

P8-2003-27

Л. Б. Голованов, Ю. Т. Борзунов, Ю. А. Панебратцев,
А. П. Цвинев, В. Ф. Чумаков, С. С. Шиманский,
К. З. Бабаян*, А. Е. Мирзоян*, Г. Д. Мовсисян*,
А. М. Сирунян*

**РАБОТА ЖИДКОДЕЙТЕРИЕВОЙ МИШЕНИ
ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ НА ЕРЕВАНСКОМ КОЛЬЦЕВОМ
УСКОРИТЕЛЕ ЭЛЕКТРОНОВ**

*Ереванский физический институт

1. Введение

Летом 1998 г. после семилетней остановки был запущен Ереванский кольцевой ускоритель электронов АрУС и получен пучок линейно-поляризованных фотонов когерентно-тормозного излучения электронов с энергией 4,15 ГэВ на монокристалле алмаза.

Это позволило продолжить исследования асимметрии сечения процесса фоторасщепления дейтронов $\gamma + d \rightarrow p + n$ в области энергий $E_\gamma > 1$ ГэВ [1].

При этих исследованиях мишенью служил жидкий дейтерий. С этой целью была использована разработанная в ЛВЭ ОИЯИ установка, позволяющая конденсировать дейтерий и продолжительное время поддерживать его в жидком состоянии.

В работе описана установка, особенности ее работы в ЕрФИ и приведены эксплуатационные параметры.

2. Краткое описание дейтериевой мишени МКРГ-11 (ОИЯИ)

На рис.1 показана схема мишени МКРГ-11, работавшая в сеансе 1998 г. в ЕрФИ на пучке линейно-поляризованных фотонов.

Мишень состоит из внутреннего сосуда (1), заполняемого жидким D_2 , и вакуумного кожуха (2).

Внутренний сосуд имеет форму цилиндра со сферическими доньшками. Диаметр сосуда $d=70$ мм, длина, заполняемая жидким D_2 -327 мм. Внутренний сосуд изготовлен из майларовой пленки толщиной 125мкм. Цилиндрическая часть сосуда разделена вертикальными перегородками из майлара толщиной 50мкм на три

секции длиной 100мм, 100мм и 127мм. Перегородки в верхней части имеют отверстия. Это позволяет иметь три варианта заполнения мишени жидким D_2 , по длине 100мм, 200мм или 327мм. Рабочий объем мишени (V_{po}), заполняемый жидким D_2 , -1190см³. По вариантам заполнения секций: I-353см³; I+II-706см³; I+II+III-1190см³.

Вакуумный кожух цилиндрической формы со сферическим доньшком изготовлен из пенопласта ПС-1 ($\gamma \approx 0,1 \text{ г/см}^3$) толщиной $\delta = 10 \text{ мм}$. На входе пучка вакуумный кожух имеет окно из майларовой пленки толщиной 190мкм ($\gamma = 1,35 \text{ г/см}^3$). Количества вещества на пути частиц представлены в табл.1 и 2. Конденсация дейтерия производится жидким гелием, при этом используется теплота испарения жидкости и теплосодержание газа в диапазоне от 4 до 23К. Жидкий гелий поступает из рабочего 100л сосуда Дьюара СД12 (рис.1). Расход жидкого гелия в стационарном режиме в среднем составлял 0,65л/ч, а время непрерывной работы не менее 5 суток. Мишень работает автоматически и автономно без, использования электроэнергии.

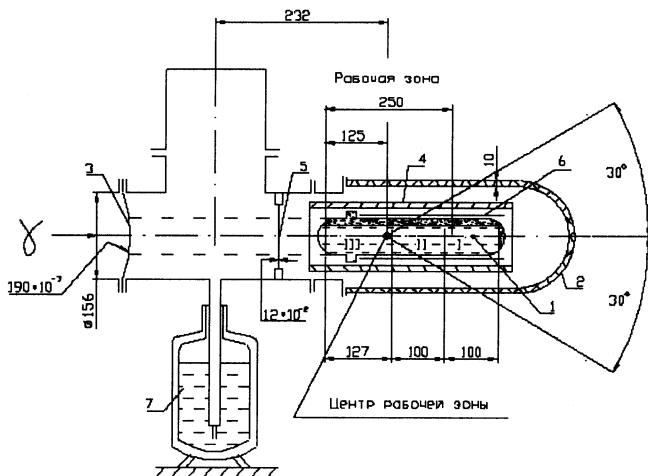


Рис. 1 Схема мишени:

1. внутренний сосуд с секциями: I, II, III;
2. вакуумный кожух;
3. окно вакуумного кожуха;
4. теплоизоляция ;
5. экран на входе пучка в мишень;
6. экран на выходе частиц из мишени;
7. рабочий сосуд Дьюара СД-12

Таблица 1
Количество вещества мишени на пути первичных частиц
(рабочая зона мишени =25см, см.рис.1)

Позиц. на рис.		Материал	Толщина (см)	Плотность (г/см ³)	Кол. вещества (г/см ²)
3	окно вакуумного кожуха	лавсан	$190 \cdot 10^{-4}$	1,35	0,0256
5	экран на входе пучка в мишень	лавсан	$12 \cdot 10^{-4}$	1,35	0,0016
1	доньшко внутреннего сосуда	лавсан	$125 \cdot 10^{-4}$	1,35	0,0168
1	перегородки во внутреннем сосуде	лавсан	$2 \cdot 50 \cdot 10^{-4}$	1,35	0,0135
	дейтерий (рабочая зона- 25см)	D ₂	25	0,165	4, 2

Примечание: D₂ - 98.6%; вещества стенок - 1.4%.

Таблица 2
Количество вещества на выходе вторичных частиц
из мишени под углом 90° и 30°, см.рис.1

Позиц. на рис.1		Материал	Толщина (см) под углом 90° к оси мишени	Количество вещества (г/см ²)	
				под углом 90° к оси мишени, K _{90°}	под углом 30° к оси мишени, K _{30°}
	Вещество мишени	жидкий D ₂	d/2=3.5	0,577	1,154
1	стенка внутреннего сосуда	Лавсан	$125 \cdot 10^{-4}$	0,0168	0,0336
6	экран	Лавсан	$50 \cdot 10^{-4}$	0,0067	0,0134
4	тепло-изоляция 10 слоев	Лавсан	$10 \cdot 10 \cdot 10^{-4}$	0,0135	0,027
2	вакуумный кожух	пенопласт ПС-1	1.0	0,10	0,20

Σ 0,714 Σ 1,428

3. Особенности работы мишени в ЕрФИ

Сравниваются контрольные испытания мишени в Дубне и ее работа в Ереване во время набора статистики. Условия работы мишени, приведенные в табл.3, отразились на рабочих параметрах установки.

Таблица 3

		Дубна	Ереван
1	Рабочее вещество мишени	водород	Деутерий
2	барометрическое давление (среднее, мм рт. ст.)	760	670
3	объем ресиверов для рабочего газа(%)	100	80
4	газ, используемый для "промывки" ресиверов (откачка -заполнение-откачка)	Водород	Гелий
5	Сжатый воздух для пневматики	от централизованной пневмо-системы	от автономной системы "пневно-азот"

Количество холода (Дж), отдаваемого 1л жидкого гелия при реконденсации водорода (дейтерия): $Q=[\gamma + C_p(T_{H_2(D_2)} - T_{He})] \rho$, где: γ - теплота испарения гелия (Дж/г), C_p - теплоемкость газообразного гелия (Дж/г/К), $T_{H_2(D_2)}$ - температура конденсации водорода (дейтерия) при рабочем давлении в мишени (К), ρ - плотность жидкого гелия, при рабочем давлении в конденсаторе (г/л.жидк.).

Давления, при которых работала мишень.

В Дубне: Конденсация H_2 - $P_B + 0,05 \text{ати} = 1064 \text{ГПа}$,
Испарение He - $P_B + 0,5 \text{ати} = 1520 \text{ГПа}$.

В Ереване: Конденсация D_2 - $P_B + 0,03 \text{ати} = 927 \text{ГПа}$,

Испарение He - $P_B + 0,5 \text{ати} = 1340 \text{ГПа}$.

В расчетах было принято барометрическое давление (P_B):

в Дубне - 760мм рт.ст.

в Ереване - 670мм рт.ст.

Физические параметры гелия, водорода и дейтерия при рабочих давлениях приведены в табл. 4 и 5.

Количество холода, передаваемое от гелия при различных условиях работы мишени, приведено в табл.6.

Таблица 4

Физические параметры гелия

	Дубна	Ереван
P – рабочее давление (ГПа)	1520 (760мм рт.ст.= 1013ГПа)	1340(670мм рт.ст.= 893ГПа)
T – температура кипения (К)	4,68(4,215)*	4,54(4,075)
ρ – плотность жидкости (г/л)	114(125,5)	118(127,6)
γ – теплота испарения (Дж/Г)	17,2(20,9)	18,8(21,54)
C_p – теплоемкость газа (Дж/(г*К))	5	5

Таблица 5

Температуры кипения H_2 и D_2 при стандартных и рабочих (ст. и раб.) давлениях.

давление(ГПа) (мм рт.ст.)	ст.1013 760	раб. 1064 $P_B + 0,05$ ати	ст.893 670	раб.927 $P_B + 0,03$ ати
температура H_2 (К)	20,38	20,55		
температура D_2 (К)			23,2	23,4

Таблица 6

Количество холода отдаваемого 1л жидкого гелия (Дж/л.жидк.Не) при реконденсации рабочего вещества мишени (H_2 и D_2) при разных барометрических давлениях (P_B)

рабочее давление (ГПа)	1064 (Дубна)	927 (Ереван)
H_2	10 980.	11 340.
D_2	12 960.	13 320.

Из расчета видно, что при одном и том же теплопритоке к рабочей жидкости, расход жидкого гелия в Ереване при работе на D_2 меньше, чем в Дубне при работе на H_2 на 17,6%. Если в Дубне расход жидкого гелия был 0.7л/час, то в Ереване 0.65л/час.

Изменение P_B с 760 на 670 уменьшает расход гелия на 3%, а переход с H_2 на D_2 на 15%.

* В скобках приведены данные для $P_B = 760$ и $P_B = 670$ мм рт.ст.

4. Объем ресивера и заполнение мишени жидким дейтерием

Газообразный дейтерий, который идет в мишень на конденсацию, поступает из ресивера. Объем ресивера:

$$V_p = (V_M \cdot A \cdot K_T \cdot K_p) / (P_{\max} - P_{\min}) \quad [\text{л}],$$

где: $V_M = V_{p.o.} + V_K$;

V_M - объем мишени, заполняемый жидкостью (л), $V_M = 1,280$ л;

$V_{p.o.}$ - рабочий объем мишени, заполняемый жидкостью (л).

При его определении принимали длину цилиндрической части мишени $l = 32,7$ см, высота жидкости в мишени $h = 6,2$ см, $V_{p.o.} = 1,190$ л;

V_K - объем коммуникаций мишени (подводящие трубки, конденсатор и т.п.) заполняемый жидкостью (л), $V_K = 0,09$ л;

A - объем газообразного дейтерия при 0°C и 1013 ГПа (760 мм рт.ст.) при испарении 1 л жидкого, $A = 950$ л.г./л.ж;

P_{\min} - минимальное давление - рабочее давления в системе мишень - ресивер, при котором V_M заполнено жидкостью. $P_{\min} = 0,03$ кг/см².

P_{\max} - максимальное давление - давление дейтерия в системе мишень - ресивер, когда весь дейтерий находится в газообразном состоянии, $P_{\max} = 0,7$ кг/см²;

K_T - коэффициент, учитывающий температуру газа в ресивере

$K_T = (273 + t) / 273$; при $t = 20^\circ\text{C}$, $K_T = 1,07$;

K_p - коэффициент, учитывающий давление дейтерия, $K_p = 760 / 670 = 1,13$.

$$V_p = (1,280 \cdot 950 \cdot 1,07 \cdot 1,13) / (0,70 - 0,03) = 2196 \text{ л.}$$

К началу эксперимента в ЕрФИ были изготовлены 5 сосудов общей емкостью 1433 л т.е. не хватало сосудов объемом 763 л. Было принято решение:

- увеличить P_{\max} с $0,7$ до $0,8$ кг/см².
- Подсоединить к существующим емкостям еще 2 пустых емкости (сосуда Дьюара) по 100 л.

После заполнения мишени жидким дейтерием I секция имела высоту уровня жидкости 62 мм, II - 62 мм, III - 40 мм.

Для того, чтобы пучок всем сечением проходил через дейтерий третьей секции, мишень была поднята на 10 мм (см.рис 2)

При заполнении всех секций мишени целиком жидким D_2 необходимо иметь ресивер $V_p = 2196$ л. Для заполнения ресивера дейтерием до $P_{\max} = 1,7$ ата необходимо иметь газообразного дейтерия $V_d = V_p \cdot P_{\max} = 3733$ л. При заполнении ресивера дейтерием из 40 л баллона давление должно быть не менее $3433 / 40 = 95$ атм.

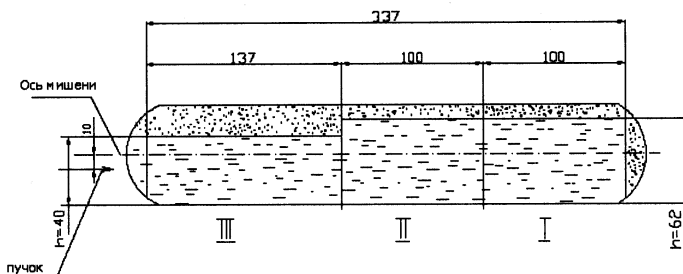


Рис.2 Размещение внутреннего сосуда мишени на пучке

5. Примеси, поступающие с D_2 в конденсатор

Газообразный дейтерий, поставляемый промышленностью, имеет чистоту 99,99%, что составляет $1 \cdot 10^{-4}$ объемных долей примеси (1 м^3 газа при $P=1 \text{ атм}$ имеет примесей 100 см^3).

Дейтерий перед заполнением ресивера был пропущен через систему очистки (активированный уголь, охлажденный до азотной температуры). Этот способ очистки позволяет получать газ D_2 с примесями не более $1 \cdot 10^{-9}$ объемных долей, т.е. 1 мм^3 примесей на $1 \text{ м}^3 D_2$.

Ресивер, состоящий из 7 емкостей, после изготовления был испытан на прочность и плотность, просушен сухим азотом и откачан. Предельный вакуум, который удалось получить внутри ресивера, $-1 \cdot 10^{-1} \text{ мм рт.ст.}$ Заполняя такой ресивер чистым дейтерием ($1 \cdot 10^{-9}$ об. долей примеси) в нем будут получать $1 \cdot 10^{-4}$ об. долей примесей, т.к. примеси определяются глубиной откачки ресивера.

При расчете максимально допустимого объема твердых примесей принимаем, что он должен быть не больше объема цилиндра, у которого диаметр равен внутреннему диаметру (d) трубки теплообменника в зоне температур $43 \pm 33 \text{ К}$, по которому проходит газообразный D_2 , а высота - $2d$. Если $d = 5 \text{ мм}$, $h = 10 \text{ мм}$, то $V \approx 0.2 \text{ см}^3$ или примеси газа должно быть не более 200 см^3 .

В нашем случае, емкость 1633л откачанная до $1 \cdot 10^{-1} \text{ мм рт.ст.}$, содержит объем газа (примесей) $\sim 240 \text{ см}^3$.

Обычно при работе с H_2 , откачав ресивер до $1 \cdot 10^{-1} \text{ мм рт.ст.}$, заполняют его очищенным H_2 с $1 \cdot 10^{-9}$ примесей, затем делая вторично откачку и заполнение, имеют примесей 16 мм^3 газа. Т.к. такого количества D_2 для промывки не было, провели промывку ресиверов чистым газообразным гелием, испаряющимся из дьюара. Объем газообразного гелия в виде примеси в количестве 240 см^3 не

даст закупорки, но скапливаясь в конденсаторе дейтерия может несколько увеличить давление конденсации. В нашем случае давление повысилось до 0,1 атм (вместо 0,03 атм). Количество газообразного He в конденсаторе при $T = 23\text{K}$ было приблизительно 10см^3 . Этот гелий после конденсации D_2 был "сброшен" в атмосферу "продувкой" конденсатора.

6. Система "пневмоазот"

Установка с мишенью, заполненной криогенной жидкостью, работает автоматически. Это значит, что для данной мишени уровень жидкого дейтерия в мишени поддерживается постоянным с точностью $\pm 1\text{мм}$.

Система автоматики работает от сжатого воздуха (газа). Необходимые параметры воздуха: давление 1,4-0,7ати, расход 3÷5л.газа/мин. Газ должен быть сухим и без механических примесей. Обычно мишени обеспечивались воздухом с такими параметрами от централизованных пневмосистем.

Так как в ЕрФИ нет централизованной сети сжатого воздуха, была разработана транспортная система "пневмоазот", основанная на газификации жидкого азота. Система состоит из четырех основных элементов. Схема системы "пневмоазот" показана на рис.3.

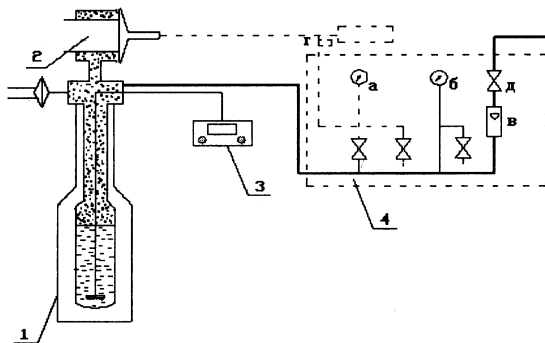


Рис.3. Схема системы "пневмоазот".

1. Сосуд Дьюара СТГ-100 с жидким азотом.
2. Регулятор давления в дьюаре.
3. Электронагреватель с источником питания.
4. Пульт газовый: "а" - манометр для измерения опорного давления; "б" - манометр для измерения давления в пневмосистеме; "в" - ротаметр для измерения расхода газа, "г" - ниппель; "д" - вентиль для регулировки расхода газа.

Первоначально опорное давление $1,0 \pm 0,5$ атм подается на мембрану регулятора через ниппель "г". Мощность нагревателя подбирается такой, чтобы сброс N_2 в атмосферу был минимальным. С помощью вентиля "д" по ротаметру "в" регулируется поток газа. Давление в пневмосистеме контролируется по манометру "б", опорное давление по "а". По справочнику [3] теплоприток к СТГ-100 составляет 0,04Вт. Для работы пневмосистемы необходимо подводить 12Вт. Для работы данной пневмосистемы был выбран дьюар с повышенной испаряемостью, что позволило обойтись без дополнительной мощности. 100 литров жидкого N_2 было достаточно на 5 суток работы пневмосистемы.

при отсутствии "плохих" дьюаров можно воспользоваться электронагревателем на 12В с источником питания от сети или с двумя попеременно работающими автомобильными аккумуляторами емкостью 55А·ч. Сопротивление нагревателя при $T=77K$ должно быть $\sim 12,0\Omega$.

7. Расход жидкого гелия

Расход жидкого гелия при эксплуатации дейтериевой мишени условно можно разделить на три части:

1. Основной расход жидкого He для компенсации теплопритока к жидкому D_2 . Он зависит от конструкции мишени и системы теплоизоляции и составляет $\sim 0,65$ л жидк./ч.
2. Технологический расход:
 - а). при заполнении из оживителя транспортного 100л дьюара СТГ-100 заливается не более 80л;
 - б). при переливании из транспортного дьюара в "холодный" рабочий СД-12 испаряется около 5л и остается в транспортном около 5л;
 - в). при первоначальном охлаждении мишени и конденсации дейтерия расходуется около 15 ± 20 л.
3. "Организационные потери":

Повышенный теплоприток к транспортным дьюарам СТГ-100 и поставка их "слишком" заблаговременно. В зависимости от качества дьюара испаряемость их от 2 до 10л/сут. Паспортные данные 1,35 л/сут.

В табл.7 приведен расход жидкого гелия во время эксперимента в период с 3 ноября по 11 декабря 1998г.

Таблица 7

Ном п/п.	Дата заполнения раб. дьюара в сеансе 1998 г.	Кол. жид. Не в раб. дьюаре после заливки, л	Остаток Не в рабочем дьюаре, перед очередной заливкой, л	Время непрерывной работы мишени между доливками, ч	Средний расход Не во время работы мишени л/ч
1	3,11	50	10	52	0,77
2	5,11	50	0	101	0,49
3	9,11	75	0	140	0,53
4	15,11	75	0	100	0,75
5	19,11	75	10	100	0,65
6	23,11	80	8	74	0,97
7	27,11	70	14	71	0,98
8	30,11	82	12	153	0,45
9	06,12	80	8	105	0,68
Σ		637	62	896	0,65

Примечание: средний расход гелия в Дубне при работе на H_2 -0,75л/ч.

6. Параметры установки с дейтериевой мишенью

Работа мишени и вспомогательных систем периодически контролировалась по приборам и визуально. Запись показаний производилась один раз в сутки.

Ниже приведены основные и вспомогательные усредненные эксплуатационные параметры установки.

Основные параметры:

I. Мишень:

- 1). давление в мишени (ресивере), атм - $0,03 \pm 0,04$;
- 2). высота уровня жидкости в секциях мишени, %: I-90, II-90, III-55;
- 3). расход жидкого гелия - $0,65 \text{ л. жидк. Не/ч.}^*$
- 4). вакуум в вакуумном кожухе мишени, мм рт.ст. - $(1 \pm 5) \cdot 10^{-5}$.

II. Рабочий дьюар СД-12:

- 1). количество жидкого Не в рабочем дьюаре после заливки было не более 75-80л;
- 2). давление Не в рабочем дьюаре, атм - $0,5 \pm 0,2$.

III. Система "пневмоазот":

- 1). давление азота в дьюаре СТГ-100, атм - 0,7;
- 2). опорное давление, атм - 0,5;
- 3). поток газообразного азота для работы пневмосистемы, л/мин - 3 ± 5 .

*Расход жидкого Не, определялся по уровню жидкого гелия в дьюаре СД-12 и по ротаметрам РС-5 и РС-3.

9. Заключение

1. Проведен совместный эксперимент на ускорителе в ЕрФИ с жидкодейтериевой мишенью ЖДМ, разработанной в ЛВЭ ОИЯИ.
2. Получены первые данные по асимметрии сечения процесса фоторасщепления дейтронов линейно-поляризованными фотонами в области $E_\gamma > 0,9$ ГэВ.
3. ЖДМ проработала на ускорителе непрерывно 38 дней с 3.11.98 по 11.12.98 (896 часов). В течение этого времени 9 раз произошло заполнение рабочего дьюара жидким гелием
4. Для поддержания мишени в рабочем состоянии средний расход жидкого гелия составил 0,65л/час. Максимальное время непрерывной работы мишени в автоматическом режиме без дозаливки гелия 160ч (6сут).
5. Для работы мишени в автоматическом режиме использовалась пневмоавтоматика. Для обеспечения работы пневмоавтоматики сжатым газом была разработана система "пневоазот" с газификацией жидкого азота. Она непрерывно подавала 3,5л/мин газообразный азот при давлении 0,7атм и работала без пополнения жидким азотом ~6сут.
6. Уменьшение остаточного давления азота при откачке ресивера проводилось двукратной откачкой и заполнением его газообразным гелием (вместо рабочего газа дейтерия).
7. Экспериментально подтверждено, что при работе мишени на дейтерии расход гелия уменьшается на 15% по сравнению с работой на водороде.
8. Основным недостатком при эксплуатации мишени являлись закупорки при переливании жидкого гелия из транспортного дьюара СТГ-100 в рабочий СД-12. Из 9 переливаний в 5 случаях были закупорки. Необходимо проверить существующие гипотезы закупорок и устранить недостаток.

Авторы благодарят проф. Г.А. Вартапетяна и проф. А.Н. Сисакяна за поддержку при проведении эксперимента на ускорителе ЕрФИ, К.Ш. Агабабяна, Н.М. Добровольского и сотрудников криогенного отделения ЕрФИ за своевременное обеспечение хладоагентами, главного инженера ОЗФ Л.С. Багдасаряна и сотрудников службы за качественный и своевременный монтаж и демонтаж криогенной установки.

Литература

1. Борзунов Ю.Т., Голованов Л.Б. и др. Жидководородная мишень с реконденсацией водорода гелием. ПТЭ.1984. №3.с.30.
2. Иноземцев Н.Н. и др. Автоматический пневмоклапан для поддержания постоянного давления в сосудах с жидким гелием. Заводская лаборатория. 1970. №6.
3. Справочник по физико-техническим основам криогенки.
/ Под ред. проф. М.П.Малкова. М.:Энергоатомиздат, 1985.

Получено 10 февраля 2003 г.

Голованов Л. Б. и др.

P8-2003-27

Работа жидкодейтериевой мишени
Объединенного института ядерных исследований
на Ереванском кольцевом ускорителе электронов

Описана криогенная установка с мишенью, заполненной жидким водородом (дейтерием), разработанная в ЛВЭ ОИЯИ. Установка использовалась в сеансе на Ереванском кольцевом ускорителе с пучком поляризованных фотонов. Приведено описание установки, особенностей ее работы в ЕрФИ и эксплуатационные параметры.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий им. В. И. Векслера и А. М. Балдина ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2003

Перевод авторов

Golovanov L. B. et al.

P8-2003-27

Work of the Liquid Deuterium Target
of the Joint Institute for Nuclear Research
at the Yerevan Electron Acceleration Ring

A cryogenic installation with a target filled with liquid hydrogen (deuterium), developed in the LHE JINR is described. The installation was used in an experimental run at the Yerevan ring accelerator with a beam of polarized photons. A description of the installation, features of its work in the YerPhI and its operational parameters is given.

The investigation has been performed at the Veksler-Baldin Laboratory of High Energies, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2003

Редактор *М. И. Зарубина*
Макет *Н. А. Киселевой*

Подписано в печать 31.03.2003.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,75. Уч.-изд. л. 1,01. Тираж 235 экз. Заказ № 53834.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@pds.jinr.ru

www.jinr.ru/publish/