

Регистрация потерь протонов с энергией 200–600 МэВ

Ю.П. Давыденко, И.В. Крупченков, Е.Н. Ломакин, В.С. Селезнёв, Ю.С. Ходырев

Институт физики высоких энергий, Протвино, Россия

М.Ю. Вражнов, В.К. Горбунов, М.И. Грачев

Институт ядерных исследований, Москва, Россия

В ИФВЭ и ИЯИ РАН выполнена совместная разработка системы контроля потерь протонов в трактах транспортировки на Московской мезонной фабрике (ММФ). Эта система ориентирована на измерение уровня вторичного (фонового) излучения, образуемого при потерях протонов, и предназначена для оперативного контроля нарушений нормального режима транспортировки пучка. Центральной задачей в разработке такой системы явился выбор типа и конструкции счетчика фоновых частиц (монитора потерь), что прежде всего определялось характеристиками вторичного излучения. Существенным для выбора типа монитора были также требования к его простоте, технологичности и надежности.

В настоящем сообщении изложены результаты расчетного исследования характеристик вторичного излучения для различных случаев потерь протонного пучка. Дается описание конструкции монитора и проиллюстрирована работа системы мониторов на реальном пучке.

Введение

Проектная энергия ускоренных протонов на ММФ равна 600 МэВ. Усредненная интенсивность пучка будет достигать 500 мкА. В настоящее время проводятся работы в диапазоне энергий протонов 200–400 МэВ. Выведенные из линейного ускорителя протоны проходят через систему отклоняющих магнитов и квадрупольных линз, которые формируют пучок с радиусом 2 см. Пучок транспортируется по цилиндрическому ионопроводу, изготовленному из стальной трубы с внешним радиусом 10 см и толщиной стенки 6 мм.

При транспортировке потеря протонов может происходить в результате взаимодействия их с установленными на пучке детекторами и перегородками, с остаточным газом в ионопроводе и со стенкой ионопровода в случае каких-либо сбоев в режимах магнитооптических элементов.

Для контроля потерь интерес прежде всего представляет фоновое излучение снаружи ионопровода, которое определяется главным образом процессами взаимодействия первичных протонов с веществом, развитием межъядерного адронного каскада (АК) и ионизационными эффектами. Поскольку эти процессы протекают в комбинированной системе сред с различной геометрией и материалами, то вторичное излучение получается сложным по составу, пространственно-угловому распределению и энергетическому спектру.

В указанном диапазоне энергий наиболее значительным компонентом излучения является нуклонный, поскольку развитие АК преимущественно определяется ядерными реакциями. Налетающий протон вызывает в ядре ядерно-нуклонный каскад, в результате которого из ядра вначале выбиваются нуклоны с относительно большой энергией. Затем из оставшегося возбужденного ядра происходит множественное “испарение” нуклонов. Вторичные нуклоны 1-й степени, в свою очередь, инициируют ядерные реакции и так далее. При высоких энергиях протонов будут образовываться также пионы.

В проведенном расчетном исследовании фонового излучения основное внимание уделялось определению характеристик различных компонентов. Расчеты проводились с помощью программы “MARS 96,18” [1]. В этой программе трехмерный АК моделируется методом Монте-Карло. Физическая модель может представлять гетерогенный массив, состоящий из различных материалов и позволяющий достаточно точно отображать реальную трехмерную геометрию оборудования и детекторов трактов транспортировки.

В ходе проведенных расчетов определялись характеристики протонного, нейтронного и пионного компонентов вторичного излучения на внутренней и наружной поверхностях ионопровода для различных случаев потерь первичных протонов. При этом наибольший интерес представлял протонный компонент, поскольку методы регистрации протонов менее сложны, чем нейтронов.

1. Взаимодействие пучка протонов с профилометром

Рассмотрен случай, когда в пучке находится фольговый вторично-эмиссионный профилометр с тремя плоскостями стальных фольг толщиной 20 мкм каждая и промежутками между ними по 5 мм. Плоскости фольг перпендикулярны оси пучка.

В расчетной модели профилометр представлен в виде железного диска диаметром 4.8 см и толщиной 1 см. Плотность железа в диске принята равной 0.0472 г/см^3 , что делает его эквивалентным по количеству вещества реальному профилометру.

Протонный пучок имеет двумерное гауссовское распределение плотности частиц по радиусу и нулевой угловой расходимостью. Дисперсия распределения (RMS) равна 1 см.

На рис. 1 приведены результаты расчетов продольной зависимости флюенса протонного и нейтронного компонентов вторичного излучения на наружной поверхности ионопровода для энергии первичных протонов 200; 400 и 600 МэВ. Значение $Z=0$ соответствует положению профилометра. Величина флюенса пронормирована на 1 протон первичного пучка. Все кривые на рис. 1 имеют явно выраженные максимумы, которые следует использовать для регистрации потерь. В области максимумов ($Z = 0.1-0.2 \text{ м}$) флюенс нейтронов превышает флюенс протонов примерно в 5 раз при энергии 200 МэВ, в 2.5 раза — при 600 МэВ.

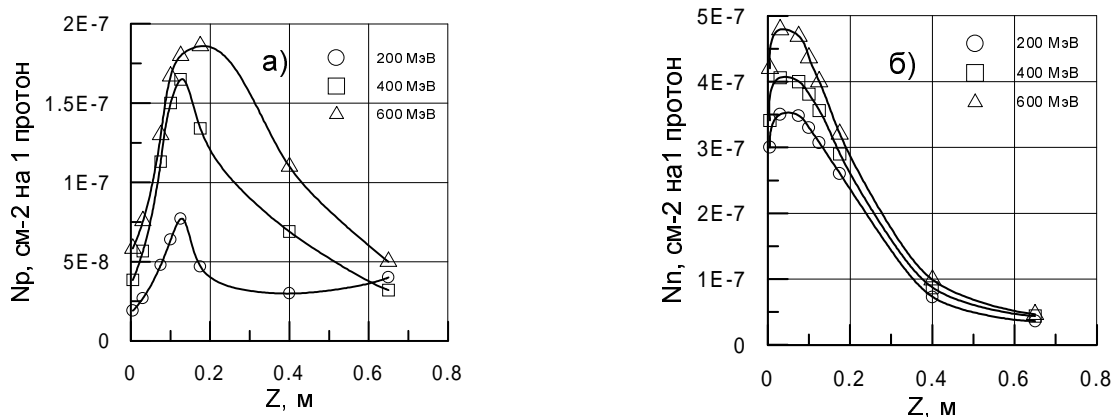


Рис. 1: Продольная зависимость флюенса протонов (а) и нейтронов (б) при потерях первичных протонов на профилометре.

2. Взаимодействие пучка протонов с остаточным газом

Параметры протонного пучка такие же, как и в предыдущем случае. В качестве остаточного газа в ионопроводе принят воздух при давлении 1 Па. Взаимодействие протонов с остаточным газом начинается с $Z = 0$. В этой расчетной модели вторичное излучение на наружной поверхности ионопровода растет с ростом Z , достигая постоянной величины при $Z \geq 2.5 \text{ м}$.

Соответствующие значения флюенса различных компонентов излучения приведены на рис. 2 в зависимости от энергии первичных протонов. Нормировка такая же, как на рис. 1.

3. Взаимодействие расходящегося пучка протонов с ионопроводом

В данном случае рассмотрено непосредственное взаимодействие первичных протонов со стенкой ионопровода в результате их высыпания из разбухшего по сравнению с нормальным осевого пучка. Распределения частиц по радиусу и углу — гауссовские с дисперсиями 1.5 см и 10 мрад соответственно. При этом обеспечивается однородное высыпание протонов на стенку по азимуту и длине ионопровода.

На рис. 2 и 3 приведен флюенс протонов, нейтронов и пионов снаружи ионопровода в зависимости от энергии первичных протонов. Значение флюенса пронормировано на плотность потерь, равную 1 первичному протону на 1 погонный метр длины ионопровода.

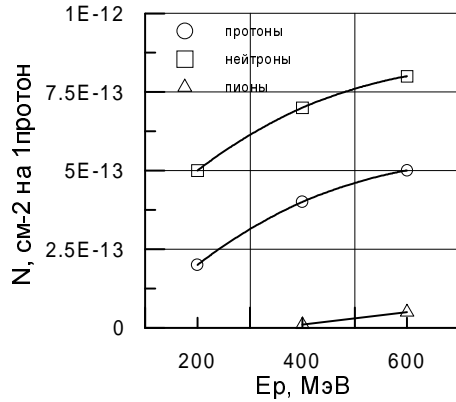


Рис. 2: Зависимость флюенса протонов, нейтронов и пионов от энергии первичных протонов при потерях на остаточном газе.

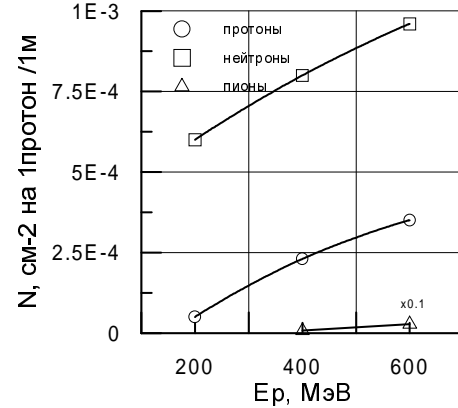


Рис. 3: Зависимость флюенса протонов, нейтронов и пионов от энергии первичных протонов при однородных потерях на стенке ионопровода.

4. Взаимодействие наклонного пучка протонов с ионопроводом

Прохождение пучка характеризуется ненулевым углом α по отношению к оси ионопровода. Остальные параметры пучка нормальные (дисперсия равна 1 см и расходимость нулевая). Формируемый источник вторичного излучения является существенно неоднородным по азимуту и оси ионопровода (такая ситуация возникает при нарушении режима работы отклоняющего магнита в тракте транспортировки).

Расчеты проводились для углов $\alpha=25, 50$ и 100 мрад. Для $\alpha=100$ мрад и трех значений энергии протонов (200; 400 и 600 МэВ) на рис. 4 приведены результаты расчетов продольной зависимости флюенса протонов, нейтронов и пионов снаружи ионопровода вдоль образующей со стороны падения пучка. Точка $Z = 0$ соответствует сечению, в котором α становится ненулевым и пучок начинает уходить с оси ионопровода. Флюенс пронормирован на 1 протон первичного пучка.

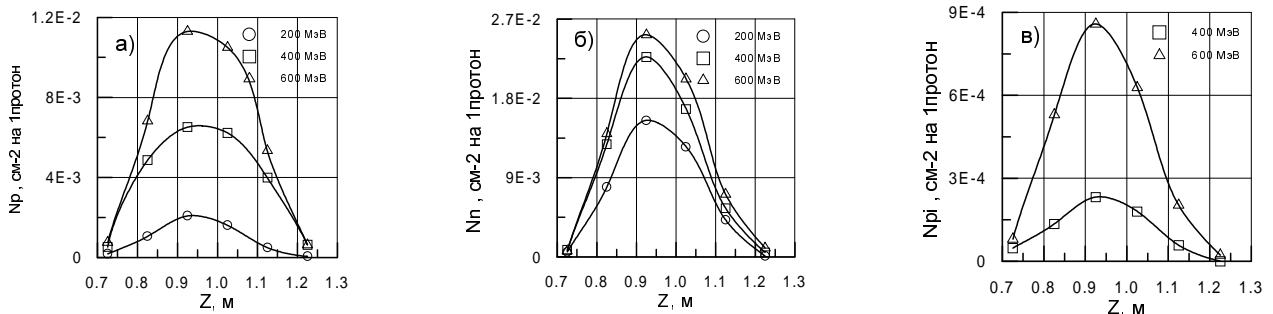


Рис. 4: Продольная зависимость флюенса протонов (а), нейтронов (б) и пионов (в) при падении пучка протонов на стенку ионопровода под углом 100 мрад к образующей.

На рис. 5 показана зависимость максимальных значений флюенса от угла наклона пучка к оси ионопровода. Для соответствующих продольных распределений флюенса зависимость положения максимума и ширины от угла в указанном диапазоне также имеет линейный характер, но с обратной пропорциональностью.

Флюенс всех компонентов излучения на диаметрально противоположной образующей цилиндра примерно в 50 раз меньше тех, которые приведены на рис. 4 и 5.

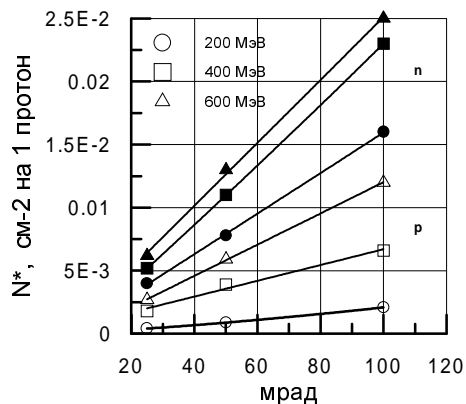


Рис. 5: Зависимость флюенса протонов и нейтронов от угла наклона пучка первичных протонов.

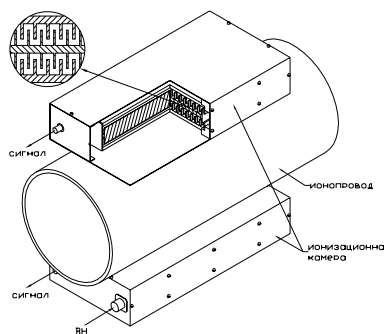


Рис. 6: Общий вид монитора потерь.

5. Монитор потерь пучка

В качестве монитора потерь пучка разработана воздушная ионизационная камера, конструкция которой чрезвычайно проста. Электродная система камеры изготовлена без какой-либо доработки из стандартного алюминиевого профиля типа ПВ, применяемого в качестве радиаторов для охлаждения радиокомпонент. Центральный электрод выполнен из двухстороннего, а крайние — из одностороннего профиля (рис.6). На керамических изоляторах с охраняемыми кольцами электродная система помещается в прямоугольный алюминиевый корпус.

Высоковольтное питание к ионизационным камерам подаётся по шлейфу, а сигналы по отдельным кабелям подаются на пультовую, где обрабатываются электроникой в широком (10^5) амплитудном диапазоне.

На рис. 7 приведены результаты расчетов энергетических спектров протонов и нейтронов на наружной поверхности ионопровода в нижнем и верхнем рабочих промежутках ионизационной камеры при энергии первичных протонов 400 МэВ.

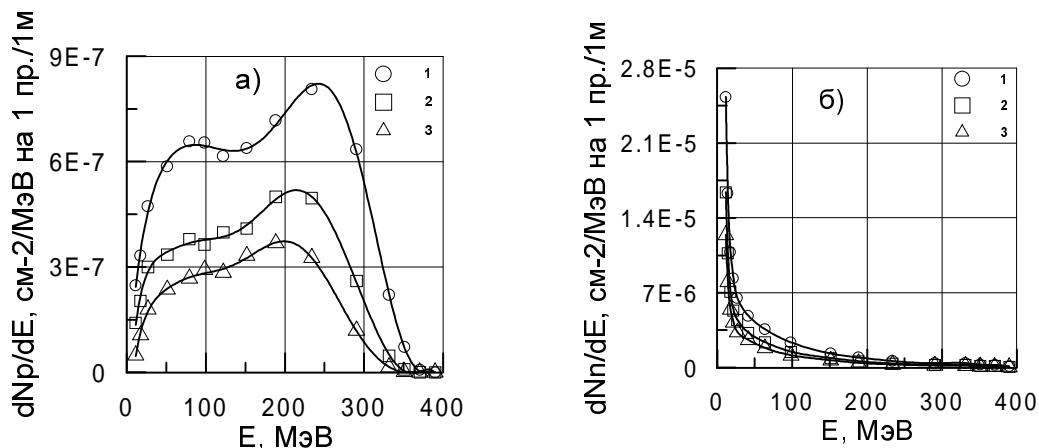


Рис. 7: Энергетические спектры протонов (а) и нейтронов (б) на поверхности ионопровода (1), в нижнем (2), и верхнем (3) промежутках монитора.

Пример распределения измеренных относительных потерь пучка вдоль трассы канала показан на рис. 8.

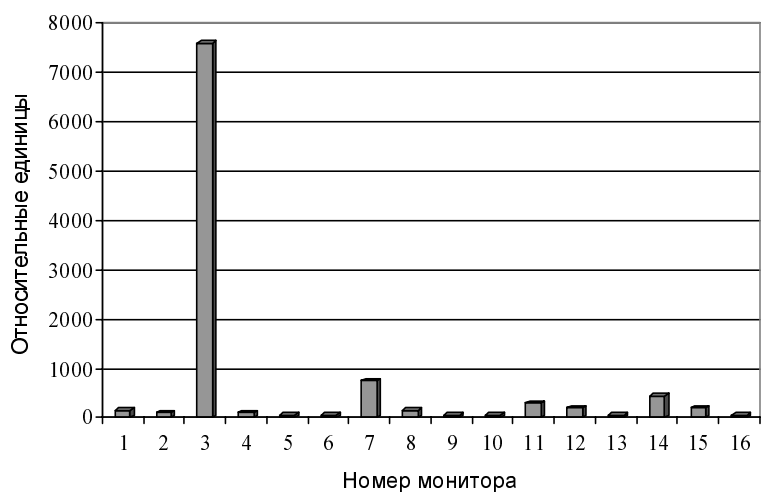


Рис. 8: Распределение относительных потерь пучка вдоль трассы канала.

Список литературы

- [1] I.Azhgirey et al. Proceed. XV Conference on Charged Particles Accelerators, Protvino, 1996, p. 74.