но превышает плотность хлористого натрия (1,37 г/см^3) , вибрации, возникающие при транспортировке и длительной эксплуатации калибровочных препаратов, могут нарушить их гомогенность, что приведет к увеличению скорости счета импульсов в регистрируемых фотопиках, хотя суммарная активность урана в препарате остается неизменной.

Авторы выражают благодарность С.М. Вакуловскому за постановку задачи и ценные обсуждения и А.А. Волокитину за предоставление рабочих эталонов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Taskaeva M., Taskaev E., Penev I.** On the preparation of efficiency calibration standards for gamma-ray spectrometers. — App. Rad. Isotop., 1996, v. 47, № 9/10, p. 981—988.
2. **Пруткина М.И., Шашкин В.Л.** Справочник по радиометрической разведке и радиометрическому анализу. 2-е изд. М.: Энергоатомиздат, 1984. 168 с.
3. **Схемы** распада радионуклидов. Энергия и интенсивность излучения. Публикация № 38 МКРЗ. В 2 ч. Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1987.
4. **Тертышник Э.Г., Корсаков А.Т.** Определение эффективности детектора при γ-спектрометрии проб большого объема. — Атомная энергия, 1985, т. 58, вып. 1, с. 44—47.
5. **Сторм Э., Исраэль Х.** Сечения взаимодействия гамма-излучения. Справочник. Пер. с англ. М.: Атомиздат, 1973. 253 с.
6. **Shoji M., Hamajima Y., Takatsuka K. e.a.** A convenient method for discriminating between natural and depleted uranium by γ-ray spectrometry. — App. Rad. Isotop., 2001, v. 55, p. 221—227.
7. **McLaughlin J., Vintro L., Smith K. e.a.** Actinide analysis of a depleted uranium penetrator from a 1999 target site in southern Serbia. — J. Environ. Radioact., 2003, v. 64, № 2—3, p. 155—165.

Поступила в Редакцию 16.02.04

УДК 621.384.633

РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ ОБЛУЧАТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА «АЛЬФА» ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ТРЕКОВЫХ МЕМБРАН

Аленицкий Ю.Г., Василенко А.Т., Вылов Ц.Д., Глазов А.А., Данилов В.И., Денисов Ю.Н., Дмитриевский В.П., Заплатин Н.Л., Ивашкевич С.А., Кадышевский В.Г., Калиниченко В.В., Карамышева Г.А., Климкин И.П., Кочкин В.А., Морозов Н.А., Новиков Д.Л., Онищенко Л.М., Русакович Н.А., Самсонов Е.В., Сисакян А.Н., Смирнов В.И., Толстой Н.С., Уткин В.А., Чеснов А.Ф. (ОИЯИ), Доля С.Н., Смольков А.В., Тычков Ю.И., Федоренко С.Б. (Холдинговая компания «Трекпор технолоджи»)

Облучательный комплекс «Альфа» предназначен для промышленного производства трековых мембран, используемых для выпуска разделяющих и фильтрующих элементов медицинского, промышленного и бытового назначения. Холдинговая компания «Трекпор технолоджи» уже производит установки для мембранного плазмофереза, обеспечивающие лечение различных заболеваний и получение донорской плазмы.

Комплекс «Альфа» включает:

источник ионов ЭЦР-типа, разработанный и изготовленный в НИИЭФА им. Д.В. Ефремова. Источник обеспечивает получение пучка 8-зарядных ионов аргона интенсивностью на входе в систему вертикальной инжекции циклотрона до 3—5 мкА;

изохронный циклотрон ЦИТРЕК с азимутальной вариацией магнитного поля и электростатической системой вывода ускоренных ионов;

систему транспортировки выведенного пучка ускоренных ионов от циклотрона до облучательной установки, включая сканирующий электромагнит, отклоняющий ионы на входе в облучательную установку на ±20 см от центральной оси;

облучательную установку с механизмом протяжки облучаемой пленки в вертикальном направлении с заданной линейной скоростью.

В дальнейшем предусматривается создание дополнительного тракта для использования выведенного пучка. Усовершенствование ионного источника позволит получать и ускорять ионы криптона, что также запланировано в проекте.

Изохронный циклотрон ЦИТРЕК. Ускоритель ЦИТРЕК представляет собой изохронный циклотрон с азимутальной вариацией магнитного поля (четырехсекторная структура), аксиальной инжекцией ионов, высокочастотной ускоряющей системой и электростатической системой вывода. Его основные технические характеристики следующие:

Ускоряемые ионы . . .	$^{40}Ar^{8+}$
Рабочий вакуум, Па . . .	$4 \cdot 10^{-5}$
Энергия, МэВ/нукл.:	
начальная . . .	0,003
конечная . . .	2,4
Радиус ускорения, мм:	
начальный . . .	53
конечный . . .	730
Интенсивность выведенного пучка, нА . . .	200

На рис. 1 показан общий вид ускорителя, на рис. 2 — вид циклотрона в плане, на котором видны четыре секторные шиммы на полюсе электромагнита, два дуанта высокочастотной ускоряющей системы, электростатические дефлекторы ESD1, ESD2 и пассивный магнитный фокусирующий канал FD.

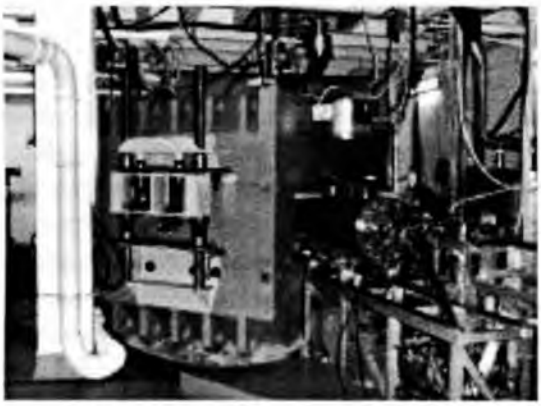


Рис. 1. Общий вид изохронного циклотрона ЦИТРЕК

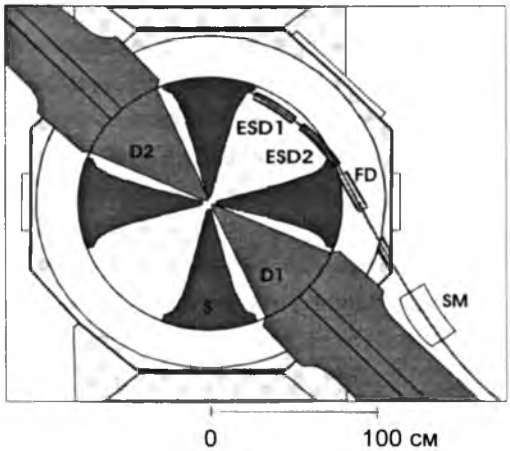
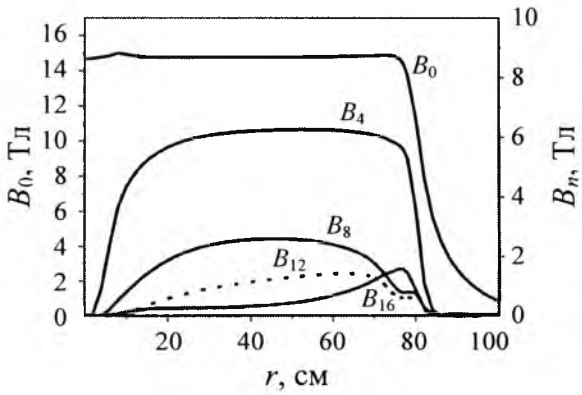


Рис. 2. Вид изохронного циклотрона ЦИТРЕК в плане

Магнитная система. Ведущее и фокусирующее магнитное поле создается с помощью Ш-образного электромагнита с четырьмя секторными шиммами [1]. Необходимый рост среднего магнитного поля вдоль радиуса обеспечивается увеличением угла секторных шимм с 30 до 41,8°. Для достижения необходимой точности формирования изохронного поля использовали также шиммы в долинах магнита.

Особенностью циклотрона является близость радиальной бетатронной частоты к единице, что приводит к жестким допускам на амплитуду первой гармоники магнитного поля. Поэтому поле сформировано так, что амплитуда первой гармоники не превышает $3 \cdot 10^{-4}$ Тл (рис. 3). Параметры магнитной системы следующие:



Р и с. 3. Магнитное поле циклотрона: B_0 — среднее; B_4, B_8, B_{12}, B_{16} — амплитуда 4-й, 8-й, 12-й и 16-й гармоник магнитного поля

Диаметр полюса, м . . .	1,6
Среднее магнитное поле, Тл . . .	1,48
Рабочий ток, кА . . .	92,75
Потребляемая мощность, кВт . . .	25
Зазор между полюсами:	
в холме, мм . . .	40
в долине, мм . . .	100
Габаритные размеры, м . . .	3,7×2×1,65
Масса, т . . .	83

В зазоре электромагнита на расстоянии 40 см от центра магнита располагается для контроля магнитного поля в указанном месте датчик магнитометра, основанного на использовании ядерного магнитного резонанса.

Аксиальная инжекция. Для циклотрона ЦИТРЕК используется источник тяжелых ионов на основе электронного циклотронного резонанса. Энергия ионов, извлекаемых из источника, составляет 3 кэВ/нукл., интенсивность пучка аргона на цилиндре Фарадея, расположенном в блоке диагностики в начале линии инжекции, равна 3—5 мкА. В системе инжекции предусмотрен группирователь. Система инжекции включает в себя также ионопровод, анализирующий и поворотный двухсекционный магниты, элементы фокусировки и юстировки пучка.

Для поворота пучка ионов из вертикальной в горизонтальную плоскость применяется спиральный электростатический инфлектор, основные параметры которого таковы:

Электрический радиус (физическая высота), мм . . .	20
Ширина электродов, мм . . .	20
Напряжение на электродах, кВ . . .	±7,5
Зазор между потенциальными пластинами, мм . . .	10
Расстояние между входом (выходом) инфлектора и формирующими пластинами над нулевым потенциалом, мм . . .	5

Максимальная расчетная напряженность электрического поля между пластинами инфлектора составляет 15 кВ/см. Потенциальные электроды инфлектора изготовлены из меди и жестко закреплены один над другим на изоляторах. Ось входа в инфлектор совпадает с вертикальной осью циклотрона.

Предусмотрен механизм поворота инфлектора вокруг оси (±8°) для подстройки траектории ионов под стартовый радиус и стартовый угол для оптимизации начальных условий ускорения ионов в циклотроне. Ионы инжектируются в камеру циклотрона на радиус 5,3 см.

Высокочастотная ускоряющая система. Для ускорения ионов в магнитном поле циклотрона используется высокочастотная ускоряющая система, настраиваемая на фиксированную частоту. Она состоит из двух четвертьволновых резонаторов с ускоряющими электродами в виде дуантов. ВЧ-резонаторы обеспечивают получение частотного диапазона 18,25—18,6 МГц. Грубая перестройка частоты резонансной системы осуществляется изменением геометрической длины резонаторов посредством перемещения закорачивающей пластины, для плавной перестройки используется триммер. Два дуанта ускоряющей системы имеют азимутальную протяженность 45° и размещены в противоположных долинах магнитной системы. Апертура дуантов равна 24 мм. С обеих сторон дуантов располагаются противодуантные рамки. Горизонтальное расстояние между кромками дуантов и рамок на радиусе более 120 мм равно 20 мм. От радиуса 120 мм по направлению к центру кромки рамок идут параллельно кромкам секторных шимм, формируя тем самым сужающиеся зазоры в ускоряющих щелях. Зазор в самом узком месте (r = 40 мм) равен 8 мм. В «носике» первого по ходу пучка дуанта располагаются две вертикальные перемычки, на входе и выходе — съемные диафрагмы. Сформированная геометрия центра должна обеспечить надлежащее качество ускоренного пучка. На рис. 4 показано движение ионов аргона в центре ускорителя (компьютерное моделирование), представлены расположение и структура дуантов (D1, D2) и противодуантных рамок (F), схематически изображены корпус инфлектора (I) и секторные шиммы магнита (S). Основные параметры высокочастотной системы следующие:

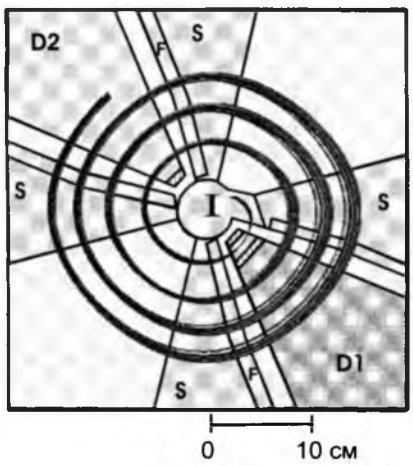


Рис. 4. Траектории ионов аргона в центре циклотрона

Число дуантов . . .	2
Азимутальная протяженность дуантов, ° . . .	45
Амплитуда напряжения на дуантах, кВ . . .	40—50
Резонансная частота, МГц . . .	18,26
Кратность ускорения . . .	4
Добротность резонансных систем . . .	3500

Ионы ускоряются на четвертой кратности частоты обращения. Амплитуда высокочастотного напряжения на каждом дуанте во время проведения пусконаладочных работ составляла 40 кВ при мощности возбуждения ~5 кВт, частота ускоряющего напряжения для аргона 18,26 МГц.

ВЧ-резонаторы возбуждаются от отдельных ВЧ-генераторов мощностью 15 кВт каждый. Синфазность ускоряющего напряжения на обоих дуантах достигается соответствующей системой автоподстройки собственных частот резонаторов и системой регулируемого сдвига фаз в цепях возбуждения усилителей мощности ВЧ-системы.

Система вывода пучка. Она включает в себя две секции электростатического дефлектора ESD1 и ESD2 (см. рис. 2) угловой протяженностью 21 и 28° соответственно, три измерительных пробника тока пучка (входной, промежуточный, выходной) и пассивный магнитный канал FD угловой протяженностью 17°, предназначенный для радиальной фокусировки. Радиальная апертура дефлекторов составляет 7,5 мм.

Напряжение на дефлекторах может регулироваться от 0 до 53 кВ, дальнейшее увеличение напряжений приводило к пробоям. Эффективность прохождения через дефлекторы составила около 50%, что является хорошим результатом, так как ускорение при ВЧ-напряжении 40 кВ не позволяет разделить орбиты ионов на радиусе вывода.

Вакуумная система и система водяного охлаждения. При ускорении многозарядных тяжелых ионов происходит их потеря вследствие перезарядки на остаточном газе в вакуумной камере. Как показали расчеты, давление в камере и линии инжекции для 70%-ного прохождения пучка ускоренных ионов аргона должно быть меньше $1{,}3\cdot10^{-4}$ Па. Такое давление в камере циклотрона обеспечивают два диффузионных насоса с азотными ловушками для вымораживания паров масла и один турбомолекулярный насос. Для откачки линии инжекции используют два турбомолекулярных и один криогенный насос. В результате в линии инжекции давление остаточного газа составляет $4\cdot10^{-5}$ Па, в камере циклотрона в отсутствие пучка — $3\cdot10^{-5}$ Па, при ускорении ионов — $5\cdot10^{-5}$ Па, что достаточно для эффективного ускорения ионов (потери ионов вследствие перезарядки на остаточном газе <20% [2]).

Некоторые системы установки требуют применения водяного охлаждения. В частности, предусмотрено водяное охлаждение ВЧ-генераторов и дуантов, источников постоянного тока, обмоток возбуждения электромагнита циклотрона и электромагнитных элементов тракта проводки пучка.

Требования к охлаждающей воде: электрическое сопротивление не менее 50 кОм·см, температура на входе не более 15 °С, перепад не более 30 °С, давление — от 400 до 600 кПа.

Стабилизированные источники постоянного тока для питания обмоток возбуждения электромагнитных элементов облучательного комплекса. Система стабилизированных источников постоянного регулируемого тока предназначена для питания обмоток возбуждения магнитных элементов циклотрона и тракта транспортировки выведенного пучка. Магнитными элементами являются основной магнит циклотрона, поворотный магнит в тракте проводки пучка ускоренных ионов SM, два квадрупольных магнита Q1 и Q2 и корректирующий магнит KM. Каждый из перечисленных магнитных элементов возбуждается от своего стабилизированного источника постоянного тока. Основные параметры всех стабилизированных источников питания приведены в таблице.

Тип источника и возбуждаемый магнитный элемент

Технические характеристики	ИСТ800/48	ИСТ500/24 SM	ИСТ150/5 Q1	ИСТ150/10 Q2	ИСТ4/5 КМ
Номинальный ток нагрузки, А	527	450	145	146	± 4
Номинальное напряжение нагрузки, В	43	25	1,8	8	2,4
Диапазон регулирования, А	500±10%	360—500	5—150	5—150	0—4
Допустимая нестабильность тока	$\pm 2\cdot 10^{-5}$	$\pm 10^{-4}$	$\pm 5\cdot 10^{-4}$	$\pm 5\cdot 10^{-4}$	10^{-2}

Система управления и диагностики режима работы облучательного комплекса «Альфа». Система управления и диагностики предназначена для контроля выбранного режима ускорения, вывода и транспортировки пучка, а также стабильности работы ускорителя в процессе облучения пленки. Автоматизация управления параметрами основных систем циклотрона организована на базе персонального компьютера с операционной системой WINDOWS 2000, управляющей набором блоков в стандарте КАМАК и несколькими многоканальными АЦП и ЦАП.

Система диагностики пучка ионов в тракте вертикальной инжекции состоит из коллиматора с переменной апертурой, цилиндра Фарадея и 30-канального профилометра. В процессе ускорения характеристики пучка контролируются тремя дифференциальными измерительными пробниками, разнесенными по азимуту через 120°. Измерительные ламели пробников могут перемещаться во всем диапазоне радиуса орбит ускоряемых ионов без нарушения вакуума в ускорительной камере циклотрона.

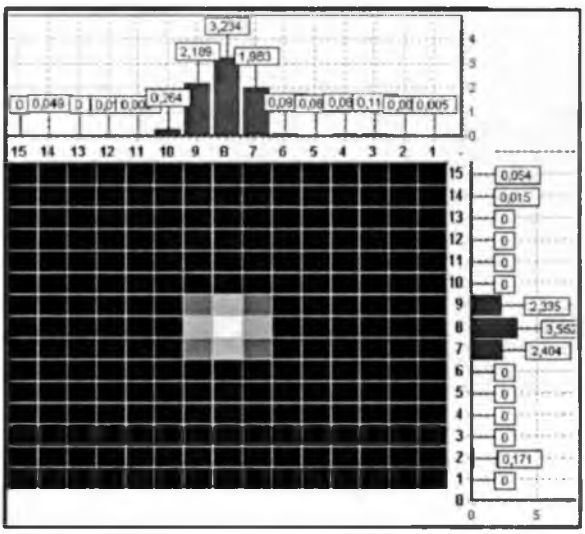
Характеристики пучка ионов контролируются при прохождении им системы вывода тремя дифференциальными измерительными пробниками. Первый расположен перед входом в электростатический дефлектор ESD1 и позволяет измерять ток ускоренных ионов в зоне заброса пучка в апертуру дефлектора. Вторым пробником измеряется ток пучка и его радиальное распределение между первым и вторым дефлекторами. Третий пробник позволяет контролировать пучок ионов и его распределение по радиусу перед ферромагнитным фокусирующим устройством.

Ток и форма профиля пучка ускоренных ионов в тракте проводки ионов до облучательной установки контролируются тремя профилометрами, разнесенными по характерным точкам. Первый четырехканальный секторный профилометр позволяет измерять полный ток пучка, его распределение в горизонтальном и вертикальном направлениях, получать данные о его центрировании на входе в ионопровод тракта. Второй аналогичный первому профилометр служит для контроля положения пучка в тракте после поворотного магнита SM. Третий профилометр, представляющий собой «гребенку» из 10 ламелей, предназначен для измерения полного тока ионов перед облучательной установкой и распределения пучка в горизонтальной плоскости по ширине облучаемой пленки. После проверки параметров пучка в процессе настройки режима работы облучательного комплекса профилометры выводятся из зоны пролета пучка ускоренных ионов.

В процессе облучения пленки на облучательной установке положение пучка ионов в горизонтальной и вертикальной плоскостях контролируется двумя парами измерительных электродов, расположенных вне зоны облучения, но перехватывающих малую часть ионов периферии пучка. Все контролируемые параметры

технологических систем облучательного комплекса «Альфа» выводятся на экраны двух мониторов со сменными «панелями». На рис. 5 показан один из вариантов выбираемых панелей в процессе наладки циклотрона.

Непрерывный стационарный дозиметрический контроль радиационной обстановки в здании ускорителя осуществляется с помощью автоматизированной системы дозиметрического контроля. Информация поступает с трех датчиков, расположенных возле зоны вывода пучка из циклотрона, над трактом пучка и около камеры для облучения пленки.



Р и с. 5. Профиль пучка на профилометре в линии инжекции (расстояние между проволоками 5 мм)

Система транспортировки пучка и камера для облучения пленки. После вывода из камеры циклотрона пучок транспортируется по вакуумному тракту, в котором предусмотрены:

ионопровод переменного сечения длиной около 11 м, стыкующийся на своем входе с фланцем камеры циклотрона и соединяющийся на выходе с фланцем окна облучательной установки. Его ширина линейно увеличивается с приближением к окну облучательного устройства, где достигает 400 мм;

поворотный магнит, находящийся в непосредственной близости от вакуумной камеры ускорителя и предназначенный для поворота выведенного пучка в ионопровод тракта;

две квадрупольные линзы, фокусирующие пучок ионов в горизонтальном и вертикальном направлениях;

магнит, отклоняющий пучок ионов в вертикальном направлении на ± 0,4°;

сканирующее устройство, распределяющее ускоренные ионы по ширине облучаемой пленки.

Так как при облучении пленки необходимо обеспечить одинаковую плотность отверстий по всей площади трековой мембраны с погрешностью не более ±10%, с помощью сканирующего магнита создается горизонтальное колебательное движение пучка частотой 50 Гц. Вертикальная развертка достигается движением пленки. Расстояние от сканирующего магнита до облучательного устройства равно 8 м.

Облучательное устройство состоит из вакуумной камеры со специальным лентопротяжным механизмом, обеспечивающим постоянную скорость протяжки пленки в вертикальном направлении со скоростью 2—80 см/с.

Вакуумная камера тракта проводки пучка ускоренных ионов откачивается до давления $6 \cdot 10^{-5}$ Па тремя диффузионными насосами с азотными ловушками на входных патрубках. Облучательная установка, разделенная диафрагмой на два вакуумных объема, откачивается двумя турбомолекулярными насосами до давления $6 \cdot 10^{-4}$ Па в зоне облучения пленки и до $1 \cdot 10^{-2}$ Па в зоне размещения лентопротяжного механизма, приемной и подающей бобин облучаемой пленки. На рис. 6 показана камера для облучения пленки.

Рис. 6. Камера для облучения пленки

Заключение. Пуск облучательного комплекса «Альфа», осуществленный в августе 2002 г., позволил получить пучок ионов $^{40}Ar^{8+}$ энергией 2,4 МэВ/нукл. и интенсивностью 200 нА. Коэффициент вывода ускоренных ионов из циклотрона ЦИТРЕК составляет около 50%. Были подобраны режимы облучения пленок с необходимыми для производства фильтров параметрами. Равномерность облучения в поперечном направлении обеспечивалась сканированием пучка с напряжением на сканирующем магните 73 В, равномерность в продольном направлении — постоянством скорости протяжки пленки и стабильностью тока пучка ионов на протяжении всего цикла облучения, который составлял от 10 мин до 2 ч в зависимости от тока пучка и требований к количеству облучаемой пленки. В качестве проверки соответствия облучательного комплекса поставленным задачам во время проведения пусконаладочных работ облучили около 5000 м полимерной пленки шириной 32 см, толщиной 12 мкм с плотностью треков, которая соответствует техническим требованиям для мембраны, используемой в производстве плазмофильтров «Роса».

Авторы выражают благодарность сотрудникам Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ Б.Н. Гикалу, И.А. Иваненко, В.Н. Мельникову, А.М. Мордуеву и А.В. Тихомирову за помощь в разработке линии инжекции в циклотроне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Alenitsky Yu.G., Zaplatin N.L., Onischenco L.M. e.a.** Magnetic system of the heavy ions cyclotron for track membranes production. — Nukleonika, 2003, v. 48, № 2, p. 55—59.
2. **Калиниченко В.В., Карамышева Г.А.** Оценка потерь ионов вследствие перезарядки на остаточном газе в камере циклотрона. Сообщение ОИЯИ Р9-2002-58, 2002. 6 с.

Поступила в Редакцию 11.02.04

УДК 539.17, 621.039

ВЫХОД НЕЙТРОНОВ ИЗ ВОДООХЛАЖДАЕМЫХ СВИНЦОВЫХ МИШЕНЕЙ

Егоров А.И., Онегин М.С., Пашук В.В. (Петербургский институт ядерной физики)

Интерес к адронному каскаду, инициированному протонами промежуточной энергии в мишени из материала с большим атомным номером, в первую очередь свинца, вызван необходимостью создания интенсивных источников нейтронов для научных исследований и электроядерного производства энергии [1—3]. Радиационный разогрев свинцовой мишени требует ее интенсивного охлаждения теплоносителем, движущимся по многочисленным каналам внутри. В качестве теплоноси-