расчет необходимой толщины биологической защиты при средней энергии электронов 7,5 МэВ

В первом расчете при пятипроходном режиме работы ускорителя толщины всех стен были приняты равными 1 м.

Энерговыделение было выявлено только в одном блоке биологической ткани, и составило 4,13 эВ на 1 частицу, что соответствует мощности дозы в 3,26 мГр/ч и набору годовой дозы за 6,14 часов, что является очень опасным уровнем облучения.

На рис. 5 темным прямоугольником выделен блок биологической ткани, в котором зафиксировано энерговыделение.

Во втором расчете толщина стены, на которую направлен пучок, была взята равной 1,4 м, остальных стен – 1 м.

Энерговыделение было также выявлено только в одном блоке биологической ткани и составило

0,73 эВ на 1 частицу, что соответствует мощности дозы в 0,57 мГр/ч и набору годовой дозы за 34,9 часов.

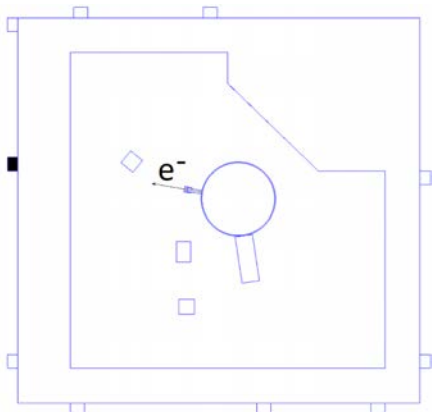


Рис. 5. Схема расчета для пятого прохода

В третьем расчете толщина стены, на которую направлен пучок, была увеличена до 1,5 м.

Энерговыведение было выявлено только в этом же блоке биологической ткани и составило 0,14 эВ на 1 частицу, что соответствует мощности дозы 0,11 мГр/ч и времени набора годовой дозы в 176 часов.

В четвертом расчете толщина этой же стены была увеличена до 1,6 м. Энерговыведение в том же блоке уменьшилось до 0,002 эВ на 1 частицу, что соответствует мощности дозы 1,6 мкГр/ч и является безопасной величиной.

Таким образом, для обеспечения безопасности в смежных помещениях в пятипроходном режиме работы, необходимо довести толщину стены, на которую направлен первичный пучок, до 1,6 метров.

Расчет необходимой толщины биологической защиты при средней энергии электронов 6 МэВ

В первом расчете при четырехпроходном режиме работы толщина стен была принята равной 1 м.

Энерговыведение было выявлено в двух блоках биологической ткани: блок 1 – 0,55 эВ на 1 частицу, что эквивалентно мощности дозы 0,44 мГр/ч и набору годовой дозы за 45,6 часов; блок 2 – 0,002 эВ на 1 частицу = 1,6 мкГр/ч, что является безопасной величиной.

Во втором расчете толщина стены, на которую направлен пучок, была увеличена до 1,1 м. Энерговыведение наблюдалось в этих же блоках: блок 1 – 0,28 эВ на 1 частицу, что эквивалентно мощности дозы в 0,22 мГр/ч и набору годовой дозы за 91,2 часа; блок 2 – 0,0002 эВ на 1 частицу (безопасная величина).

В третьем расчете толщина этой стены была принята равной 1,2 м.

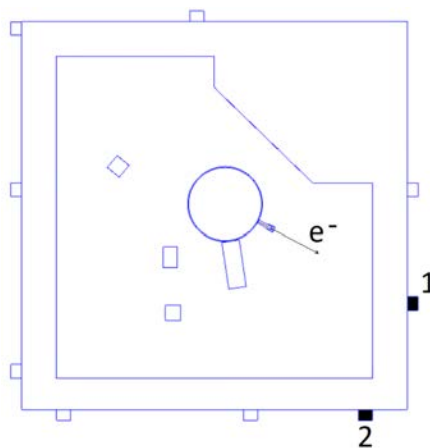


Рис. 6. Схема расчета для четвертого прохода: 1, 2 – блоки биологической ткани, в которых зафиксировано энерговыведение

Энерговыведение выявлено только в блоке 1 – 0,192 эВ на 1 частицу, что соответствует мощности дозы 0,15 мГр/ч, а набор годовой дозы происходит за 132 часа – превышение нормы облучения.

В четвертом расчете для стены, на которую направлен пучок, с толщиной 1,3 м энерговыведение в блоках биологической ткани было незначительно.

Таким образом, для обеспечения радиационной безопасности в смежных помещениях при четырехпроходном режиме работы, необходимо принять толщину стены, на которую попадает первичный пучок, не менее 1,3 метров.

Расчет необходимой толщины биологической защиты при средней энергии электронов 4,5 МэВ

В первом расчете при трехпроходном режиме работы толщина стен была равна 1 м. Энерговыведение было выявлено в 2 блоках биологической ткани: Блок 1 – 0,049 эВ на 1 частицу, что эквивалентно мощности дозы 38,7 мкГр/ч и набору годовой дозы за 517 часов (превышающий норму уровень излучения), блок 2 – 0,006 эВ на 1 частицу, что эквивалентно мощности дозы в 4,5 мкГр/ч и является безопасной величиной.

Во втором расчете толщина стены, на которую направлен пучок, была увеличена до 1,1 м.

Энерговыведение в блоке 1 – 0,018 эВ на 1 частицу (мощность дозы = 14,2 мкГр/час, годовая доза набирается за 1408 часов – потенциально опасная величина), в блоке 2 – 0,007 эВ, что соответствует мощности дозы 5,5 мкГр/час, то есть безопасной величине.

В третьем расчете толщина этой же стены была принята равной 1,2 м. Энерговыведение в блоках биологической ткани оказалось на незначительном уровне.

В итоге получаем, что 1,2 метра бетонной стены, находящейся на пути излучения, хватает для реализации работы установки в трехпроходном ре-

жиме, безопасном для персонала в смежных помещениях.

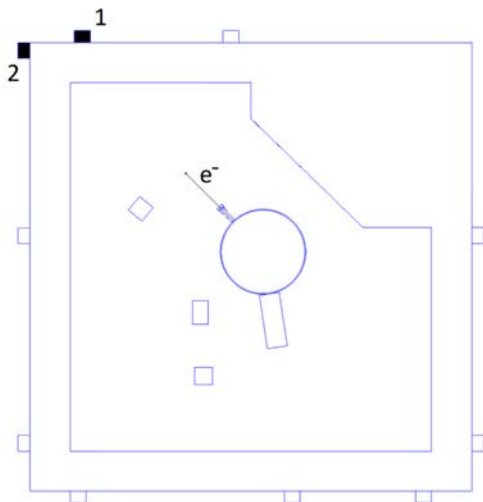


Рис. 7. Схема расчета для третьего прохода. Пронумерованы блоки биологической ткани, в которых зафиксировано энерговыделение

Расчет необходимой толщины биологической защиты при средней энергии электронов 3 и 1,5 МэВ

В расчетах при одно- и двухпроходном режиме работы толщина стен была принята равной 1 м. Энерговыделение в обоих случаях было незначительно, следовательно толщины в 1 м достаточно для обеспечения радиационной безопасности.

В результате проведенных расчетов можно утверждать, что при одно- и двухпроходном режимах работы ускорителя достаточно биологической защиты толщиной 1 м. В трехпроходном режиме необходимо утолщение стены, на которую направлен первичный пучок, до 1,2 метров, в четырехпроходном

режиме – до 1,3 метров, а в пятипроходном режиме – до 1,6 метров бетона.

Заключение

В работе представлены результаты численного моделирования работы ускорителя в помещении его размещения в различных режимах работы. В расчетах было показано, что толщина имеющихся стен биологической защиты недостаточна для безопасного функционирования ускорителя во всех режимах работы.

Была показана возможность введения дополнительной локальной свинцовой защиты в рамках текущего помещения, но ограничения на ее использование не позволяют остановиться на ней как на окончательном решении проблемы.

Были рассчитаны возможные толщины стен биологической защиты, обеспечивающие радиационную безопасность для разных режимов работы ускорителя, а также предложена конфигурация, позволяющая персоналу находиться в помещениях, смежных с ускорительным залом, без ограничения по времени.

Список литературы

1. Telnov A. V., Gordeev V. S., Zavialov N. V. Progress in CW Mode Electron Resonance Accelerator BETA-8 Development // Proceeding of XXV Russian Particle Accelerator Conference «RUPAC-2016», 2017. P. 185–187.
2. Житник А. К., Донской Е. Н. Методика С-007 решения методом Монте-Карло связанных линейных уравнений переноса нейтронов, гамма-квантов, электронов и позитронов // ВАНТ. Сер.: Математическое моделирование физических процессов. 2011. С. 17.