

Расчет канала для транспортировки интенсивного протонного пучка от линейного ускорителя к трансмутационной мишени

Б.Л. Дружинин, М.М. Кац

ГНЦ РФ Институт теоретической и экспериментальной физики, Протвино, Россия

В работе перечислены основные трудности транспортировки протонного пучка высокой энергии и высокой интенсивности и, описан вариант магнитооптического канала, предназначенного для транспортировки подобного пучка от линейного ускорителя к мишени, которая располагается внутри трансмутационного реактора. Расчетные параметры пучка протонов: энергия 1 ГэВ, средний ток 0.1 А, поперечный фазовый объем $R \cdot R' = 6 \cdot 10^{-6}$ м*рад. Для уменьшения потерь апертуры элементов канала превышают расчетные размеры пучка в 5 раз. Магнитная оптика канала реализует ахроматический поворот пучка на 90 градусов и фокусировку пучка на мишень в пятно с нужными размерами. Для выравнивания интенсивности пучка на поверхности круговой мишени рассмотрены возможности применения октупольных линз или сканирующих магнитов. Предложено использовать развертку пучка по 1 круговой траектории для облучения мишеней как цилиндрической, так и кольцевой формы.

При расчете канала транспортировки пучка протонов с энергией 1 ГэВ и интенсивностью 0.1 А к мишени внутри трансмутационной установки надо учесть три специфических требования. Первое — минимизация потерь пучка. Второе — высокая надежность оборудования. Третье — минимизация удельной мощности пучка на поверхности окна, отделяющего вакуумный объем канала и ускорителя от мишени.

Так как линейный ускоритель расположен горизонтально, а реактор имеет вертикальную ось симметрии, то канал транспортировки пучка должен состоять из двух основных частей: ахроматического поворота пучка в вертикальной плоскости и части канала, обеспечивающей равномерное облучение мишени.

На рис.1а показано вертикальное сечение предлагаемого канала. Ахроматический поворот пучка осуществляется симметричной системой из двух магнитов и девяти квадрупольных линз (M1, M2, Q1 - Q9). Расчет канала проводился по программам TRANSPORT и REVMOCM [1, 2, 3]. Последние три линзы фокусируют пучок на мишень с нужными размерами пятна. Для уменьшения потерь при транспортировке все магнитные элементы имеют апертуру в пять раз большую, чем расчетный размер пучка в этом элементе. Надежность канала обеспечивается радиационно стойкой конструкцией всех элементов и их питанием постоянными токами.

Как правило, пучок заряженных частиц на выходе из ускорителя описывается в первом приближении в виде гауссовского распределения по линейным и по угловым координатам в обоих поперечных направлениях и по распределению частиц по импульсам. Поэтому распределение частиц по облучаемой поверхности после транспортировки пучка в магнитной системе с “линейными” магнитными элементами будет неоднородным (см. рис. 2а) и при доле пучка, попадающей вне мишени радиуса $R=1$, порядка 1% лишь примерно 30% интенсивности пучка будет облучать “однородную” по выделяемой удельной мощности (где удельная мощность меняется в пределах от максимальной до 0.7 от максимальной) зону мишени. Для выравнивания интенсивности пучка были рассмотрены два основных варианта — использование магнитных линз (октуполей) с нелинейными полями и применение сканирования пучком облучаемой мишени.

Для оптимального использования октупольных линз нужен специфический режим фокусировки пучка, при котором обычные квадрупольные линзы дополнительно к фокусировке пучка на мишень обеспечивают фокусировку пучка в центры обеих октупольных линз в виде узких полосок с последующим подбором токов питания этих линз.

На рис. 2в показано расчетное распределение интенсивности пучка в зависимости от радиуса мишени, которое получилось при использовании октупольных линз. Видно, что при оптимальном режиме канала и при уровне допустимых потерь пучка порядка 1.5% около 70% мощности пучка попадет в “однородную” зону мишени. Надо, однако, напомнить и о трудностях, связанных с реализацией подобного канала. Октупольное выравнивание интенсивности эффективно при достаточно малом фазовом объеме исходного пучка, и когда есть приборы, позволяющие точно настраивать требуемый сложный режим канала, когда исходная форма пучка ближе к квадратичной функции, а не к Гауссу, и когда нет более жестких требований на однородность облучения.

В принципе, более однородное облучение возможно при сканировании. Сканирующие магниты могут стоять вместо октупольных линз (см. рис. 1в). Сам по себе магнитный канал становится более простым по оптике, с более слабыми допусками на параметры исходного пучка, на стабильность и точность выбора токов магнитных элементов канала. Однако в этом способе есть свои существенные трудности. Удельная мощность пучка очень велика, скорость его перемещения по поверхности мишени должна быть, в свою очередь, так велика, чтобы пучок успевал смещаться раньше, чем наступает локальное тепловое повреждение мишени. Это приводит к высокой частоте сканирующих магнитов и высокой мощности их питания и тем самым к ненадежности канала. Для реализации надежного канала со сканированием предлагается осуществлять простейшую развертку пучка по круговой траектории постоянного радиуса с максимальной доступной постоянной частотой порядка 1—100 Гц. На рис. 2с показано расчетное распределение интенсивности в зависимости от радиуса для случая, когда радиус траектории пучка составляет 0.4 от радиуса мишени R , а диаметр пучка равен $0.24R$. Видно, что в этом случае при тех же потерях около 60% интенсивности пучка лежит в зоне относительной однородности.

Возможность надежной круговой развертки пучка позволяет конструировать принципиально новые электроядерные установки, в которых облучается узкая цилиндрическая мишень, а сам реактор может быть расположен как внутри, так и снаружи от мишени (см. рис. 1с). В этом случае мощность

Авторы благодарны МНТЦ за поддержку этой работы через проект 17-1994

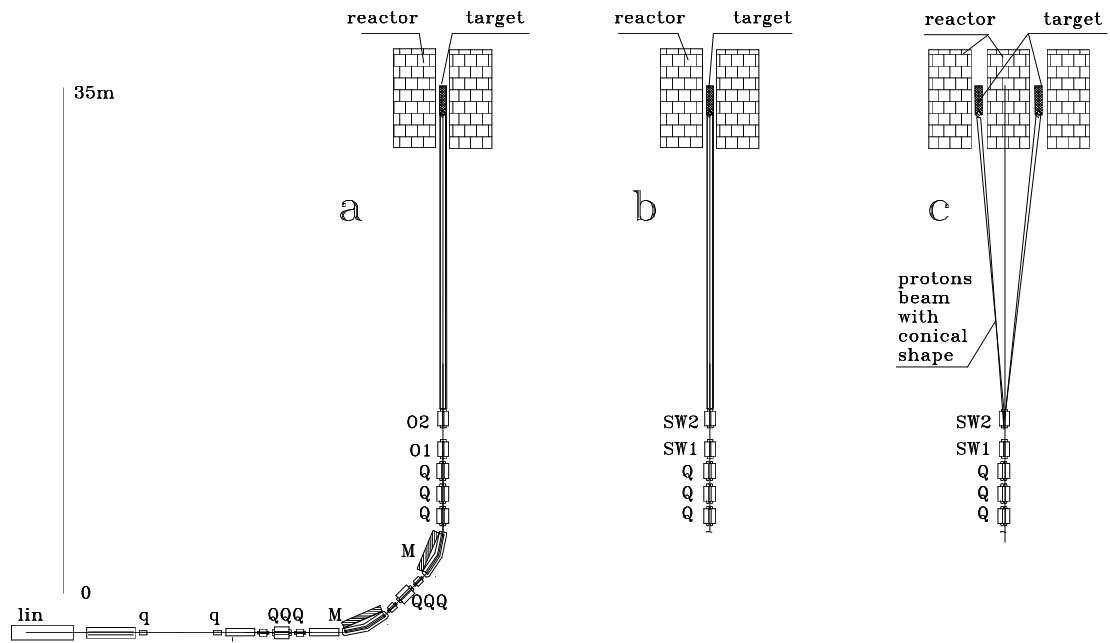


Рис. 1. Схема вертикального сечения канала : а) с октупольными линзами, в) со сканирующими магнитами и цилиндрической мишенью, с) со сканирующими магнитами и кольцевой мишенью.

Fig. 2

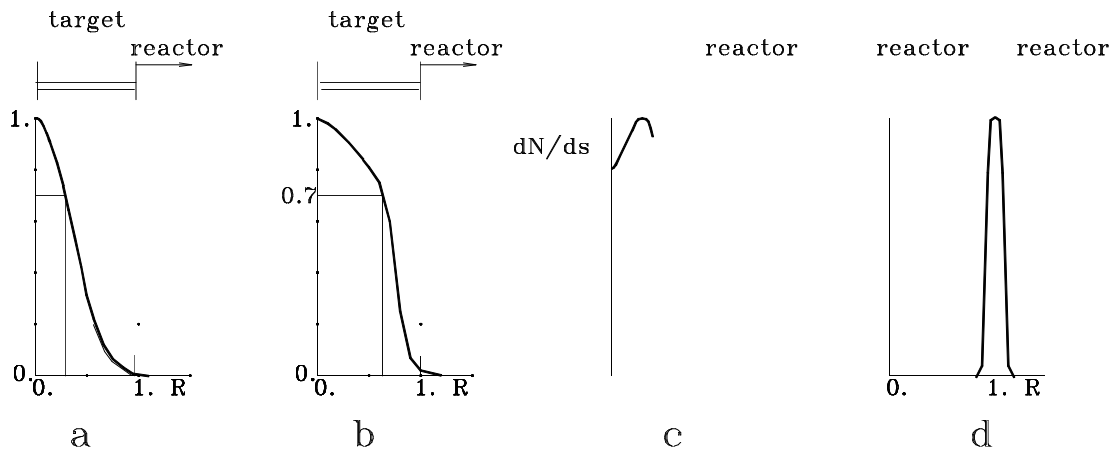


Рис. 2. Расчетное распределение удельной мощности пучка на облучаемой поверхности мишени в зависимости от радиуса: а) исходный пучок транспортировался без выравнивания удельной мощности, в) для выравнивания удельной мощности при облучении цилиндрической мишени использованы октупольные линзы, с) для выравнивания удельной мощности при облучения цилиндрической мишени использована развертка пучка вдоль круговой траектории, d) для уменьшения удельной мощности мишень имеет кольцевую форму, реактор расположен как внутри, так и снаружи мишени, а пучок движется вдоль круговой траектории.

Литература

1. K.L. Brown et al. TRANSPORT CERN, 80-04, 1980.
2. C.J.Kost, P.Reeve. REVMOC TRI-DN 82-28, 1989.
3. М.М. Кац. Модернизация программы REVMOC .
Доклад. на 14 Всероссийском совещании по ускорителям, Протвино, 1994 .
4. V.D.Kazarizky . ISTC supported Project n17, Kalmar, 6, 1996.

