

Минимизация выхода высокоэнергетичных рассеянных протонов из системы локализации потерь пучка УНК

И.И. Дегтярев, А.Е. Лоховицкий, И.А. Язынин
ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий, Протвино, Россия

Введение

В работе рассматриваются оптимизация расстановки коллиматоров и выбор их апертур с целью минимизации выхода высокоэнергетичных рассеянных протонов из элементов системы локализации потерь. Используется аналитический и компьютерный графический подход к определению местоположения коллиматоров и их апертур в системе локализации потерь.

Производится статистическое моделирование процесса формирования пучка в УНК и определяются источники потерянных протонов. Проводятся траассы рассеянных протонов после их взаимодействия с элементами системы, по которым определяется правильность расстановки коллиматоров. Определяются положения щек коллиматоров на фазовых плоскостях в месте расположения рассеивающих элементов (мишени, поглотителя, предшествующих коллиматоров) и оценивается эффективность перехвата рассеянных протонов. Рассматриваются достоинства и недостатки систем локализации потерь с рассеивающей мишенью. Показывается, что относительная интенсивность протонов, вышедших после их взаимодействия с элементами системы в кольцо, составляет $\delta \sim 0,1\%$ для первой ступени УНК и $\delta \sim 0,01\%$ — для второй.

Перехватывающие коллиматоры

Для перехвата частиц, вышедших из скрепера, используется система коллиматоров. Оптимальное положение коллиматоров по азимуту ускорителя и раствор их щек [1-3] можно найти, исследуя траектории рассеянных протонов, которые определяются начальными координатами вылета из скрепера $x, x', \delta = \Delta p/p$ и магнитной структурой ускорителя

$$x = \sqrt{\frac{\beta}{\beta_0}} (\cos \Delta\psi + \alpha_0 \sin \Delta\psi) (x_0 - \eta_0 \delta + \Delta x) + \sqrt{\beta\beta_0} \sin \Delta\psi (x'_0 - \eta'_0 \delta + \Delta x') + \eta \delta, \quad (1)$$

где α, β — параметры Твисса; η, η' — дисперсия и ее производная; $\Delta\psi = \psi - \psi_0$ — набег фазы бетатронных колебаний от скрепера; $\Delta x'$ — угол рассеяния. Параметры с индексом "0" соответствуют местоположению скрепера.

В случае отсутствия дисперсии в системе $\eta_0, \eta = 0$ для частиц, находящихся на фазовом эллипсе с максимальной координатой x_0 , с учетом $\Delta x \ll x_0$, уравнение движения примет более простой вид

$$x = x_0 \sqrt{\beta/\beta_0} \cos \Delta\psi + \Delta x' \sqrt{\beta\beta_0} \sin \Delta\psi. \quad (2)$$

Размер пучка в месте установки скрепера при его обрезании до величины $m\sigma$: $x_0 = m\sqrt{\varepsilon\beta_0}$. Расстояние щек коллиматора от оси пучка $x_c = \pm n\sigma_c = \pm n\sqrt{\varepsilon\beta}$, где знак " + " берется, если скрепер и коллиматор расположены с одной стороны от пучка и " - ", если по разные. В этом случае коллиматорами перехватываются частицы с амплитудой, превосходящей $k\sigma$:

$$k^2 = m^2 + (\pm n - m \cos \Delta\psi)^2 / \sin^2 \Delta\psi. \quad (3)$$

Положение коллиматоров по азимуту ускорителя, при котором перехватываются рассеянные частицы с наименьшими амплитудами, найдем из (3)

$$\Delta\psi = \pm \arccos\left(\frac{m}{n}\right) + \pi i, \quad \text{где } i = 1, 2, \dots$$

В этом случае размер пучка, не взаимодействующего с коллиматором, совпадает с апертурой коллиматора, т.е. $k=n$. Коллиматоры желательно устанавливать как можно ближе по ходу пучка к скреперу ($i=0,1,\dots$), чтобы не облучать оборудование, стоящее между ними. Величина k определяется наиболее узким местом в ускорителе.

При взаимодействии частиц с мишенью или скрепером меняется не только поперечный угол, но и импульс. В случае наличия дисперсии положение провзаимодействовавшей частицы в месте расположения коллиматора можно представить в виде

$$x = \tilde{x} + \delta\xi, \quad \xi = \eta - \sqrt{\beta/\beta_0}(\cos \Delta\psi + \alpha_0 \sin \Delta\psi)\eta_0 - \sqrt{\beta\beta_0} \sin \Delta\psi \eta'_0, \quad (4)$$

где \tilde{x} — координата провзаимодействовавшей частицы с равновесным импульсом. Поэтому необходимо дополнительно рассматривать, каким образом будут обрезаться частицы с неравновесным импульсом на установленных вышеуказанным способом коллиматорах, откуда можно определить необходимость расстановки дополнительных коллиматоров.

Для уменьшения выхода рассеянных протонов из системы необходимо учитывать, чтобы их плотность на краях щек коллиматоров была как можно меньше. Если мы знаем нормированную угловую плотность частиц, рассеянных системой, мишень и скрепер $\rho_0(x')$, и их интенсивность I_0 , то плотность на кромке щек коллиматоров можно определить как

$$\rho = I_0 \rho_0(x') \cdot p(s), \quad \text{где } p(s) = \frac{1}{\sqrt{\beta\beta_0} \sin \Delta\psi}.$$

Построив на плане (рис.1) кривые $Ac = k(s)\sigma$, которые определяют расположение щек коллиматоров, перехватывающих частицы с амплитудами бетатронных колебаний, превышающими $n\sigma$, и зная функцию распределения плотности частиц на краях щек $p(s)$, можно достаточно просто определить оптимальное положение коллиматоров. Щеки коллиматоров желательно ставить в местах с наименьшей плотностью $p(s)$ и минимальным отношением $Ac(s)/\sqrt{\beta}$.

Для перехвата частиц с неравновесным импульсом необходимо знать зависимость $\xi(s)$ (рис.1), и в местах с достаточной величиной этой функции (4) поставить дополнительные коллиматоры.

Частицы, рассеиваемые мишенью или скрепером, могут приобрести значительное отклонение в вертикальной плоскости и, пройдя в щель горизонтальных коллиматоров, осесть на оборудовании. С целью перехвата таких частиц необходимо произвести установку минимум двух дополнительных щек коллиматоров в вертикальной плоскости. Дисперсия в вертикальной плоскости в кольцевом ускорителе обычно незначительна. Поэтому при расчете системы будем рассматривать только частицы с равновесным импульсом:

$$z = z_0(\sqrt{\beta/\beta_0} \cos \Delta\psi + \alpha_0 \sin \Delta\psi) + (z'_0 + \Delta z')\sqrt{\beta\beta_0} \sin \Delta\psi. \quad (5)$$

Для частиц с разными начальными координатами z_0 будут разные места оптимальной расстановки коллиматоров. Рассмотрим частицу с нулевой координатой $z_0 = 0$, которая равна средней величине координат частиц всего пучка. Такая частица при попадании на край коллиматора будет иметь угол $z'_1 = n\sqrt{\varepsilon/\beta_0}/\sin \Delta\psi_z$.

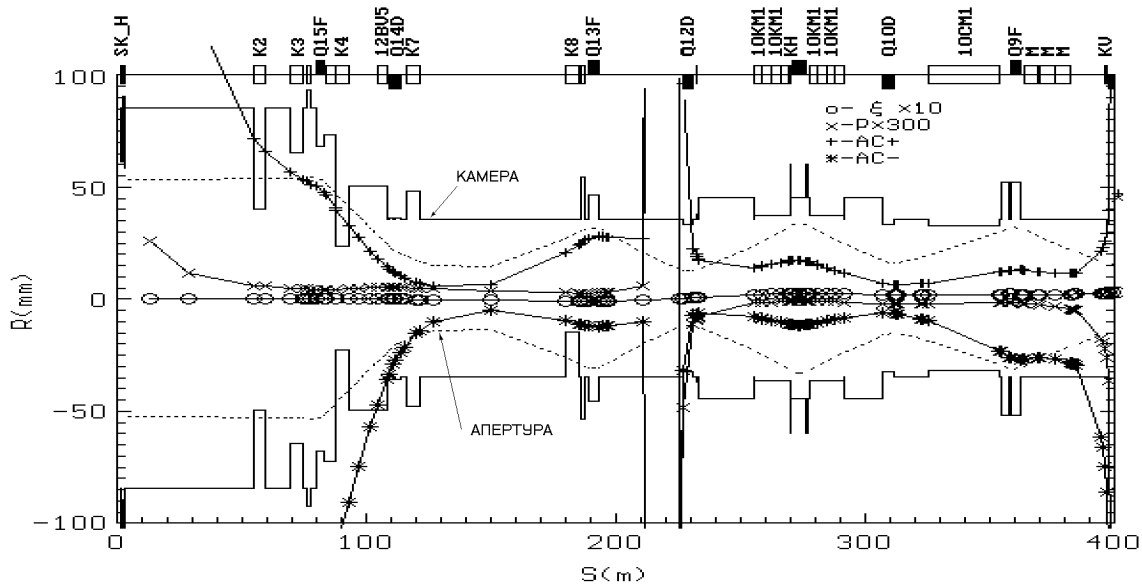


Рис. 1: Горизонтальный план СПП1, УНК-600.

Максимальная координата z бетатронных колебаний, которую может иметь рассеиваемый протон при выходе из скрепера $z_0 = m\sqrt{\varepsilon\beta_0}$, т.е. максимальная амплитуда частиц (в вертикальной плоскости), которые могут пройти в структуру ускорителя $A_z = k\sigma$, где $k^2 = m^2 + (\alpha_0 m + n/\sin \Delta\psi_z)^2/\beta$, и так как $\alpha_0 \simeq 0$ в месте установки скрепера в УНК-600, то $k^2 \simeq m^2 + n^2/\sin^2 \Delta\psi_z$. Тогда оптимальное место установки таких коллиматоров будет в случае $\Delta\psi_z = \frac{\pi}{2} + \pi i$, и максимальная амплитуда вертикальных бетатронных колебаний рассеянных частиц, которые пройдут в ускоритель, будет $A_z = \sqrt{m^2 + n^2} \sigma$.

Аналогично, как и в случае радиальной плоскости, построив на плане кривые $A_c(s)$ и $p_z(s)$, можно определить оптимальное азимутальное положение щек вертикальных коллиматоров.

Для наглядности процесса потерь на плане можно построить траектории частиц, выходящих из рассеивающего элемента с некоторыми углами рассеяния и импульсами. Места пересечений соответствующих траекторий с вакуумной камерой определяют местоположение ожидаемых потерь. При дальнейшем рассмотрении работы системы необходимо учитывать и коллиматоры как источники рассеиваемых протонов. Путем построения внутренних краев щек коллиматоров на фазовых плоскостях в месте расположения рассеивателя (мишени, скрепера, коллиматора и другого оборудования) можно определить оптимальность и достаточность расстановки коллиматоров.

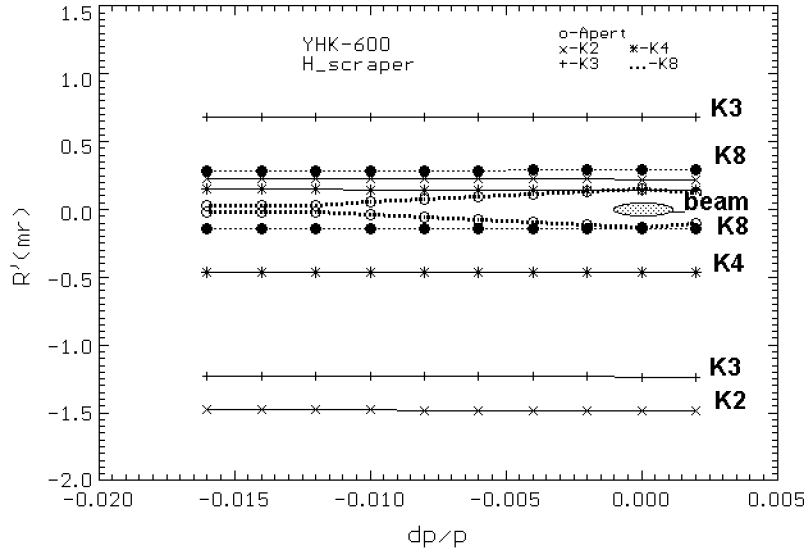


Рис. 2: Расположение щек коллиматоров на фазовой плоскости r', p в месте расположения горизонтального скрепера.

На рис.2 приведено расположение внутренних поверхностей щек и циркулирующего пучка УНК-600 на фазовой плоскости r', p . Двумерное рассмотрение возможно ввиду того, что протоны выходят из скрепера примерно с одной координатой $r = x_0$. Поверхности щек изображены линиями, определяемыми из (1), которые должны располагаться вне области циркулирующего пучка. Если в промежутке мало магнитных диполей, то линии будут почти параллельными оси абсцисс. При необходимости перехвата частиц с большим отклонением импульса коллиматоры надо ставить в нормальных периодах. Тогда линии, изображающие поверхности щек, будут иметь наклон, пропорциональный $\xi(s)$. Из рисунка видно дублирование щек, хотя для перехвата рассеянных частиц в одной из поперечных плоскостей достаточно двух, расположенных по разные стороны от циркулирующего пучка. Дополнительные коллиматоры служат для защиты оборудования в промежутке от частиц, образованных в результате ядерных реакций, и для перехвата рассеянных протонов с первых коллиматоров. На фазовой плоскости можно изобразить и наиболее узкие места в ускорителе. Зная распределение рассеянных системой протонов, можно найти потери частиц на коллиматорах и элементах ускорителя, рассматривая их последовательно по ходу пучка.

Ввиду того, что в вертикальной плоскости дисперсия близка к нулю, достаточно рассматривать фазовую плоскость z, z' . Края щек будут также изображаться прямыми линиями, а циркулирующий пучок и апертура — эллипсами (5).

Как показали численные расчеты, в кольцо УНК-600 будут проходить и теряться рассеянные протоны с большим отклонением импульса. При уменьшении апертуры коллиматоров полного поглощения количество таких частиц падает (рис.3). Потери в кольце составят $\sim 0,03\%$ при обрезании пучка коллиматорами до размеров $A_{r,z} = 20 - 25$ мм ($\beta = 152$ м). При использовании системы без мишени такие потери увеличатся вдвое.

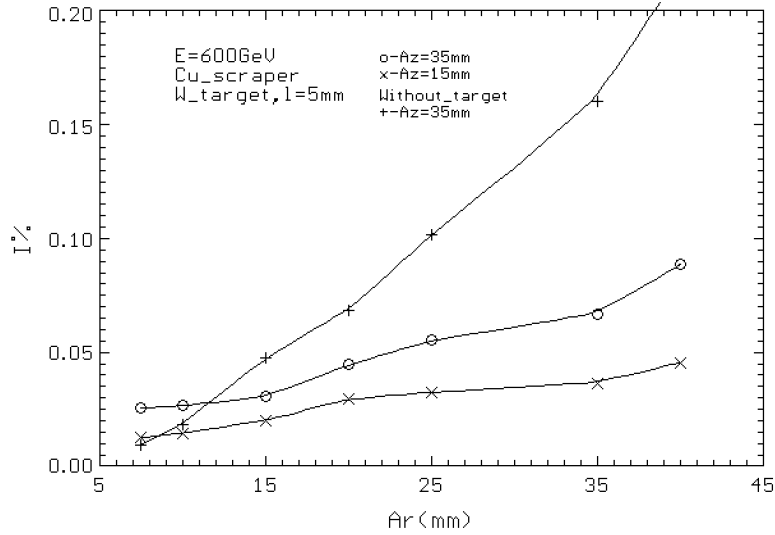


Рис. 3: Потери протонов в кольце от апертуры коллиматоров.

Дополнительные потери в кольце вносят частицы, рассеянные коллиматорами. Численные расчеты показали, что при малых энергиях интенсивность выхода протонов значительно выше, но доля частиц, прошедших в структуру, примерно одинакова, так как даже без использования дополнительных коллиматоров в кольце осядут частицы с углом рассеяния от $x'_1 \sim 0,1$ до $x'_2 \sim 0,2$ мрад. То есть количество таких частиц можно оценить $I \simeq 2\Delta x'_c \cdot P_c$, где $\Delta x'_c = x'_2 - x'_1$, а P_c — средняя угловая плотность протонов в этом интервале.

Для определения плотности рассеиваемых протонов на кромках коллиматоров необходимо знать нормированную угловую плотность протонов, вышедших из системы скрепер и мишень $\rho_0(x')$. Тогда плотность можно оценить: $\rho(x) = I_0\rho_0(x')/\sqrt{\beta\beta_0}\sin\Delta\psi$, а величина потерь таких частиц в кольце составит $I = I_0\lambda$, где $\lambda = 2\frac{\Delta x'_c \cdot P_c \rho_0(x')}{\sqrt{\beta\beta_0}\sin\Delta\psi}$. Для УНК-600 коэффициент ослабления составит $\lambda \sim 4 \cdot 10^{-5}$, но с учетом дополнительного рассеяния протонов, вышедших из скрепера и мишени, на других коллиматорах, кроме первых, реальный коэффициент увеличивается вдвое. При использовании системы без мишени эта доля потерь удваивается. То есть основной вклад в потери в кольце вносят протоны, имеющие значительное отклонение импульса. Для сверхпроводящих ускорителей особенно важен перехват таких протонов. В УНК-3000 дополнительными коллиматорами удастся снизить уровень потерь в кольце до 0,01% от локализуемой интенсивности пучка.

Список литературы

- [1] M.A.Maslov, N.V.Mochov and I.A.Yazynin. SSCL-,SSC Laboratory (1991).
- [2] L.Burnod, J.B.Jeanneret. “Beam losses and collimation in the LHC: A quantitative approach”, CERN SL/91-39 (EA), LHC Note 167.
- [3] P.J.Bryant, E.Klein. “The design of betatron and momentum collimation systems”, CERN SL/92-40 (AP), SL Division (1992).