

Г. Г. Гульбемян, Б. Н. Гикал, А. Галл¹, И. В. Калагин,
Г. Н. Тимошенко, Х. К. Пачаджиев²

**УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВЕЛИЧИНЫ ТОКА
В КАНАЛАХ ТРАНСПОРТИРОВКИ ВНЕШНИХ
ПУЧКОВ ЦИКЛОТРОНА DC-72**

¹Словацкий технический университет, Братислава
(E-mail: gall@nrsun.jinr.ru)

²База развития и внедрения по физике, БАН, София

Введение

Для измерения величины ионного тока пучка в каналах транспортировки различных ускорителей используются устройства, в основе которых лежит цилиндр Фарадея (ЦФ). Конкретная конструкция данных устройств определяется следующими параметрами регистрируемых пучков: энергией частиц в пучке, средней мощностью пучка, размерами пучка в месте измерения. Также конструкцию во многом определяют требования радиационной безопасности, связанные с наличием наведенной радиоактивности от регистрируемого пучка в конструкционных материалах цилиндра Фарадея.

Таким образом, при создании новых ускорительных установок для регистрации пучков часто требуется либо разрабатывать новую конструкцию данного устройства, либо проводить анализ возможности использования уже известных конструкций. Современные компьютерные программы позволяют существенно облегчить эту задачу.

Данная работа посвящена разработке с помощью компьютерных программ цилиндра Фарадея для измерения величины ионного тока пучка в каналах транспортировки циклотрона DC-72 для Циклотронного центра Словацкой Республики.

Исходные данные

Проектные параметры ионных пучков циклотрона DC-72 приведены в табл. 1. В процессе измерения пучок ионов попадает на чашку цилиндра Фарадея и заряд, созданный пучком, стекает с чашки через систему измерения. Информация о величине ионного тока выдается на монитор на пульте управления ускорителем.

Таблица 1. Проектные параметры пучков циклотрона DC-72 [1]

Канал №	Технологии и установки	Тип иона	Энергия [МэВ/нукл.]	Интенсивность		Мощность [Вт]
				[мкА]	[частиц/с]	
1	Пр-во ^{123}I	p	30	50	$3.12 \cdot 10^{14}$	1500
2	Пр-во ^{87}Rb	p	30	30	$1.87 \cdot 10^{14}$	900
3	Пр-во ^{67}Ga , ^{201}Tl , ^{111}In	p	30	100	$6.24 \cdot 10^{14}$	3000
4	Протонная терапия	p	72	0.05	$3.12 \cdot 10^{11}$	4
5	Терапия быстрыми нейтронами	p	66÷72	30÷35	$(2\pm 2.2) \cdot 10^{14}$	2500
6	Прикладные исследования	Li-Xe	2.8–2.7	5÷1	$(10\pm 0.2) \cdot 10^{12}$	35
7	Масс-сепаратор	C-Kr	8.6–2.8	20÷2	$(20\pm 0.7) \cdot 10^{12}$	345
8	Физические исследования	Li-Xe	2.8–2.7	5÷1	$(10\pm 0.2) \cdot 10^{12}$	35

Выбор материала чашки ЦФ

В мире существует множество конструкций ЦФ, в которых использовались различные материалы. В большинстве случаев как материал для чашки ЦФ применяют медь, потому что у нее большой коэффициент теплопроводности $\lambda \sim 4.0$ Вт/см·К [2], что позволяет измерять ток пучков большой мощности ~ 60 кВт [3]. Также применяется вольфрам [4]: он имеет высокую температуру плавления

$T_{\text{плав}}=3420\text{ }^{\circ}\text{C}$ [2]. Графит как материал чашки ЦФ используется на пучке протонов с энергией 200 МэВ, мощностью 2 кВт на циклотроне AGOR [5]. При производстве радиоизотопов на циклотроне TRIUMF/EBCO TR30 [6] используют мишень, конструкция которой сделана из алюминия, она работает на пучке протонов с энергией 30 МэВ и мощностью 12 кВт.

При разработке конструкции чашки ЦФ основное внимание уделялось возможности измерения токов пучков протонов на каналах №3 и №5 циклотрона DC-72, так как они имеют максимальную интенсивность и мощность (табл. 1). С точки зрения эксплуатации ЦФ на каналах транспортировки циклотрона DC-72 представляется выгодным иметь универсальную конструкцию чашки ЦФ, пригодную для измерения токов всех ускоряемых ионов.

Исходя из параметров протонных пучков можно сформулировать основные требования к материалу чашки ЦФ следующим образом:

1. Материал должен иметь высокий коэффициент теплопроводности λ , чтобы обеспечить отвод выделяемой мощности.
2. Материал должен иметь высокую температуру плавления.
3. Наведенная радиоактивность материала должна быть минимальной для обеспечения требований радиационной безопасности.

В качестве возможных конструкционных материалов для чашки ЦФ рассматривались следующие материалы: Al, Cu, Fe, W, и C. В табл. 2 приведены значения мощности дозы гамма-квантов от пластины с размерами 35x8xT см из указанных материалов, облученных пучком протонов с энергией 72 МэВ и интенсивностью $2 \cdot 10^{14}\text{ c}^{-1}$ в течение 1 сут на расстоянии 1 м перпендикулярно к их плоскости со стороны входа пучка [7]. Данные приведены для времен выдержки после окончания облучения $t_{\text{выд}}=14.4\text{ мин, 1 ч, 1 сут, 7 сут}$.

Таблица 2. Мощность дозы γ -квантов [рад/ч] от пластины размером 35x8xT см

Материал	T[см]	$t_{\text{выд}}$			
		14.4 мин	1 ч	1 сут	7 сут
W	0.5	9.7	8.3	0.9	0.005
Cu	0.8	20.1	13.4	0.21	0.11
Fe	0.9	7.4	2.5	1.2	0.6
Al	2.1	78.2	74.2	26.1	0.007
C	2.2	40.2	11.2	0.019	0.018

Табл. 2 показывает, что из рассмотренных металлов наиболее выгодным с точки зрения радиационной опасности, обусловленной наведенной активностью, является вольфрам. Он имеет наименьшую долговременную активность, с одной стороны, а с другой—создает приемлемые уровни излучения в промежутках между сеансами облучения, что позволяет проводить в зоне диагностических устройств ремонтно—профилактические работы при надлежащей их регламентации.

Алюминий также имеет малую долговременную активность после 7 сут выдержки $\sim 7\text{ мрад/ч}$, но при $t_{\text{выд}}=1\text{ ч}$ и 1 сут его активность еще значительна.

Медь и железо имеют большую долговременную активность даже после недельной выдержки (Cu ~110 мрад/ч, Fe ~600 мрад/ч), что по условиям радиационной безопасности ограничивает их применение. С точки зрения радиационной безопасности применение алюминия является более выгодным, чем применение меди [6, 7].

Помимо рассмотренных металлов вызывает интерес использование в качестве материала чашки углерода (например, реакторного графита). При его активации протонами данной энергии образуются два основных радионуклида, приводящих к образованию гамма-квантов – ^{11}C и ^7Be с сильно различающимися периодами полураспада (20.4 мин и 53.1 сут). Сечение образования ^{11}C к тому же в 2–3 раза превышает сечение образования ^7Be . Поэтому при относительно коротких периодах облучения (~1 ч) подавляющая часть активности графита обусловлена позитронным распадом ^{11}C . Однако уже через 1 ч практически весь ^{11}C распадается. Остаточная же активность за счет ^7Be очень мала (он не успевает накопиться за 1 ч облучения). В то же время вся долговременная активность графита определяется только ^7Be . Графит весьма термостоек и является хорошим проводником. Однако есть проблема, связанная с образованием и накоплением в графите газообразного трития. Это приводит к набуханию графита и выходу трития в систему вакуумной откачки и затем в окружающий воздух, что противоречит требованиям радиационной безопасности [7].

В качестве материала чашки ЦФ предлагается использовать вольфрам или алюминий.

Выбор толщины чашки ЦФ

Основным фактором, который может повлиять на точность измерения, является утечка первичного заряда из-за проникновения ионов через стенки ЦФ. Минимальную толщину чашки ЦФ определяет средний пробег протонов с энергией $E=72$ МэВ в материале чашки. В табл. 3 приведен средний пробег R_C и дисперсия в конце пробега σ_R протонов с энергией $E=72$ МэВ в Al и W, рассчитанные по формуле Бете–Блоха [8] и по программам TRIM[9] и LISE [10].

Таблица 3. Средний пробег протонов с $E=72$ МэВ в W и Al

E=72 МэВ	W ($\rho=19.35$ г/см ³)		Al ($\rho=2.702$ г/см ³)	
	R_C [мм]	σ_R [мм]	R_C [мм]	σ_R [мм]
Бете–Блох	4.57	0.08	20.75	0.31
LISE	4.61	0.07	20.73	0.26
TRIM	4.62	0.13	20.7	0.42

Из табл. 3 видно, что минимальная толщина чашки ЦФ должна быть для Al ~21 мм, для W ~5 мм.

Функция распределения плотности ионов по сечению пучка может быть представлена в виде

$$F(x, y) = \frac{N_0}{2\pi \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y} \cdot \exp\left(\frac{-x^2}{2\sigma_x^2}\right) \cdot \exp\left(\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}\right),$$

где N_0 – общее количество протонов [с^{-1}], σ_x – дисперсия функции распределения плотности пучка по оси X ; σ_y – дисперсия функции распределения плотности пучка по оси Y . Величина N_0 равна: $N_0 = J/e$, где J – ток пучка [А], e – заряд электрона [Кл].

Для упрощения расчета мы будем рассматривать только параллельные пучки, с круглым поперечным сечением и прямоугольным распределением плотности частиц пучка по сечению. Минимальный диаметр сечения пучка принимался равным $d=5$ мм, так как по расчетам транспортировки пучков с использованием дублетов во внешних каналах DC-72 минимально достижимые размеры пучка в фокусе дублета составили $\sigma_x = 4.2$ мм и $\sigma_y = 2.6$ мм [11].

Расчеты нагрева плоской чашки цилиндра Фарадея пучками протонов

Для определения температуры в чашке ЦФ использовалась расчетная программа POISCR-CERN [12], которая решает уравнения Пуассона-Лапласа, для двухмерных задач, и программа DESIGNSPACE v 5.0 [13] для трехмерных задач.

Параметры для расчетов плоских чашек из Al и W+Al (подложка):

Для чашки из Al: диаметр $D=80$ мм, длина $L=30$ мм; теплопроводность алюминия взята $\lambda_{Al}=2.1$ Вт/см·К как худшая в интервале $\lambda_{Al}=2.1 \div 2.3$ Вт/см·К, приведенном в литературе для Al чистоты 99.5% [14]. Энергетические потери пучка протонов с энергией $E=30$ МэВ и мощностью $P=3000$ Вт в чашке ЦФ представлены на рис. 1, а с энергией $E=72$ МэВ и мощностью $P=2500$ Вт на рис. 2. На рис. 1 и 2 также показана кривая уменьшения относительного числа протонов в пучке при пробеге в алюминии.

Для чашки из W: диаметр $D=80$ мм, длина $L=5$ мм; теплопроводность $\lambda_w=1.74$ Вт/см·К [2]. Алюминиевая подложка: диаметр $D=80$ мм и длина $L=5$ мм. Энергетические потери пучка протонов с энергией $E=30$ МэВ и мощностью $P=3000$ Вт в чашке ЦФ приведены на рис. 3, а с энергией $E=72$ МэВ и мощностью $P=2500$ Вт на рис. 4. На рис. 3 и 4 также приведена кривая уменьшения относительного числа протонов в пучке при пробеге в вольфраме.

Предполагалось, что охлаждение чашки ЦФ осуществляется на боковой поверхности дистиллированной водой. Температура данной поверхности задавалась постоянной, равной $T=30$ °С. Рассматривалось распределение температуры в чашке ЦФ для параллельных пучков протонов с диаметрами 5 и 10 мм. Результаты расчетов представлены в табл. 4 и 5.

30MeV protons in Al, P=3kW

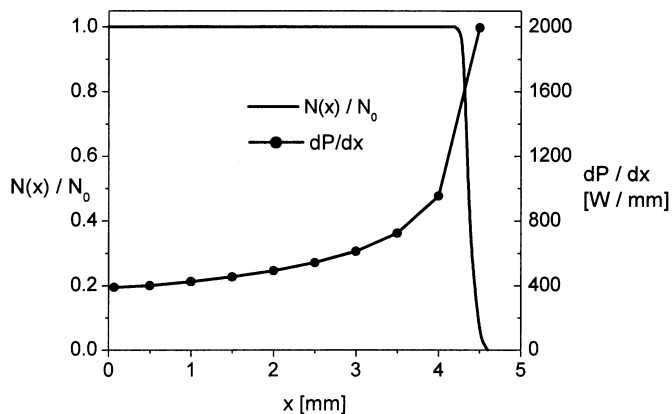


Рис. 1

72MeV protons in Al, P=2.5kW

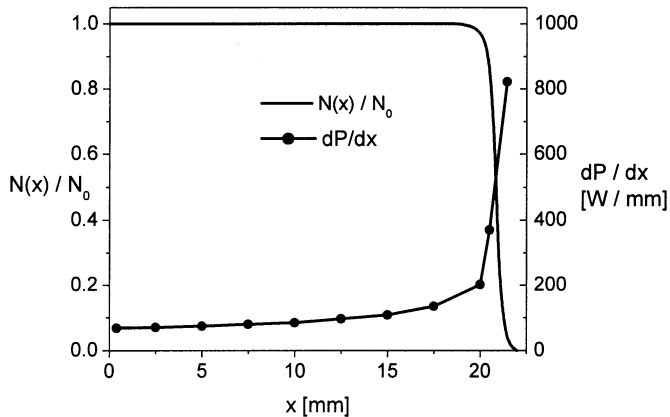


Рис. 2

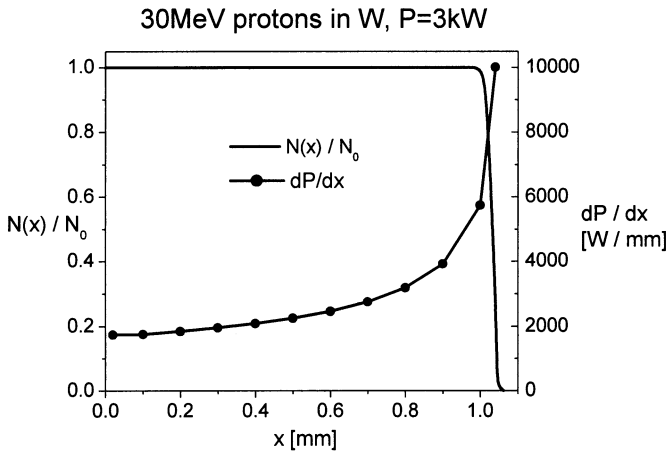


Рис. 3.

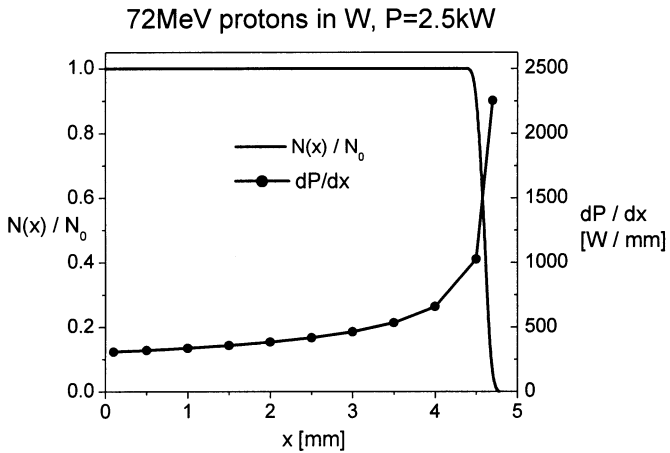


Рис. 4

Таблица 4. Максимальная температура нагрева $T_{\text{макс}}$ для чашки из Al

E [МэВ]	P [кВт]	d [мм]	$T_{\text{макс}}$ [°C]	
			POISCR	DesignSpace
30	3	5	778	819
30	3	10	546	551
72	2.5	5	328	313
72	2.5	10	239	221

Таблица 5. Максимальная температура нагрева $T_{\text{макс}}$ и максимальная температура переходного слоя $T_{\text{макс W/Al}}$ для чашки из W+Al

E [МэВ]	P [кВт]	d [мм]	POISCR		DesignSpace	
			$T_{\text{макс}}$ [°C]	$T_{\text{макс W/Al}}$ [°C]	$T_{\text{макс}}$ [°C]	$T_{\text{макс W/Al}}$ [°C]
30	3	5	1620	310	1740	305
30	3	10	811	254	872	246
72	2.5	5	648	429	830	352
72	2.5	10	406	276	485	239

Температура плавления алюминия $T_{\text{плав}}=660.24$ °C [2]. Эта предельная температура достигается для пучка диаметром 5 мм с энергией $E=30$ МэВ (табл. 4).

Температура плавления вольфрама $T_{\text{плав}}=3420$ °C [2]. Эта предельная температура не достигается, но из табл. 5 видно, что для пучка диаметром 5 мм получаются высокие температуры нагрева и высокие градиенты температур $G>150$ °C/мм, что при быстром нагреве может привести к деформации и разрушению чашки ЦФ при объемном расширении вольфрама. Этот большой градиент температуры вызван тем, что пробег протонов в вольфраме с энергией 30 МэВ составляет ~1.02 мм и, соответственно, вся мощность пучка 3000 Вт высаживается в этой толщине чашки ЦФ. (В алюминии эта толщина составляет ~4.36 мм) Поэтому вольфрам как материал чашки ЦФ также желательно не применять.

Расчеты нагрева конической чашки цилиндра Фарадея пучками протонов

Если использовать алюминий как материал чашки ЦФ, то для уменьшения ее нагрева можно применить коническую форму. При этом увеличится площадь, на которую высаживается пучок (табл. 6) и, соответственно, уменьшится максимальная температура нагрева чашки ЦФ.

Таблица 6

α [°]	S'/S
60	1.15
45	1.41
30	2

В табл. 6 α обозначает угол между осью пучка и поверхностью ЦФ (когда пучок перпендикулярен к поверхности, $\alpha=90^\circ$), S – площадь поперечного сечения пучка, S' – площадь пучка на чашке ЦФ.

Параметры для расчетов:

Размеры чашки ЦФ приведены на рис. 5. Угол между осью пучка и поверхностью ЦФ был взят 30° (конус). Этот угол являлся минимальным с точки

зрения габаритов ЦФ, так как для установки ЦФ в блоке диагностики выбран стандартный тип фланца DN-160 ISO-K.

Предполагалось, что охлаждение чашки ЦФ осуществляется на боковой поверхности дистиллированной водой. Температура данной поверхности задавалась постоянной, равной $T=30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Рассматривалось распределение температуры в чашке ЦФ для параллельного пучка диаметром $d=5\text{ мм}$.

Для расчетов использовалась программа DesignSpace v 5.0. Результаты расчета максимальной температуры нагрева в зависимости от мощности пучка приведены на рис. 6. На рис. 7-10 показано распределение температуры в чашке ЦФ.

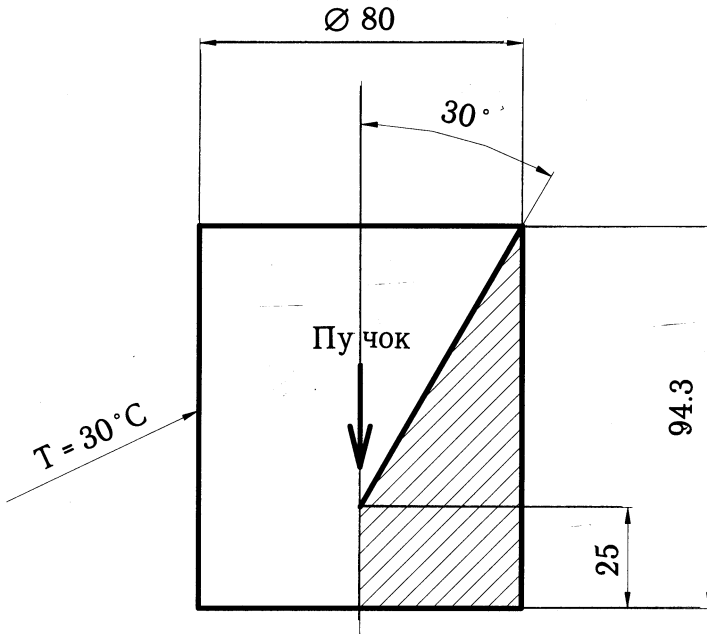


Рис. 5. Коническая чашка ЦФ

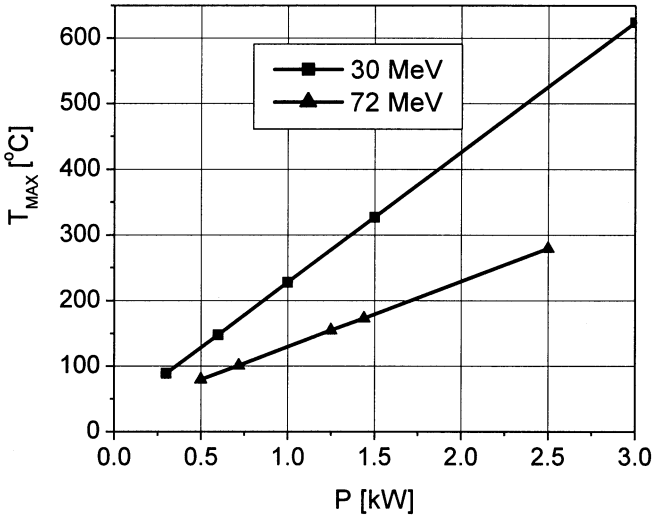


Рис. 6. Зависимость максимальной температуры нагрева от мощности пучка

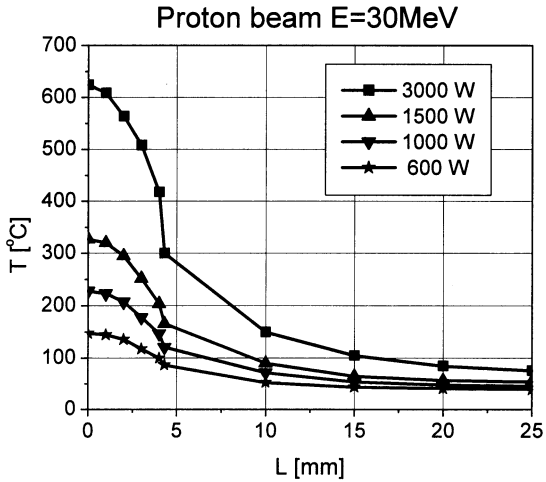


Рис. 7. Аксиальное распределение температуры в чашке ЦФ из Al для протонов с энергией E=30 МэВ

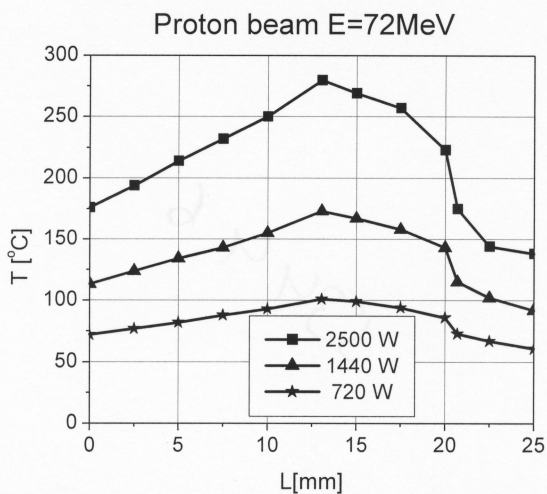


Рис. 8. Аксиальное распределение температуры в чашке ЦФ из Al для протонов с энергией E=72 МэВ

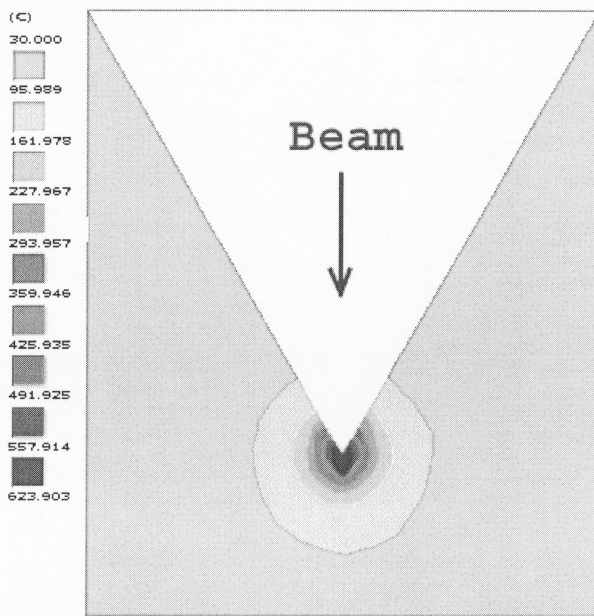


Рис. 9. Распределение температуры в чашке ЦФ из Al для протонов с энергией E=30 МэВ при токе пучка I=100 мкА и мощности пучка P=3000 Вт

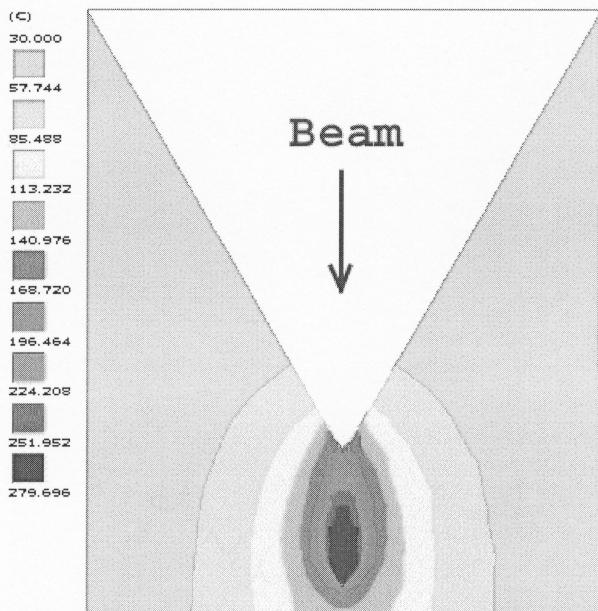


Рис. 10. Распределение температуры в чашке ЦФ из Al для протонов с энергией $E=72$ МэВ при токе пучка $I=35$ мкА и мощности пучка $P=2500$ Вт

В табл. 7 приведены результаты расчета максимальной температуры нагрева чашки ЦФ при поглощении пучков тяжелых ионов диаметра $d=5$ мм.

Таблица 7. Максимальная температура нагрева $T_{\text{макс}}$ для тяжелых ионов

Ион	E [МэВ/нукл.]	d [мм]	I [мкА]	R_c [мм]	P [Вт]	$T_{\text{макс}}$ [°C]
${}^7\text{Li}^{3+}$	2.8	5	5	0.061	35	40
${}^{12}\text{C}^{6+}$	8	5	20	0.174	345	130
${}^{20}\text{Ne}^{10+}$	8	5	20	0.108	320	127
${}^{40}\text{Ar}^{17+}$	5.5	5	20	0.055	260	105
${}^{84}\text{Kr}^{26+}$	2.8	5	2	0.028	20	40
${}^{129}\text{Xe}^{37+}$	2.7	5	1	0.030	10	34

Из рис. 6 видно, что при полной мощности протонного пучка предельная температура (температура плавления Al) не достигается. При этом температура на практике будет ниже рассчитанной, так как в расчете мы пренебрегли эффектом расхождения пучка при прохождении вещества и увеличением его размеров. Программы POISCR и DesignSpace не учитывают механизм теплоотвода излучением, что также ведет к уменьшению температуры в пределах $\sim 1\%$. Кроме того, реальный пучок имеет распределение, близкое к гауссовому, мы же рассматривали прямоугольное.

Расчет углового разброса протонного пучка с энергией $E=30$ МэВ, проведенный в программе LISE, показывает, что после 4.35 мм пробега в Al он достигнет $\sigma \approx 66$ мрад. Это ведет к увеличению диаметра пучка с $d=5$ мм до $d_\sigma \approx 5.6$ мм, а при $E=72$ МэВ с $d=5$ мм до $d_\sigma \approx 7.7$ мм.

Программа TRIM выдает для протонов с энергией $E=30$ МэВ средний пробег в Al $R_C=4.36$ мм при $\sigma_{R_C}=0.09$ мм (разброс) и разброс по радиусу $\sigma_r \approx 0.16 \pm 0.11$ мм, что ведет к увеличению диаметра пучка с $d=5$ мм до $d_\sigma \approx 5.5$ мм, а при $E=72$ МэВ с $d=5$ мм до $d_\sigma \approx 7.8$ мм.

Рабочая температура алюминия, исходя из условия пластической деформации, составляет ~ 200 °С [14]. Поэтому предлагается ограничить максимальный измеряемый ток пучка протонов на уровне $I=20$ мкА. Для этого при вводе ЦФ в рабочее положение одновременно в канал инжекции должно вводиться устройство, с помощью которого максимальная интенсивность пучка будет калиброванно уменьшена в 5 раз без существенного изменения качества пучка [15] (так называемая Реррег–Рот–маска). Это ограничение позволит выполнить условия пластической деформации, а также существенно уменьшить наведенную радиоактивность.

Из табл. 7 видно, что для пучков тяжелых ионов максимальная температура нагрева чашки ЦФ ($T_{\text{макс}}$) будет в пределах температур пластической деформации, что позволит измерять полные токи этих пучков.

Для охлаждения чашки ЦФ предлагается использовать водяное охлаждение. Вода будет проходить через медную трубку с внутренним диаметром 4 мм, запрессованную по внешней поверхности чашки. При перепаде давления 1.5 атм, расходе воды 3 л/с чашка будет способна рассеять 600 Вт при перепаде температуры воды в контуре охлаждения ~ 3 °С, что вполне достаточно для измерения тока пучка протонов до 20 мкА. В случае попадания на чашку протонного пучка мощностью 3 кВт перепад температуры воды в контуре охлаждения будет ~ 15 °С, что также приемлемо.

Уменьшение погрешности измерения токов ионов из-за влияния электронов вторичной эмиссии

При попадании заряженных частиц на чашку ЦФ могут образоваться электроны вторичной эмиссии (ЭВЭ), которые при уходе из ЦФ вносят неточность в измерение первичного тока пучка. Энергия ЭВЭ находится в интервале значений от нескольких эВ до десятков кэВ, а коэффициент вторичной ионно–электронной эмиссии от долей единицы до нескольких сотен в зависимости от типа частиц, их энергии и материала чашки [16–21].

Как правило, для устранения неточностей в измерении тока пучка, вызванных ЭВЭ, применяются следующие методы:

1. Чашка ЦФ делается в виде вытянутого стакана, с отношением длины стенки к диаметру дна $L/D=2.5-3$, что уменьшает вероятность ухода ЭВЭ [22].
2. На входе ЦФ устанавливаются постоянные магниты или электроды, создающие поле, задерживающее ЭВЭ внутри ЦФ [22].

Как правило, средняя энергия ЭВЭ находится в диапазоне 150÷300 эВ. Соответственно, величина электрического поля, задерживающего ЭВЭ, должна быть также 150÷300 В [4, 23], а величина магнитного поля $|B| \geq 100$ Гс.

Использование магнитного поля в ЦФ для DC-72

Для устранения неточностей в измерении тока пучков циклотрона DC-72, вызванных ЭВЭ, предлагается использовать магнитное поле, создаваемое постоянными магнитами в направлении, перпендикулярном продольной оси ЦФ. Зависимость радиуса движения ЭВЭ от энергии в магнитном поле $B=100$ Гс приведена на рис. 11. Использование магнитного поля, по сравнению с электрическим полем, представляется более технологичным, так как отпадает необходимость использования дополнительного источника питания и дополнительных вакуумных электрических вводов.

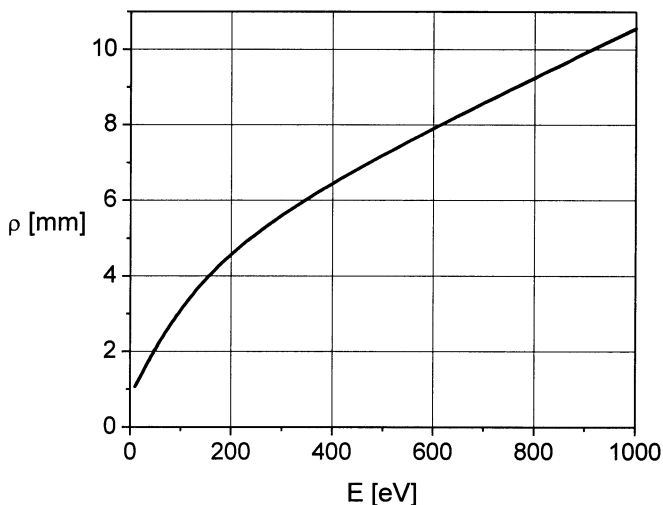


Рис. 11. Зависимость радиуса движения ЭВЭ от энергии в магнитном поле, $B=100$ Гс

Расчет магнитного поля, создаваемого постоянными магнитами в ЦФ

Для подавления электронов вторичной эмиссии предлагается использовать ферритовые постоянные магниты с параметрами $B_r > 3700$ Гс, $H_{cb} > 230$ кА/м, размерами 5x20x20 мм. Магниты располагаются в определенном порядке на диаметре 80 мм (рис. 12). Для формирования магнитного поля используется кольцевой магнитный экран. В такой конфигурации для создания требуемого поля достаточно 8 магнитов.

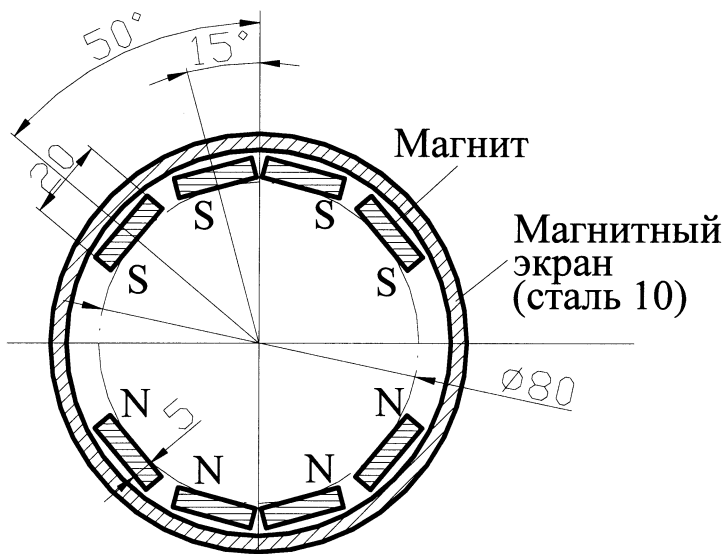
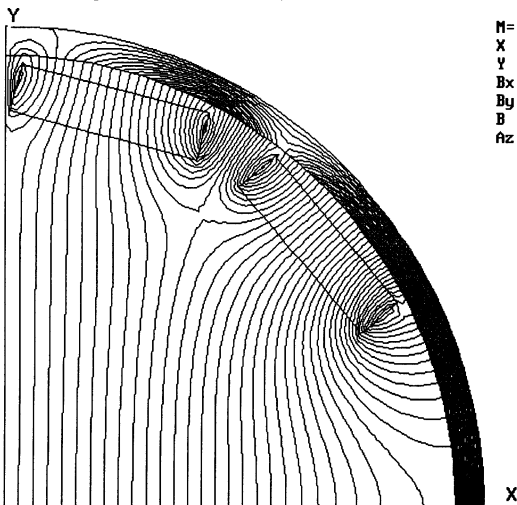


Рис. 12. Конфигурация магнитов с экраном

На рис. 13 показано распределение магнитного поля, создаваемого данными магнитами, в плоскости (X, Y), рассчитанное по программе POISSON.

--((FC magnets for DC-72))-- Cycle = 4



M= 1 K= 1 L= 1 25
 X = 0.00000 cm
 Y = 0.00000 cm
 Bx = 0.00000 G
 By = 302.54 G
 B = 302.54 G
 Az = 0.00000 G-cm

Quit New Screendump Postscript Hpgl Fields off 0=Original B=Back Z=Z0Z/3

Рис. 13. Распределение магнитного поля магнитов

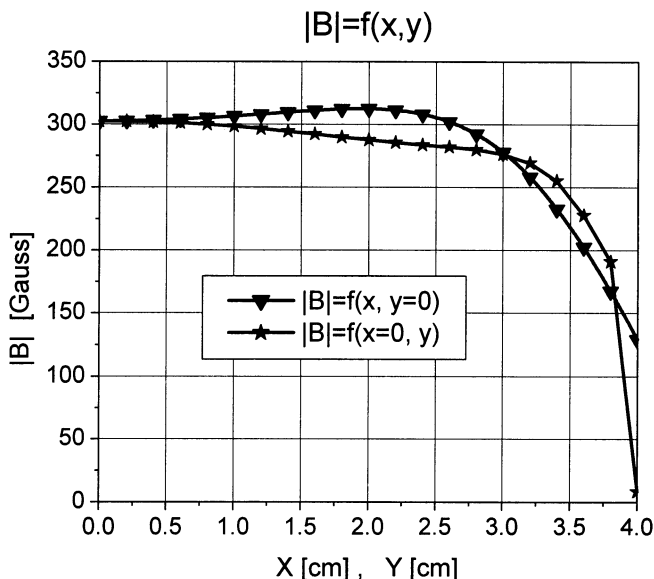


Рис. 14. Распределение поля $|B|$ вдоль осей X и Y

В табл. 8 приведены значения среднего магнитного поля в плоскости (X, Y) в определенных точках.

Таблица 8

X[см]	Y[см]	B [Гс]
0	0	302.5
1	1	303.0
1.4	1.4	304.3
2	2	309.1
2.2	2.2	317.2
2.5	2.5	373.5

Из распределения среднего поля $|B|$ вдоль осей X, Y, показанного на рис. 14, и значений поля $|B|$ в точках, приведенных в табл. 8, видно, что для рабочей области ЦФ диаметром 70 мм минимальное значение поля будет в точке [0, 3.5] $|B|=218.3$ Гс. Радиус окружности ρ , по которой будут двигаться ЭВЭ с энергией $E=300$ эВ в данном магнитном поле, составляет $\rho \sim 2.67$ мм. Поэтому магнитное поле величиной $|B| \sim 218.3$ Гс должно действовать на расстоянии минимум 3 мм от поверхности чашки ЦФ. Это достигается при использовании магнитов высотой не менее 15 мм.

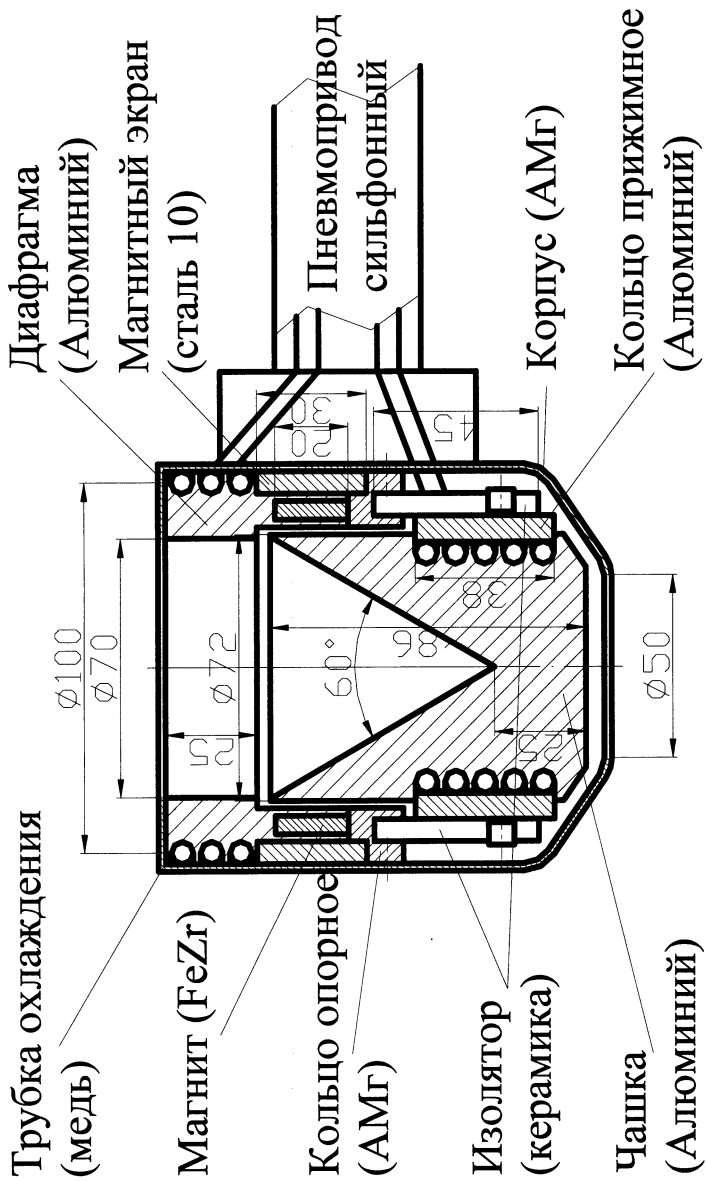


Рис. 15. Предлагаемая схема конструкции ЦФ

Заклучение

В результате сделанных оценок и расчетов была предложена схема конструкции цилиндра Фарадея для измерения токов пучков циклотрона ДС-72. Схема конструкции представлена на рис. 15. Для быстрого перемещения ЦФ в положение для измерения тока и обратно предложено использовать пневмопривод с сифонным вводом движения в вакуум.

На основе предложенной схемы в Базе развития и внедрения по физике БАН (София, Болгария) был разработан цилиндр Фарадея, конструкция которого приведена на рис. 16.

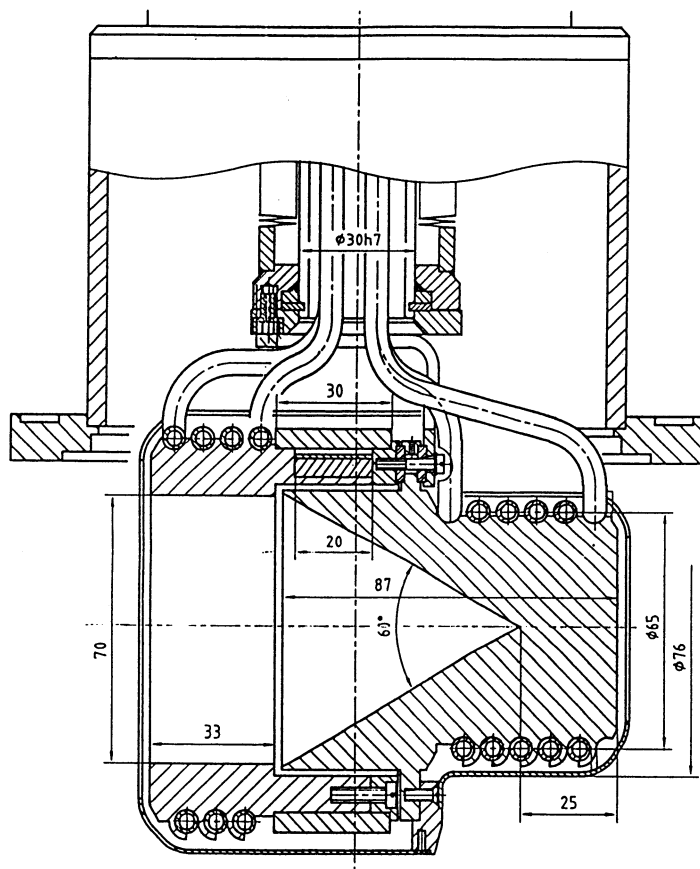


Рис. 16. Конструкция цилиндра Фарадея

Литература

- [1] Концепция циклотрона DC-72 (параметры пучков и направления оптимизации систем при разработке технического задания на проектирование), Дубна, 1998.
- [2] Григорьева И.С., Мейлихова Е.З. Физические величины. Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1991.
- [3] <http://www.princesci.com>
- [4] Strehl P. Beam instrumentation & diagnostics. Lecture notes. JUAS 1996, Volume 15.
- [5] <http://www.kvi.nl/~agorcalc/agorhome.htm>
- [6] Stevenson N.R., Gelbart W.Z., External high current targetry for radioisotope production. Cyclotrons and Their Applications, Proceeding of the 13th International Conference, Vancouver, 1992.
- [7] Тимошенко Г.Н., Оценка активации элементов диагностики пучков протонов циклотрона DC-72, ТОТ-DC-08-06.
- [8] Немец О.Ф., Гофман Ю.В., Справочник по ядерной физике. Киев, 1975.
- [9] TRIM, <http://www.srim.org>
- [10] LISE, <http://groups.nsl.msu.edu/lise/>
- [11] Система транспортировки внешних пучков изохронного циклотрона DC-72 Cyclab, Техническое задание, Дубна, 1998.
- [12] POISCR-CERN, CERN Computer centre program library.
- [13] DESIGNSPACE v5.0, <http://www.designspace.com/designspace/>
- [14] Nielsen H., Hufnagel W., Ganoulis G., Aluminium-Taschenbuch, Dusseldorf, 1974.
- [15] Miyazawa Y., Hemmi M., Chiba T., Kase M., Beam attenuation device, RIKEN Accel. Progr. Rep. 18, 1984.
- [16] Borovsky J.E., Barraclough B.L. High-velocity ionic projectiles interacting with metals: Models and measurements of secondary-electron yields from gold and aluminum targets struck by 13.5-31.5 MeV ⁷Li and 9-63 MeV ¹²C, NIM, B36, 1989, p. 377-394.
- [17] Borovsky J.E., McComas D.J., Barraclough B.L., The secondary-electron yield measured for 5-24MeV protons on aluminum-oxide and gold targets, NIM, B30, 1988, p.191-195.
- [18] Sternglass E.J., Theory of secondary electron emission by high-speed ions, Phys. Rev. 108, 1957, 1.
- [19] Garnir H.P., Dumont P.D., Baudinet-Robinet Y., Secondary electron emission from thin foils under fast ion bombardment, NIM 202, 1982, p.187-192.
- [20] Castaneda C.M., McGarry L., Cahill C., Essert T., Secondary electron yields from the bombardment of Al₂O₃ by protons, deuterons, alpha-particles and positively charged hydrogen molecules at energies in the range of 10 to 80 MeV, NIM, B129, 1997, p.199-202.
- [21] Thieberger P., Hanson A.L., Steski D.B., Zajic V., Zhang S.Y., Ludewig H., Secondary-electron yields and their dependence on the angle of incidence on stainless-steel surfaces for three energetic ion beam, Phys. Rev. A 61, 042901, 2000.
- [22] Wolf B., Handbook of ion sources, CRC Press, 1995.
- [23] Хаванчак К., Скуратов В.А., Иллеш А., Син Хон Чер, Малиновский В., Воробьев Е.Д., Щеголев В.А., Диагностика пучков тяжелых ионов в экспериментах по радиационному материаловедению. Препринт ОИЯИ 13-82-558, Дубна, 1982.

Получено 10 июля 2002 г.

Гульбекян Г. Г. и др.
Устройство для измерения величины тока
в каналах транспортировки внешних пучков циклотрона DC-72

P9-2002-164

Работа посвящена разработке устройства для измерения величины ионного тока в каналах транспортировки пучков циклотрона DC-72, создаваемого для Циклотронного центра Словацкой Республики. В основе конструкции лежит цилиндр Фарадея (ЦФ). В качестве возможных конструкционных материалов для чашки ЦФ рассмотрены Al, Cu, Fe, W, C — как с точки зрения радиационной опасности, обусловленной наведенной активностью, так и с точки зрения их нагрева протонными пучками мощностью до 3 кВт. В результате проведенных расчетов предложено использовать алюминий.

Представлены результаты расчетов распределения температуры в цилиндрической и конической чашках ЦФ при измерении тока пучка протонов с энергией 30 МэВ и мощностью 3000 Вт, а также с энергией 72 МэВ и мощностью 2500 Вт. Кроме того, представлены результаты расчета конструкции на постоянных магнитах, создающих в ЦФ магнитное поле, достаточное для устранения неточностей в измерении тока, вызванных эмиссией вторичных электронов.

В результате предложена схема конструкции устройства на основе ЦФ, перемещаемого при помощи сильфонного пневмопривода, и разработан цилиндр Фарадея.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2002

Перевод авторов

Gulbekian G. G. et al.
The Device to Measure Currents
in External Beam Transportation Lines of the DC-72 Cyclotron

P9-2002-164

The present work is devoted to the development of a device to measure ion currents in external beam transportation lines of the DC-72 cyclotron, which is being created for the Cyclotron Centre of the Slovak Republic. The device is based on a Faraday cup. As possible constructive materials for the Faraday cup, Al, Cu, Fe, W and C were considered from the point of view of both the residual radiation and heating by the proton beam of the 3 kW power. Based on the calculations performed. It was suggested to use aluminium.

The results of calculations of the temperature distribution in cylindrical and conic cups have been presented, both for a proton energy of 30 MeV at a beam power of 3 kW, and for a proton energy of 72 MeV at a beam power of 2.5 kW.

Also presented are the results of calculation of the construction with permanent magnets that create sufficient magnetic field to eliminate the influence of secondary electrons emission on the current measurement accuracy.

As a result, a sketch of the device construction with the moveable Faraday cup and bellows pneumatic drive has been suggested. On the basis of the Faraday cup has been developed.

The investigation has been performed at the Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2002

Редактор *Е. В. Калининкова*
Макет *Н. А. Киселевой*

ЛР № 020579 от 23.06.97.

Подписано в печать 25.07.2002.

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

Усл. печ. л. 1,12. Уч.-изд. л. 1,7. Тираж 285 экз. Заказ № 53446.

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