

Выбор конструкционных материалов элементов системы локализации потерь пучка УНК

Ю.С. Федотов, И.И. Дегтярев, А.Е. Лоховицкий, М.А. Маслов, И.А. Язынин
ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий, Протвино, Россия

Введение

Одной из основных задач при проектировании циклического ускорителя является разработка надежной и эффективной системы локализации потерь [1]. Кроме оптимальной компоновки оптической структуры с целью минимизации выхода рассеянных протонов в кольцо ускорителя и уменьшения теплового разогрева и радиационного облучения элементов системы и близлежащего оборудования, определяющее значение для работоспособности системы имеет выбор конструкционных материалов мишени, скрепера, коллиматоров, обеспечивающих их длительное функционирование в условиях значительных тепловых и радиационных нагрузок.

Условия тепловой нагрузки элементов рассматривались при трех возможных режимах работы системы:

- 1) квазистационарный режим работы — медленное скрепирование гало пучка;
- 2) перехват частиц, незахваченных в режим ускорения;
- 3) аварийная ситуация — поглощение системой гало пучка за несколько оборотов.

При стационарном режиме работы важна хорошая теплопроводность λ элементов системы для быстрого отвода тепла. При мгновенном поглощении системой энергии пучка для предотвращения ее разрушения необходимо выбрать материал с большой теплоемкостью C_p , температурой плавления $T_{пл}$ и термомеханической стойкостью. Параметры некоторых из рассматриваемых материалов приведены в табл.1.

Таблица 1

	C_p Дж/г×гр	ρ г/см ³	λ Вт/см×гр	$T_{пл}$ °C	L_r мм	$\sim 6L_n$ м
W	0.134	19.34	1.686	3380	3.5	0.6
Cu	0.388	8.93	3.896	1083	14.3	0.9
Al	0.896	2.7	2.093	660	89.	2.4
Fe	0.440	7.88	0.744	1535	17.6	1.0
C	0.670	2.3	0.980	3540	188.	2.4

Выбор материала мишени

При формировании пучка системой локализации потерь с рассеивающей мишенью заброс частиц на нее незначительный [2], в результате чего происходит сильный разогрев ее кромки, что может привести к разрушению материала мишени, а затем и самого скрепера. При использовании тонких мишеней плотность энерговыделения протонов в материале практически постоянна и незначительно зависит от энергии.

Разогрев мишени можно представить процессом одномерной диффузии при наличии источника тепла:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + p(x, t), \text{ где } \kappa = \frac{\lambda}{C_p \rho}.$$

В стационарном случае локализации потерь источник тепла можно считать точечным $p(x, t)|_{x=0} = p_0$, и изменение температуры будет [3]

$$T(x, t) = 2p_0 \sqrt{\frac{t}{\pi\kappa}} \times e^{-x^2/4\kappa t} - \frac{p_0 x}{\kappa} \left(1 - \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{x/2\sqrt{\kappa t}} e^{-s^2} ds\right).$$

После окончания процесса формирования пучка продолжительностью t_s температура наиболее разогреваемой области кромки мишени будет $T = 2p_0 \times \sqrt{\frac{t_s}{\pi\kappa}}$.

Если предположить, что пучок распределен по нормальному закону в плоскости, перпендикулярной забросу, то максимальная плотность частиц $I_{z_{max}} = \frac{I_0}{\sqrt{2\pi\sigma_z}}$, где I_0 — количество локализуемых частиц, а σ_z — среднеквадратичный размер пучка в z-плоскости.

Ввиду того, что $p_0 = \frac{I_0 \frac{dE}{dy}}{\sqrt{2\pi\sigma_z} C_p \rho t_s}$ — температура наиболее разогреваемой точки кромки мишени $T_{max} = \frac{\sqrt{2} I_0 \frac{dE}{dy}}{\pi \sigma_z \sqrt{C_p \rho \lambda t_s}}$, т.е. максимальный разогрев мишени уменьшается с увеличением времени формирования пучка. Максимальная интенсивность пучка, которую может выдержать мишень $I_m = \eta_1 \frac{\pi \sigma_z \sqrt{t_s}}{\sqrt{2}}$, $\eta_1 = \frac{T_{cr} \cdot \sqrt{\rho \cdot C_p \cdot \lambda}}{\frac{dE}{dy}}$, где T_{cr} — температура разрушения материала мишени. В рассматриваемом случае медленного разогрева T_{cr} практически соответствует $T_{n.a.}$. Коэффициент η_1 характеризует прочностные свойства мишени в квазистационарном режиме.

При аварийной ситуации, в случае быстрого разбухания пучка или смещения орбиты, частицы за несколько оборотов попадут на мишень. В этом случае разогрев можно считать мгновенным, и изменение температуры кромки мишени можно определить: $\Delta T = \frac{P_{max} \cdot \frac{dE}{dy}}{\rho \cdot C_p}$, где P_{max} — максимальная плотность частиц за время локализации потерь.

Если аппроксимировать распределение плотности частиц на мишени в выводной плоскости линейной функцией, то, зная величину заброса пучка $\Delta = \sqrt[3]{RV^2}$ [2], где R — поперечный размер пучка, а V — скорость наведения его на мишень, можно найти максимальную плотность распределения протонов $P_{max} = I_0 / \sqrt{2\pi\sigma_z} \Delta$. Тогда максимальная интенсивность пучка, которую может выдержать мишень в аварийной ситуации $I_m = \eta_2 \frac{T_{cr} - T_0}{T_{cr}} \sqrt{2\pi\sigma_z} \sqrt[3]{RV^2}$, $\eta_2 = \frac{T_{cr} \cdot \rho \cdot C_p}{\frac{dE}{dy}}$. Коэффициент η_2 характеризует прочностные свойства материала мишени в аварийной ситуации.

Толщина рассеивающей мишени выбиралась с учетом необходимого угла рассеяния пучка для предотвращения теплового разрушения скрепера и поэтому пропорциональна радиационной длине L_r (табл.1). С учетом вышесказанного, наиболее подходящим материалом для изготовления мишени является вольфрам.

Компьютерное моделирование процесса формирования пучка и энерговыделения в элементах системы было проведено по комплексам программ SCRAPER [4] и MARS12. Расчетные кривые разогрева кромки вольфрамовой мишени от скорости наведения пучка при скрепировании гало пучка интенсивности 6×10^{12} р приведены на рис.1, из которых видно, что в квазистационарном режиме работы системы ($V \sim 4 \times 10^{-5}$ мм/оборот, время скрепирования $t \sim 2$ с) разогрев мишени не превысит 120°C . В оставшееся время цикла ускорения тепловая энергия практически полностью отводится с кромки мишени. Форма кривых объясняется тем, что с увеличением скорости наведения возрастает интенсивность взаимодействия пучка с мишенью и увеличивается заброс частиц. Наиболее опасный режим работы системы возможен

при быстром разбухании пучка в поперечной плоскости или смещении равновесной орбиты. Так, разогрев мишени за несколько десятков оборотов скрепирования гало пучка ($V \sim 2 \times 10^{-2}$ мм/оборот) может достигнуть $\simeq 1100^\circ \text{C}$ (рис.1). В этом случае для защиты ускорителя необходимо предусмотреть срабатывание системы аварийного вывода.

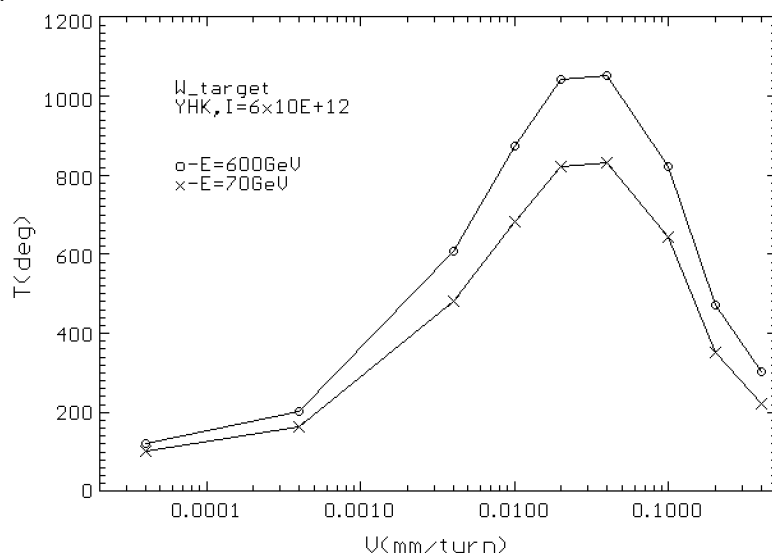


Рис. 1: Изменение разогрева W-мишени от скорости наведения пучка при локализации $6 \times 10^{12} p$.

В режиме перехвата частиц, незахваченных в ускорение, локализуемые частицы наводятся со средней скоростью $V \sim 1.5 \times 10^{-2}$ мм/оборот за время ~ 30 мс и расчет разогрева показывает, что температура кромки мишени не превысит 200°C .

Выбор материала скрепера

Выбор продольного размера поглотителя скрепера производился с учетом практически полного подавления выхода высокоэнергетичных протонов с заднего торца поглотителя, который можно оценить по формуле $I = I_0 \times e^{-l_s/L_n}$. То есть при длине поглотителя l_s , в шесть раз превышающей ядерную длину L_n (табл.1), выход высокоэнергетичных протонов с заднего торца будет $\sim 0.2\%$ от интенсивности протонов, падающих на поглотитель.

Значения максимального разогрева поглотителя Δt при мгновенном сбросе части пучка энергии $E=600$ ГэВ, составляющей $\eta = 1\%$ от полной интенсивности $I_0 = 6 \times 10^{14} p$, для некоторых материалов приведены в табл.2. Из нее видно, что наибольшую часть пучка до своего плавления $I > 80\% \times I_0$ поглощает графитовый поглотитель, но использование его практически невозможно из-за загрязнения вакуума и технологически трудного изготовления.

Таблица 2

	dE/dy МэВ/см	α 1/град	η $\times 10^6$	η_1	η_2	κ $\text{см}^2/\text{сек}$	Δt $^\circ \text{C}$
W	33.0	4.3	0.84	265	0.21	0.65	800
Cu	18.2	17.0	0.57	206	0.22	1.12	510
Al	6.3	22.9	0.62	253	0.24	0.87	150
Fe	16.5	16.0	0.89	322	0.15	0.22	420
C	5.6	7.9	2.18	974	0.78	0.64	40

Разогрев поглотителя, ввиду большого заброса частиц на него из-за их рассеяния на мишени, не зависит от режима локализации потерь пучка, а определяется его энергией и интенсивностью. С увеличением толщины мишени возрастают размеры пучка на поглотителе из-за увеличения рассеяния частиц и, следовательно, уменьшается максимальный разогрев скрепера (рис.2). При локализации 0.5% пучка энергией 600 ГэВ системой без мишени мгновенный разогрев медного поглотителя достигнет 1000° С. При использовании 10 мм вольфрамовой мишени разогрев наиболее разогреваемой области снизится в четыре раза.

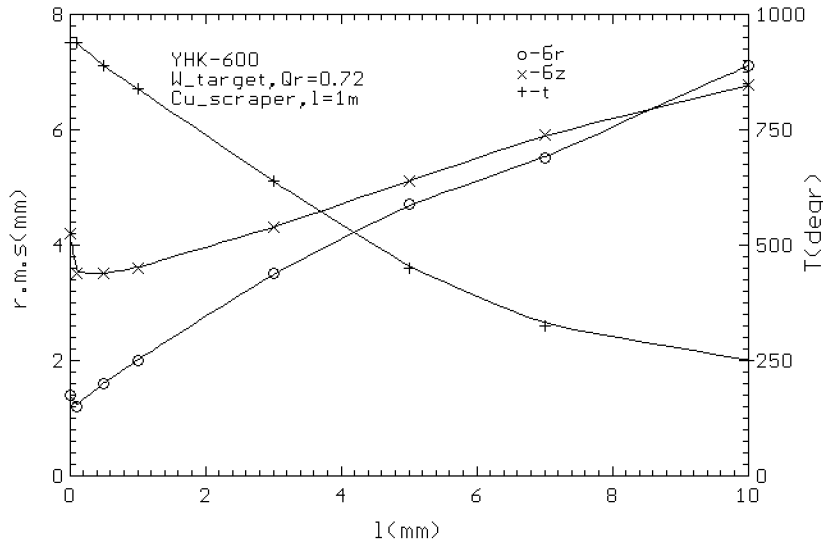


Рис. 2: Зависимость размеров пучка на поглотителе и его максимального теплового разогрева от толщины мишени.

Мгновенный разогрев медного поглотителя при выводе на него 1%-ного пучка с энергией 600 ГэВ (рис.3) и 10%-ного пучка с энергией 70 ГэВ не превышает 500°С. В случае аппроксимации поперечного распределения энерговыведения косинусоидальным законом изменение температуры со временем выражается простым выражением

$$T = T_0 e^{-kt} \times \cos \frac{\pi x}{2l},$$

где $k = \frac{\kappa \pi^2}{4l^2}$ — коэффициент, характеризующий скорость охлаждения поглотителя, l — толщина поглотителя. Тогда максимальный разогрев скрепера будет $T_{max} = T_1(1 + e^{-kt})$, где T_1 — максимальное изменение температуры при одноразовом сбросе пучка.

При использовании медных блоков толщиной $l=5$ см и такой же толщины каркаса в качестве поглотителя энергии пучка увеличение разогрева из-за многократного скрепирования в течение многих циклов ускорения пучка будет наименьшим из рассматриваемых элементов: $\Delta T = T_1 e^{-kt} = T_1 e^{-3}$. Дополнительное увеличение разогрева будет происходить из-за наличия теплового сопротивления между блоками и каркасом α_1 , и между каркасом и трубками с охлаждающей водой α_2 : $\Delta T = \frac{dQ}{dt} \cdot (\alpha_1 + \alpha_2)$.

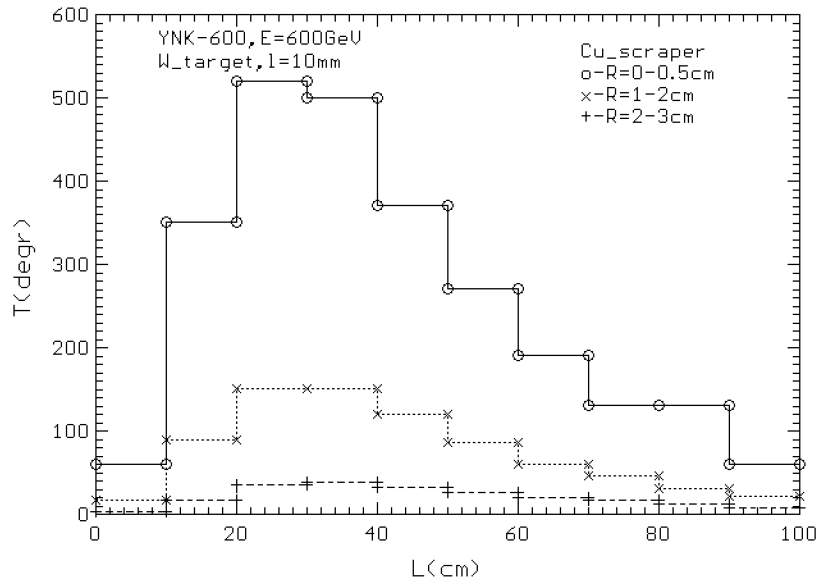


Рис. 3: Мгновенный разогрев медного поглотителя при выводе на него 1% пучка с энергией 600 ГэВ.

С учетом вышесказанного и технологичности изготовления, в качестве материала поглотителя выбрана медь. В этом случае при многократном сбросе части пучка на скрепер, с учетом обработки контактирующих поверхностей не менее 4 класса точности и водяного охлаждения, температура наиболее разогреваемой области увеличится незначительно $\Delta t \sim 100^\circ \text{C}$.

Разработанная система локализации потерь с W-мишенью и Cu-поглотителем позволяет в квазистационарном режиме локализовать до 10% пучка интенсивностью 6×10^{14} р при $E=70$ ГэВ и до 1% при $E=600$ ГэВ, а в аварийной ситуации из-за возможности разрушения вольфрамовой рассеивающей мишени можно допустить перехват системой интенсивности пучка не более 3%.

Список литературы

- [1] М.А.Маслов, N.V.Мочов and I.A.Язынин. "The SSC Beam Scraper System", SSCL-SSC Laboratory (1991).
- [2] I.A.Язынин. "The impact parameter of the particles at the scraper and ways to increase it". Paper presented at 4-th EPAC, London, 27 June,1994.
- [3] Я.В.Зельдович, А.Д.Мышкис. "Элементы математической физики", стр.301, 1973.
- [4] И.И.Дягтерев, А.Е.Лоховицкий, И.А.Язынин. Труды 4-ой Российской конференции по защите от ионизирующих излучений. Обнинск, 1994, т.2, с.25.