

# О выборе углеродных материалов для внутренней стенки ускорителей и каналов транспортировки ионов

А.А. Дроздовский, А.М. Козодаев, Ю.Я. Лапицкий

ГНЦ РФ Институт теоретической и экспериментальной физики, Москва, Россия

Ю.С. Виргильев

Научно-исследовательский институт "Графит", Москва, Россия

## Введение

Одним из основных требований, которым должны удовлетворять линейные ускорители с высокой мощностью пучка, является обеспечение такого уровня наведенной радиоактивности, при котором возможно непосредственное обслуживание ускорителя вскоре после его остановки. Это возможно только при достаточно малых потерях частиц в процессе ускорения. В ИТЭФ было предложен способ [1] решения данной проблемы путем замены традиционных для ускорительной техники материалов (медь, сталь) на материалы с малым сечением активации и низким уровнем остаточной активности. На рис. 1 приведены [2] сравнительные характеристики ос-

таточной радиации для случаев поглощения потерянных частиц в меди, алюминии, углероде и боре. Видно, что применение углерода и бора позволяет существенно снизить уровень радиоактивности ускорителя.

Ниже рассматривается возможность использования углеродных материалов для снижения наведенной радиоактивности протонного ускорителя ИСТРА-36, являющегося драйвером создаваемого в ИТЭФ нейтронного генератора [3].

## 1. Радиационная обстановка в выходной части ускорителя ИСТРА-36

Ускоритель ИСТРА-36 состоит из инжектора, начальной части с RFQ структурой на энергию 3 МэВ и основной части типа Альвареца, состоящий из двух частей: DTL-1 на 10 МэВ и DTL-2 на 36 МэВ. Проектный средний ток пучка 500 мкА. Поэтому для этого ускорителя проблема снижения наведенной активности является актуальной. Наиболее напряженная радиационная обстановка имеет место в оконечной части DTL-2 и в области канала транспортировки пучка к мишени нейтронного генератора.

При анализе радиационной обстановки предполагалось, что линейная плотность тока потерь равна 1 мкА/м. При этом мощность дозы неослабленного остаточного излучения в 1 м от канала транспортировки составляет ~2 р/час, если внутренняя стенка канала медная. Если принять во внимание, что потери пучка происходят в основном внутри линз, представляющих собой массивные металлические конструкции, эффективно поглощающие гамма-излучение, то реальное значение мощности дозы составит ~200 мр/час. Эта величина превышает почти в 10 раз допустимое значение при регламентированной работе обслуживающего персонала.

Если внутри канала разместить углеродные вставки, поглощающие потерянные протоны, то мощность дозы остаточного излучения будет снижена в 10 раз через 1 час после прекращения работы ускорителя и в 50 раз – через сутки. Таким образом, будут обеспечены допустимые радиационные условия для обслуживания установки.

Потери пучка сопровождаются образованием нейтронов. В случае поглощения ионов в медной стенке образуется  $8 \cdot 10^{10}$  н/с. При этом в выходной линзе ускорителя (диаметр апертуры равен 2 см, а длина – 15 см) плотность потока нейтронов достигает величины  $7 \cdot 10^8$  н/см<sup>2</sup>с, или  $2 \cdot 10^{16}$  н/см<sup>2</sup>год. Для линзы в вертикальном канале (где предполагается использовать магнитотвердые материалы) имеем соответственно  $1.5 \cdot 10^8$  н/см<sup>2</sup>с и  $4 \cdot 10^{15}$  н/см<sup>2</sup>год. Следовательно, при таком уровне потерь флюенс нейтронов за 10 лет превысит допустимый уровень для магнитотвердых линз  $10^{16}$  н/см<sup>2</sup>.

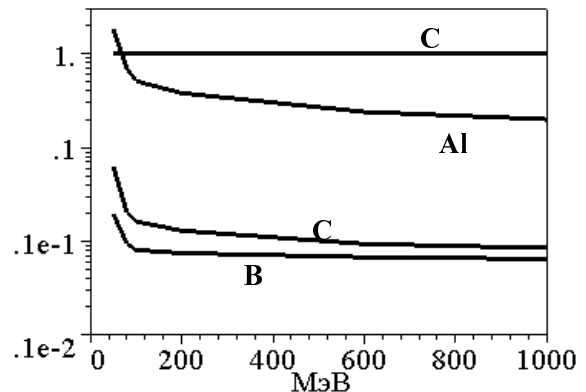


Рис. 1. Мощность дозы (в отн. ед.) через 1 сутки после облучения протонами тонких мишеней из Cu, Al, C и B в течение 5000 суток.

Если внутри канала разместить углеродные вставки, поглощающие потерянные протоны, то выход нейтронов будет снижен в 15 раз, и флюенс нейтронов за 10 лет не превысит допустимый уровень.

## 2. Геометрия слабоактивируемых вставок

Возможность эффективного использования слабоактивируемых материалов обусловлена особенностями транспортировки пучка в ускорителе. Фокусирующая система ЛУ имеет периодическую структуру, определяющую характер огибающей пучка. Максимальный размер огибающей пучка приходится на середину фокусирующей линзы. Это означает, что в этой области будут происходить основные потери частиц и, следовательно, именно здесь требуется использование материала с низкой активацией. Характерный аксептанс ускорителей легких ионов составляет порядка 10 мрад и, следовательно, их траектории проходят в тонком поверхностном слое. Глубина проникновения протонов увеличивается из-за многократного кулоновского рассеяния протонов на атомах стенки, но и с учетом этого эффекта толщина поглощающего слоя остается достаточно малой. Среднеквадратичная глубина проникновения протонов в стенку из углерода меняется в зависимости от энергии от 0,1 до 10 мм [1]. Для рассматриваемого ускорителя толщина стенки из углеродного материала не превышает 1 мм [2], и, следовательно, апертура ускорителя практически не уменьшается.

## 3. Радиационно-физические свойства углеродных материалов

В физических установках применяются следующие углеродные материалы: реакторный графит, пирографит, графит с однородной структурой (МПП), стеклографит и углеситалл. Они имеют различные физические свойства, в частности, величины их плотности варьируются в интервале 1,5–2,3.

Радиационные свойства материала интересны в трех проявлениях. Во-первых, физико-технические параметры детали из данного материала должны сохраняться в течение заданного срока эксплуатации в условиях радиационного фона ускорителя. Во-вторых, эрозия и другие поверхностные эффекты в результате непосредственного воздействия потока теряемых ионов не должны приводить к катастрофическим последствиям в пределах срока эксплуатации детали. В-третьих, воздействие потока теряемых ионов на поверхность детали не должно сопровождаться значительным газовыделением. Последнее относится, по сути, к вакуумным свойствам материала.

Вакуумные свойства можно разделить на “обычные” и проявляемые в условиях воздействия радиации. Но в любом случае в присутствии данного материала должна быть технически осуществима постоянная откачка вакуумного объема ускорителя до уровня остаточного давления  $\leq 10^{-6}$  Торр.

Радиационные свойства углеродных материалов подробно изучались при облучении быстрыми нейтронами реакторного спектра. Из опубликованных работ [4, 5] следует, что существенные изменения физико-технических свойств этих материалов наблюдаются при флюенсах, превышающих  $10^{20}$  н/см<sup>2</sup>. Поскольку для ионов с энергией, значительно превышающей 1 МэВ, подобных исследований не проводилось, то для оценки разумно использовать модель подобия структурных повреждений материала. Методика определения эквивалентных потоков для ионов, теряемых в ускорительном тракте, была предложена в работе [6]. Используя эту методику, получаем оценочную формулу для усредненного по толщине стенки эквивалентного потока нейтронов, если потери протонов происходят при энергии в интервале  $E_p = 10\text{--}50$  МэВ,

$$\Phi_{\text{экв}} = 2 * 10^{14} Z^2 E_p I_p / \pi R t L \rho, \text{ н/см}^2 \text{ год мкА/м.}$$

Здесь  $Z$  – атомный номер вещества стенки;  $I_p$  – плотность тока потерь в мкА/м;  $t$  – толщина внутренней стенки в мм;  $L$  – доля тракта, занимаемая фокусирующими элементами;  $\rho$  – плотность материала стенки;  $R$  – радиус апертуры в сантиметрах.

Отметим, что распределение плотности потока ионов в стенке является неоднородным, сильно спадающим к её наружной поверхности. Но вызываемые быстрыми частицами структурные нарушения в кристаллической решётке материала имеют свойство диффундировать в материале, приводя к более равномерному пространственному распределению. В нашем случае толщина стенки относительно мала, а время облучения велико, поэтому распределение структурных нарушений должно быть равномерным. Это делает обоснованным проведенное усреднение потока частиц по толщине стенки.

Оценим поток в линзе на выходе ускорителя, как находящейся в самых тяжелых условиях. Подставляя значения  $E_p = 36$  МэВ;  $I_p = 1$  мкА/м;  $R = 1$  см;  $t = 1$  мм;  $L = 0.3$  и  $\rho = 2$ , получаем  $\Phi_{\text{экв}} = 5 * 10^{17}$  н/см<sup>2</sup> год.

Таким образом, можно считать, что детали из углеродных материалов будут сохранять свои физико-технические параметры в течение достаточно длительной эксплуатации ускорителя.

Поверхностные радиационные эффекты, из которых наиболее важным является эрозия, исследовались при облучении вещества ионами с энергией меньше 1 МэВ [7]. В частности, при облучении углеродного материала углеситалла ионами гелия с энергией до 100 кэВ эрозия не наблюдалась при флюенсе  $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ , что соответствует флюенсу протонов  $3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$ . Если учесть, что в указанной области энергий величина порогового флюенса уменьшается с ростом энергии приблизительно, как  $E^{0.5}$ , то получаем оценку:  $\Phi_{\text{пор}}^{\text{пр}} > 3 \cdot 10^{20} \text{ протон/см}^2$ .

Для выходной линзы ускорителя “Истра-36” плотность потока равна  $10^{20} \text{ протон/см}^2 \text{ год}$  при потерях 1 мкА/м и с учетом наклонного падения ионов с углом скольжения 10 мрад (при таком угле плотность потока частиц в 100 раз превышает плотность потерь частиц). Таким образом, для углеситалла эрозия, возможно, не является ограничивающим фактором.

Для строгого заключения о радиационной стойкости углеродных материалов относительно эрозии требуется проведение экспериментальных и теоретических исследований. Отметим, что при энергии ионов больше 10 МэВ радиационная стойкость относительно эрозии мало изучена и для других, в том числе традиционных для ускорительной, техники материалов.

Что касается вакуумных свойств углеродных материалов, то литературных данных также не достаточно и необходимо проведение соответствующих экспериментальных исследований.

#### 4. О программе экспериментальных исследований углеродных материалов

Первым этапом программы является изучение вакуумных свойств образцов углеродных материалов, перечисленных выше. При этом должны быть определены условия их термического обезгаживания и отобраны образцы, имеющие наименьшую скорость газовой выделенной при рабочем давлении остаточного газа  $10^{-6}$ – $10^{-7}$  Торр.

На следующем этапе планируется исследование вакуумных свойств образцов выбранных видов материалов во время их облучения протонным пучком с энергией 25 МэВ и средним током 1 мкА. Целью исследований является определение скорости газовой выделенной облучаемых углеродных материалов при уровне радиации, соответствующем максимальной плотности потерь частиц на ускорителе ИСТРА-36. При этом критерием удовлетворительных вакуумных свойств материалов является возможность поддерживать рабочее давление при заданной производительности системы откачки ускорителя.

В заключение исследований предполагается проведение испытания выбранного материала в заданной геометрической конфигурации и при реальных напряженностях электромагнитных полей.

#### Заключение

Применение в ускорительном канале слабоактивируемых материалов позволяет решить проблему ручного обслуживания сильноточных ускорителей. Использование углеродных материалов особенно эффективно еще и потому, что они имеют малый выход нейтронов, а это позволяет снизить радиационные нагрузки до допустимого для магнитотвердых линз уровня.

Уверенность в разрешимости этой задачи подкрепляется тем, что в России производится целый ряд углеродных материалов, широко применяемых в современной науке и техники.

Проведенные к настоящему времени исследования вакуумных свойств углеродных материалов показали, что обезгаженные при температуре 500–600 градусов Цельсия образцы не обнаруживают своего присутствия в вакуумном объеме исследовательской установки. Оценки для всех углеродных образцов показывают, что их удельное газовыделение превышает среднее удельное газовыделение исследовательского объема не более чем в 10 раз. Наиболее достоверные результаты удалось получить для графита МПГ, после того как 15 пластин этого материала поместили в вакуумный объем. Удельное газовыделение графита МПГ оказалось равным  $10^{-5} \text{ м}^3 \text{ Па/с м}^2$ , что превышает среднее удельное газовыделение исследовательского объема в 3 раза.

#### Литература

- [1] A.A. Drozdovsky. “Induced Radioactivity Decrease Method in High Intensity Linacs”, EPAC 96, pp. 2621-2623.
- [2] A.A. Drozdovsky et al. “Analysis of beam losses and radioactivity reduction approach of high intensity linac”, Workshop “Radiation Protection Aspects of High Intensity Proton/Deuteron Accelerators”. September 1999, Legnaro, Italy.
- [3] A.M. Kozodaev et al. “Program of Activities for the Linac-Driver of ИТЕР Subcritical Facility”, PAC-97, pp. 1339-1341.
- [4] В.В. Гончаров и др. “Действие облучения на графит ядерных реакторов”. - М., Атомиздат, 1978.
- [5] Ю.С. Виргильев. “Углеситалл и его радиационная стойкость”. - Изв. АН, Неорганические материалы, 1995, т. 31, №1, с. 3-18.
- [6] А.А. Дроздовский. “К вопросу о радиационных эффектах и допустимых потерях частиц в сильноточных ускорителях на энергию до 50 МэВ”. - ПТЭ, 1980, №1, с. 32-36.
- [7] Н.В. Плешивцев, А.И. Бажин. “Физика воздействия ионных пучков на материалы”. - М., Вузовская книга, 1998.