

Нейтринный пучок с узким энергетическим спектром для проекта NuMI

А.Г. Абрамов, И.А. Ажгирей, П.И. Галкин, В.И. Гаркуша,
В.Г. Заручейский, И.А. Курочкин, Е.Н. Ломакин, Ф.Н. Новоскольцев,
А.Д. Рябов, А.В. Харламов, З.Н. Шарифуллин

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий, Протвино, Россия

J. Hylan

Fermi National Accelerator Laboratory, Batavia, USA

В ходе реализации проекта NuMI на сооружаемом в FNAL ускорителе с энергией 120 ГэВ (Main Injector) планируется создать нейтринные пучки с широким и узким энергетическими спектрами для проведения экспериментов по обнаружению и последующему изучению осцилляций нейтрино [1]. В докладе рассматривается фокусирующая система нейтринного пучка с узким энергетическим спектром, построенная на основе параболических линз, разработанных для нейтринного пучка на 70-ГэВ ускорителе ИФВЭ [2], а также принципиальная конструкция поглотителя пучка. Работа выполнена в рамках Соглашения между FNAL и ИФВЭ о проектировании технических элементов нейтринных пучков NuMI.

Фокусирующая система

Для формирования интенсивных пучков мюонных нейтрино с широким спектром используются фокусирующие системы с двумя–тремя объективами (фокусирующими устройствами) на основе аксиально–симметричных тонкостенных оболочек с током — магнитных горнов, формирующие слаборасходящийся пучок π -, K -мезонов в широком интервале импульсов. Как показано в работе [3], двухобъективная фокусирующая система нейтринного пучка с широким спектром (WBB) может быть относительно несложно преобразована для формирования нейтринного пучка с узким спектром (NBB). Установленные дополнительно три отклоняющих магнита и поглотитель позволяют сформировать пучок вторичных частиц с выбранным знаком заряда в небольшом интервале импульсов. Основной положительной особенностью фокусирующей системы NBB, построенной по такому принципу, является использование одних и тех же фокусирующих устройств и источников питания для формирования обоих типов нейтринных пучков.

Принципиальные схемы WBB и NBB фокусирующих систем, оптимизированных для проекта NuMI, приведены на рис. 1. В качестве фокусирующих устройств FD1 и FD2 здесь используются спаренные параболические линзы с максимальными радиусами 8 и 24 см соответственно, при этом длина FD1 составляет 2.56 м, а длина FD2 — 2.92 м [2]. Оба фокусирующих устройства могут быть запитаны последовательно от одного источника с максимальным током 320 кА. Величина тока определяется исходя из возможности охлаждения токовых оболочек при 5–7 мс импульсах с частотой ~ 0.5 Гц.

Известно, что фокусирующая система для WBB, состоящая из двух фокусирующих

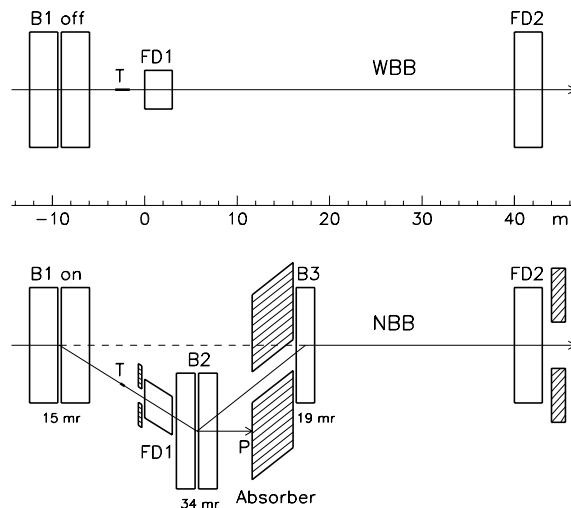


Рис. 1: Принципиальные схемы WBB и NBB фокусирующих систем.

устройств, формирует пучок вторичных частиц с минимальной расходимостью для двух различных импульсов, определяемых параметрами самой фокусирующей системы. Именно эти два импульса являются центральными импульсами для двух основных режимов NBB, причем другие режимы NBB можно получить, изменяя положение мишени и ток в фокусирующих устройствах. Приведенная на рис.1 фокусирующая система NBB с током в параболических линзах 320 кА и мишенью, центр которой совпадает с центром мишени для фокусирующей системы WBB, позволяет формировать нейтринные пучки с центральными импульсами 20 и 45 ГэВ/с.

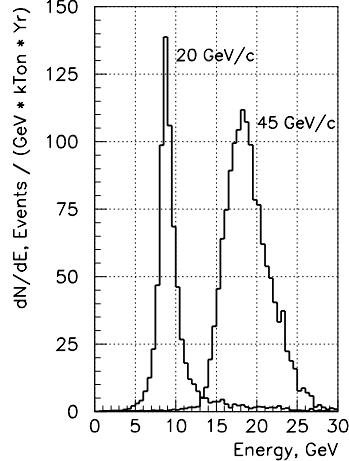


Рис.2: Спектры нейтрино.

Энергетические спектры нейтринных взаимодействий, рассчитанные для двух основных режимов NBB при 3.7×10^{20} сбрасываемых на мишень протонов за год, приведены на рис.2 (длина графитовой мишени 0.5 м, радиус 2 мм; длина распадного участка 800 м, радиус распадной трубы 1 м; детектор массой 1000 т расположен на расстоянии 732 км). Расчеты проводились по программе GNUMI, созданной в FNAL на основе пакета GEANT. Полное число взаимодействий в детекторе составляет 350 и 735 для режимов 20 и 45 ГэВ/с соответственно. При выбранном размере отверстия в поглотителе относительная полуширина на полувысоте нейтринного спектра для режима 45 ГэВ/с (~15%) в 1.5 раза больше аналогичной величины для режима 20 ГэВ/с, что определяется в основном разным характером фокусировки вторичных частиц: с промежуточным изображением для 20 ГэВ/с и без промежуточного изображения для 45 ГэВ/с.

Поглотитель пучка

Поглотитель (рис.3) предназначен для поглощения пучка непрореагировавших с мишенью первичных протонов и вторичных частиц, находящихся вне апертуры фокусирующей системы, а также для защиты обмоток магнита В3 (рис.1) от чрезмерных радиационных нагрузок. Основным конструктивным элементом поглотителя является графитовый керн диаметром 160 мм, имеющий общую длину 2 м ($\sim 4\lambda_C$) и состоящий из восьми цилиндров длиной 250 мм каждый. Поперечные размеры графитового керна были определены исходя из возможных положений первичного протонного пучка на поглотителе для различных режимов фокусирующей системы, включая положение протонного пучка при выключенном магните В2.

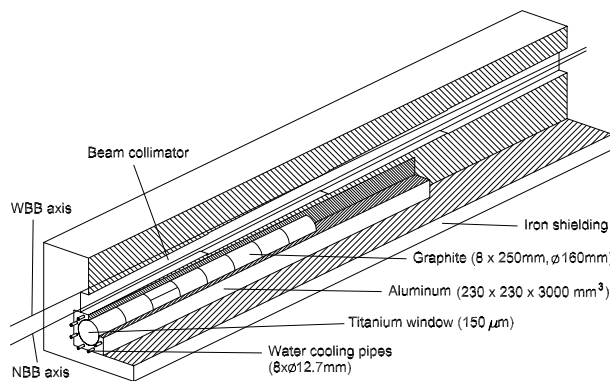


Рис.3: Сечение поглотителя.

Графитовый керн заключен в отверстие длиной 2 м, просверленное в охлаждаемой водой оболочке из алюминиевого сплава длиной 3 м. Диаметр отверстия в алюминиевой оболочке на 50 мкм меньше диаметра графитовых цилиндров, что соответствует максимальному сжимающему напряжению со стороны алюминия на графит, равному 4 МПа. Поперечные размеры алюминиевой оболочки ($230 \times 230 \text{ мм}^2$) ограничены размерами и положением формируемого пучка вторичных частиц — родителей нейтрино.

Центральная часть поглотителя (алюминиевая оболочка с графитовым керном) окружена стальной защитой с отверстием — коллиматором для импульсного анализа формиру-

емого пучка вторичных частиц. Стальная защита длиной 1.5 м размещена также и за центральной частью поглотителя, что обусловлено в основном необходимостью защиты обмоток магнита ВЗ. Длины графитового ядра и алюминиевой оболочки были выбраны из условий приемлемого температурного и напряженного состояния каждого последующего элемента поглотителя, общая длина которого составляет 4.5 м.

Для предотвращения окисления графитовые цилиндры находятся в атмосфере чистого азота. При этом объем, занимаемый графитом, отделен от окружающей атмосферы тонким (150 мкм) титановым окном. Марки графита и алюминия выбраны те же, что и в поглотителе аварийного вывода пучка основного инжектора ФНАЛ [4]. Высокая надежность этих материалов (графит SGL 7340 и алюминиевый сплав 5083–H112) подтверждается их успешным использованием в жестких радиационных условиях в течение многих лет.

Табл.1: Энергия пучка частиц (в ГэВ/протон) перед поглотителем и его центральной частью.

Сечение, см ²	100×100		23×23	
Импульс, ГэВ/с	20	45	20	45
Полная энергия	71.67	70.00	64.69	61.71
Протоны	60.96	60.42	58.86	57.01
Нейтроны	3.43	3.41	2.81	2.80
Пионы	5.22	4.28	1.96	0.90
Гамма	1.59	1.60	0.97	0.98
Электроны	0.47	0.29	0.10	0.02

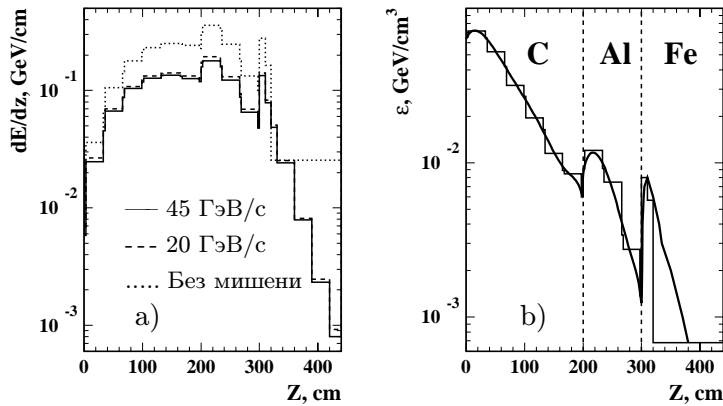


Рис.4: Продольные распределения энерговыделений в центральной части поглотителя (а) и удельная плотность энерговыделения вдоль оси протонного пучка в аварийной ситуации (б).

мум поглощенной дозы в обмотках магнита ВЗ достигается на их лобовых частях вблизи отверстия коллиматора и составляет $6.7 \cdot 10^6$ Гр/год, что позволяет использовать в обмотках магнита ВЗ обычную органическую изоляцию. Система охлаждения центральной части поглотителя состоит из восьми каналов диаметром 12.7 мм, расположенных в алюминиевой оболочке. При расходе воды 106 л/мин перепад давления равен 1.35 атм, а перегрев воды составляет 28.5–30°C в зависимости от режима фокусирующей системы.

Расчеты температуры и, соответственно, температурных напряжений в элементах конструкции поглотителя были проведены по программе HAST [6]. Распределения температу-

Распределение частиц перед поглотителем и энерговыделение в нем были рассчитаны по программе MARS'96 [5] с учетом реальных параметров фокусирующей системы (рис. 1). Энергетические характеристики падающего на поглотитель пучка приведены в табл.1, а результаты расчетов продольного распределения поглощенной энергии для различных режимов фокусирующей системы показаны на рис.4а. Максимальная плотность энерговыделения в графитовом ядре достигает величины 0.07 ГэВ/см^3 в аварийной для поглотителя ситуации, когда протонный пучок проходит мимо мишени (рис.4б).

Полная мощность, выделяемая в поглотителе при энергии первичного протонного пучка 120 ГэВ и интенсивности $\sim 2 \cdot 10^{13}$ протон/с, составляет 204–210 кВт, причем $\sim 55\%$ ее выделяется в графитовом ядре и алюминиевой оболочке, $\sim 40\%$ в стальной защите вокруг них и $\sim 5\%$ в последующей части поглотителя. При этом макси-

ры в центральной части поглотителя для режима фокусирующей системы 45 ГэВ/с приведены на рис.5 и 6. Для режима 20 ГэВ/с характер распределений и максимальные значения температуры отличаются незначительно. Расчеты показывают, что стационарное распределение температуры достигается примерно через 100–150 сбросов протонного пучка. При этом максимальные эквивалентные температурные напряжения в алюминиевой оболочке достигают величины 40 МПа около отверстий охлаждения, где наблюдается максимальный температурный градиент. Для сравнения, алюминиевый сплав 5083–Н112 имеет предел текучести 193 МПа и предел усталостной прочности 158 МПа для $5 \cdot 10^8$ циклов. Расчеты радиальной составляющей температурных напряжений в графитовом керне показали, что графит постоянно испытывает сжатие. Это свидетельствует о том, что тепловой контакт между графитовым керном и алюминиевой оболочкой и, соответственно, эффективность охлаждения не теряются из-за разогрева алюминия.

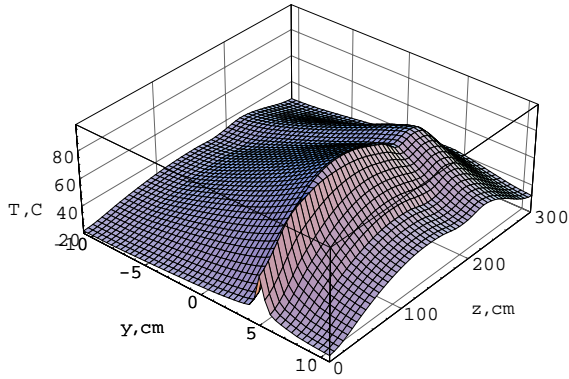


Рис. 5: Распределение температуры в поглотителе в плоскости отклонения пучка для режима 45 ГэВ/с после сброса протонного пучка.

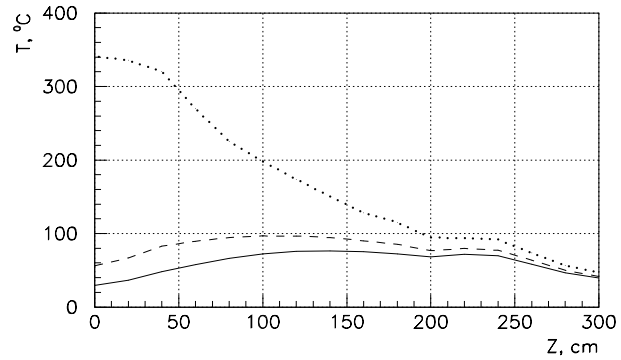


Рис. 6: Температура в поглотителе вдоль оси протонного пучка для режима 45 ГэВ/с (— перед сбросом, --- после сброса пучка, ... в аварийной ситуации).

Расчет температуры стальной части поглотителя в стационарном режиме при условии только конвективного теплообмена с окружающей средой дает значение температуры на поверхности стальной защиты $\sim 320^\circ\text{C}$. Это может вызвать дополнительную термическую нагрузку на обмотки магнита ВЗ, а также на систему охлаждения центральной части поглотителя. Поэтому целесообразно иметь отдельную водяную систему охлаждения стальной защиты в виде нержавеющей стальных труб, приваренных к наружной поверхности поглотителя, с общим расходом воды ~ 50 л/мин.

Список литературы

- [1] Technical Design of Neutrino Beams for the Main Injector. FNAL-TM-1946, Batavia, 1995.
- [2] Д.Баратов и др. Препринт ИФВЭ 76-87, Серпухов, 1976.
- [3] Д.Баранов и др. Препринт ИФВЭ 78-136, Серпухов, 1978.
- [4] M.Reichanadter et al. A High Intensity Beam Absorber Corebox for the Fermilab Main Injector Abort System, Fermilab, Batavia, 1996.
- [5] И.Ажгирей и др. Труды XV Совещания по ускорителям заряженных частиц, т.2, с.270, Протвино, 1996.
- [6] А.Абрамов и др. Препринт ИФВЭ 84-64, Серпухов, 1984.