

Радиационные последствия потерь пучка протонов с энергией 1 ГэВ

Ю.Т. Миронов

*Петербургский институт ядерной физики им. Б.П.Константинова РАН,
Гатчина, Россия*

Введение

Среди проблем создания электроядерного реактора для безопасного производства ядерной энергии особого внимания заслуживают радиационные проблемы протонного ускорителя — составной части такого реактора. Предполагается, что ускоритель должен обеспечивать ускорение протонов до энергии 1 ГэВ. Предварительный анализ радиационных проблем, связанных с подобным ускорителем, дан в работе [1]. В настоящей работе представлены некоторые результаты длительного радиационного мониторинга на Гатчинском синхроциклотроне, ускоряющем протоны до энергии 1 ГэВ, интенсивная эксплуатация которого в течение 25 лет может рассматриваться в данном контексте как своеобразный модельный эксперимент.

Номинальное значение тока выведенного пучка Гатчинского синхроциклотрона составляет 1 мкА при внутреннем токе 3 мкА. Основные потери протонов пучка, до 60%, происходят в области крайних орбит и сопровождаются интенсивным облучением деталей выводного устройства, вилок дуанта, полюсных наконечников магнита и стенок камеры синхроциклотрона. Характерные размеры камеры синхроциклотрона: “радиус” около 3.5 м, высота 0.5 м. Среднегодовое эксплуатационное значение тока выведенного и внутреннего пучков составляет 0.33 и 1 мкА соответственно при времени работы синхроциклотрона (за исключением последних лет) около 5000 часов в год. Именно такому эксплуатационному режиму соответствует большинство данных, приводимых ниже.

Длина наиболее протяженного тракта транспортировки выведенного пучка синхроциклотрона составляет 60 м [2]. Потери пучка в тракте не превосходят 10% или в среднем $\sim 1.6 \cdot 10^{-3}$ прот./ (м·прот.пучка).

1. Активация оборудования

Активацию оборудования будем характеризовать мощностью дозы гамма-излучения от наведённой в этом оборудовании радиоактивности. Приводимые значения мощности дозы, если это не оговорено, измерялись практически вплотную к поверхности оборудования.

Активация основного магнита и камеры синхроциклотрона после более чем 10-летней непрерывной эксплуатации и месячной выдержки характеризуется следующими величинами (мощность дозы в плоскости пучка рад/час):

Периметр камеры в районе размещения вариаторов	0.1
Периметр камеры со стороны выводного окна	1.8
На расстоянии 0.3–0.5 м от стенок камеры около Си-электрода	0.4

Мощность дозы в зазоре основного магнита после полного демонтажа камеры и всех внутрикамерных узлов на высоте 15 см над нижним полюсным наконечником 0.9 рад/час. Удельная активность полюсных наконечников около 1.3 мг-экв. Ra/кг Fe. Относительный вклад в дозу гамма-излучения различной энергии, МэВ/отн.ед: 0.835/1, 0.51/0.21, 0.983/0.13, 1.3/0.12, прочие менее 0.7. Определяющий изотоп ^{54}Mn , его вклад в мощность дозы $\sim 48\%$. Мощность дозы на наружных поверхностях балок основного магнита ≤ 0.3 мрад/час.

Активация оборудования протонного тракта, расположенного в главном зале ускорителя, после ~ 10 -летней эксплуатации и месячной выдержки, рад/час:

Триплет линз МЛ-10К50	~ 2.6
Мишенное устройство	0.4
Основной коллиматор	0.7
Поворотный магнит	0.4
Коллиматор на “входе” со стороны экспериментального зала синхроциклотрона в комплекс масс-сепаратора ИРИС	0.004

Следует обратить внимание на образование с н и м а е м о й радиоактивности на поверхности оборудования. Образование снимаемой радиоактивности — следствие коррозионных процессов на незащищенных поверхностях. Данные наблюдений свидетельствуют, что если в обычных условиях атмосферная электрохимическая коррозия начинается при влажности воздуха 60%, то под влиянием озона, образующегося около ускорителя, в зоне действия излучений критическая влажность, при которой начинается коррозия, снижается до 15–20%. Характерная скорость атмосферной коррозии для материалов группы железа составляет 70 мкм/год, группы меди и алюминия ~ 3 и 1 мкм/год соответственно. Величина снимаемой радиоактивности коррелирует со степенью активации оборудования и около синхроциклотрона на поверхностях материалов группы железа она доходит до 1.3 мкКи/м² (конструкции в головной части тракта транспортировки, радионуклиды ^{22}Na , ^{45}Ca , $^{46,48}\text{Sc}$, $^{52,54}\text{Mn}$), до 0.7 мкКи/м² для материалов группы меди (наружные поверхности деталей коллиматора до момента встраивания его в единый вакуумный тракт, радионуклиды те же, что для Fe плюс $^{57-60}\text{Co}$, ^{65}Zn) и 0.7 мкКи/м² для материалов на основе алюминия (дюралюминиевые стенки камеры синхроциклотрона). Снимаемая радиоактивность с поверхности дуанта и плакировок (материал медь) доходит до 6 мкКи/м² (по измерениям после месячной выдержки).

2. Активация воздуха

Активация воздуха около синхроциклотрона, особенно сопровождающаяся образованием сравнительно долгоживущих радионуклидов, в основном есть результат воздействия вторичных излучений на аргон, содержащийся в воздухе как естественная примесь.

Газообразная радионуклидная компонента в воздухе, выбрасываемом в атмосферу из зала синхроциклотрона, представлена ^{41}Ar , среднесуточная концентрация которого $\sim 6 \cdot 10^{-10}$ Ки/л.

Радиоактивные аэрозоли — компонента, оседающая на фильтрах при измерениях, представлены: ^{31}Si со среднесуточной концентрацией в выбросе $4.4 \cdot 10^{-12}$ Ки/л и ^{24}Na , ^{27}Mg , $^{32,33}\text{P}$, ^7Be с суммарной концентрацией в выбросе $1 \cdot 10^{-12}$ Ки/л.

Можно предположить, с учетом представленных данных, что при создании сильноточного ускорителя для электроядерной установки потребуются учитывать экологические последствия образования радиоактивных аэрозолей.

3. Технологические дозозатраты

Обслуживание оборудования, активированного в той степени, как это имеет место на синхроциклотроне, связано с акцептированием персоналом ускорителя значительных доз облучения.

В начальный период эксплуатации (около 5–6 лет) среднегодовая доза эксплуатационно-ремонтного персонала на Гатчинском синхроциклотроне не превышала 0.4 сЗв, коллективная — 46 чел·сЗв в год. В последующее 10-летие, несмотря на повышение надёжности оборудования, рост профессионального мастерства ускорительного персонала, продолжающаяся активация оборудования, увеличение тока пучка после модернизации ряда систем синхроциклотрона и интенсивное использование пучка в фундаментальных и прикладных исследованиях привели к увеличению среднегодовой дозы персонала до 1 сЗв, а коллективной — до 130 чел·сЗв в год. При таких значениях дозозатрат и существующем уровне потерь протонов очевидно, что среднегодовое значение тока выведенного пучка 1.5 – 2 мкА (а номинальное 5 – 6 мкА) есть тот предел, при превышении которого прямое использование персонала становится невозможным, и требуются принципиальные изменения в технологии обслуживания ускорителя.

Приведем данные по дозозатратам, касающиеся почти полного демонтажа активированного оборудования синхроциклотрона. Эти данные могут быть интересны как моделирующие в отношении дозозатрат вывод из эксплуатации того или иного ускорителя.

Полный демонтаж камеры и всех внутрикамерных узлов на Гатчинском синхроциклотроне был выполнен при модернизации магнитной системы после более чем 10-летней эксплуатации. Радиационные условия проведения работы приводились выше при рассмотрении активации оборудования. Дозозатраты составили 230 чел·сЗв. Из них 170 чел·сЗв были связаны с демонтажом и последующим монтажом камеры синхроциклотрона и внутрикамерных узлов, а 60 чел·сЗв — с непосредственной работой по модернизации в зазоре основного магнита. Максимальные индивидуальные дозы от 3 до 4 сЗв были достигнуты лишь в трёх случаях, во всех прочих случаях дозы не превышали 2.9 сЗв при среднем значении 1 сЗв. Ограничения доз индивидуального облучения при большом объеме работ, выполненных в жестких радиационных условиях, удалось достигнуть за счет тщательного планирования технологических операций, подготовки персонала и использования высокопроизводительного пневмоинструмента.

Заключение

Потери пучка протонов с энергией 1 ГэВ, как правило, сопровождаются сильным активированием оборудования. Реакции глубокого расщепления ядер, инициируемые протонами в материале оборудования, приводят к накоплению наведённой радиоактивности, к появлению локальных и распределённых мощных источников гамма-излучения. В ряде случаев это может затруднять или делать невозможной работу персонала по обслуживанию оборудования.

Для снижения активации оборудования (особенно при принципиальной невозможности избежать потерь) представляется перспективным рассмотреть возможность использования перехватчиков теряемых протонов аналогично тому, как это делается при более низких энергиях в сильноточных циклотронах при ускорении, например H^- -ионов. В качестве материала для таких перехватчиков могли бы быть использованы слабоактивируемые графит и нитрид бора.

Литература

1. В.П.Крючков, В.Н.Лебедев. Сб. докладов XIV Совещания по ускорителям заряженных частиц, Протвино, 25–27 октября 1994, т.4, с.138.
2. N.K.Abrossimov et al. PNPI Research Report 1994–1995, Gatchina, 1996, p.262.