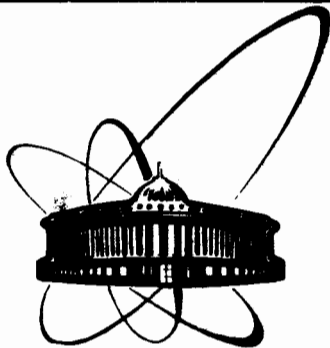


83-311



ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА

Объединенный институт  
ядерных исследований  
БЕЗЛИСТЕНА

9-83-311

Б.Н.Гикал, Г.Г.Гульбекян,  
С.И.Козлов, Р.Ц.Оганесян

ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ  
И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЦИКЛОТРОНА У-200

Направлено в "ЖТФ"

1983

# 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящей работе представлено краткое описание и даны эксплуатационные характеристики двухметрового изохронного циклотрона ЛЯР /У-200/ <sup>1/1/</sup>, запущенного в 1968 году. Опыт разработки магнитной системы циклотрона, исследование режимов его ускорения и вывода частиц имели большое практическое значение для проектирования и создания циклотронов У-200П <sup>1/2/</sup>, У-250 <sup>1/3/</sup> и самого мощного ускорителя этого класса У-400 <sup>1/4/</sup>.

Таблица 1

Ион \ Год	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982
He <sub>4</sub> <sup>1+</sup>		5,5%								2%		4%			
He <sub>4</sub> <sup>2+</sup>	92%	14%	35%	51%					2%	24%	53%	46%	25%	33%	45%
(D) <sub>2</sub> <sup>2+</sup>	8%	20%		2%						2%	0,5%				
(OH) <sub>2</sub> <sup>1+</sup>														0,1%	
C <sub>12</sub> <sup>3+</sup>				1%											
C <sub>12</sub> <sup>3+</sup>		20%	16%	21%					2%	20%	21%	21%	50%	47%	51%
C <sub>12</sub> <sup>4+</sup>		19%	16%	3%						1%					
C <sub>13</sub> <sup>3+</sup>															
C <sub>13</sub> <sup>4+</sup>				12%											
N <sub>14</sub> <sup>3+</sup>										63%	18%	5%			0,2%
N <sub>14</sub> <sup>4+</sup>			0,9%	2%											
N <sub>15</sub> <sup>3+</sup>												2%			
N <sub>15</sub> <sup>5+</sup>		5%	1,2%												
O <sub>16</sub> <sup>3+</sup>				1%											
O <sub>16</sub> <sup>4+</sup>										6%		10%	9%	6,5%	1%
O <sub>16</sub> <sup>5+</sup>		7%	0,3%												
O <sub>18</sub> <sup>4+</sup>				2%						27%		1%	1%	0,2%	
O <sub>18</sub> <sup>5+</sup>			0,6%	2%								1%			
O <sub>18</sub> <sup>6+</sup>		0,5%													
Ne <sub>20</sub> <sup>4+</sup>				3%								1%	5%		
Ne <sub>20</sub> <sup>5+</sup>															
Ne <sub>22</sub> <sup>5+</sup>										16%	20%	14%	2%	11%	3%
Ar <sub>40</sub> <sup>8+</sup>										10%	0,4%				
Ar <sub>40</sub> <sup>7+</sup>											0,1%				

ионов He<sub>4</sub><sup>1+</sup>, He<sub>4</sub><sup>2+</sup>, (D)<sub>2</sub><sup>2+</sup>, (OH)<sub>2</sub><sup>1+</sup>, C<sub>12</sub><sup>3+</sup>, C<sub>12</sub><sup>4+</sup>, C<sub>13</sub><sup>3+</sup>, C<sub>13</sub><sup>4+</sup>, N<sub>14</sub><sup>3+</sup>, N<sub>14</sub><sup>4+</sup>, N<sub>15</sub><sup>3+</sup>, N<sub>15</sub><sup>5+</sup>, O<sub>16</sub><sup>3+</sup>, O<sub>16</sub><sup>4+</sup>, O<sub>16</sub><sup>5+</sup>, O<sub>18</sub><sup>4+</sup>, O<sub>18</sub><sup>5+</sup>, O<sub>18</sub><sup>6+</sup>, Ne<sub>20</sub><sup>4+</sup>, Ne<sub>20</sub><sup>5+</sup>, Ne<sub>22</sub><sup>5+</sup>, Ar<sub>40</sub><sup>8+</sup>, Ar<sub>40</sub><sup>7+</sup>  
 в тандеме с У-300

Объединенный институт  
 ядерных исследований  
 БИЯС-УС

В течение пятнадцати лет циклотрон У-200 используется для проведения широкого круга ядерно-физических и прикладных исследований. В зависимости от поставленных задач ускорялись ионы от дейтерия до аргона /табл.1/, годовое время облучения физических мишеней составляло 2000-4000 ч. Реализованный в 1971 году тандем двух циклотронов У-200 и У-300, в котором У-300 использовался как инжектор, позволил впервые в мире ускорить ионы Хе до энергии 1 ГэВ<sup>5/</sup>.

## 2. МАГНИТНАЯ СИСТЕМА ЦИКЛОТРОНА У-200

Ускоритель создан на базе серийного полутораметрового классического циклотрона У-150<sup>6/</sup>. За счет увеличения диаметра полюса с 1,5 м до 2 м и повышения уровня среднего магнитного поля до 20 кЭ обеспечен высокий /для данного диаметра полюса/ энергетический фактор ускорения:

$$E = 145 \frac{Z^2}{A} \text{ МэВ, где } E - \text{кинетическая энергия ионов, } Z, A - \text{заряд и масса иона.}$$

Магнитное поле циклотрона У-200 сформировано с высокой точностью в основном при помощи железных масс, что позволяет иметь относительно маломощную систему токовой коррекции<sup>7/</sup>. Изменение распределения среднего магнитного поля по радиусу

для ускорения ионов с разными  $\frac{A}{Z}$  достигается путем выбора определенной величины тока возбуждения основной обмотки У-200<sup>1/</sup>.

### Основные параметры магнитной системы

Потребляемая мощность	- 286 кВт
Число секторов	- 4 /по 45°/
Зазор в долине	- 150 мм
Зазор в холме	- 60 мм
Зазор для пучка	- 30 мм
Число ампер-витков основной обмотки	- 0,36 · 10 <sup>6</sup>
Номинальный ток основной обмотки	- 1300 А
Стабильность тока	- 3 · 10 <sup>-5</sup>
Среднее магнитное поле (H <sub>0</sub> )	- 19,3 ÷ 20,0 кЭ
Флаттер	- 0,06 /H <sub>0</sub> = 19,5 кЭ/
Система токовой коррекции:	
общая потребляемая мощность	- 20 кВт
число пар радиальных катушек	- 7
число пар гармонических катушек	- 2

## 3. ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ СИСТЕМА

Ускоряющая система циклотрона состоит из двух 45-градусных дуантов, двух резонаторных баков, связанных между собой фидерной линией. Питание резонаторов осуществляется от серийного генератора "Изумруд"<sup>1/</sup>. Перестройка частоты ускоряющего напряжения производится с помощью закорачивающих пластин, тонкая настройка - триммерами ручного управления и системой автоматической подстройки частоты /АПЧ/. Ускорение частиц осуществляется в основном на второй и третьей гармониках ВЧ-напряжения с набором энергии за оборот 2,83 ZU<sub>д</sub> и 3,6 ZU<sub>д</sub> соответственно.

### Основные параметры ВЧ-системы

Потребляемая мощность генератора	- 180-240 кВт
Полезная мощность генератора	- 80 кВт
Частотный диапазон	- 14,2-21,8 МГц
Стабильность частоты	- 10 <sup>-5</sup>
Добротность резонаторов	- 3500-4000
Напряжение на дуантах	- 75 кВ
Стабильность напряжения на дуантах	- 10 <sup>-2</sup>
Диапазон подстройки частоты резонаторов:	
а/ ручными триммерами	- 3%
б/ триммерами АПЧ	- 0,25%

## 4. ВАКУУМНАЯ СИСТЕМА

Откачка объема ускорителя /камеры и двух резонаторных баков/ производится в три этапа: механическими насосами - до 10<sup>-2</sup> Тор, бустерным насосом - до 10<sup>-4</sup> Тор и двумя высоковакуумными насосами ВА-8-7<sup>1/</sup> - до рабочего вакуума. Ионопровод откачивается шестью насосами ВА-0,5-1<sup>1/</sup>.

Все вакуумные насосы снабжены системой защиты - быстрого закрытия шиберов в случае ухудшения вакуума в объеме.

### Основные параметры вакуумной системы

Вакуумный объем	- 4 м <sup>3</sup>
Скорость высоковакуумной откачки	- 8200 л/с
Скорость откачки ионопровода	- 1200 л/с
Предельный вакуум в камере /без ионного источника и ВЧ-напряжения на дуантах/	- 1 · 10 <sup>-7</sup> Тор
Рабочий вакуум в камере	- /1 ÷ 2/ · 10 <sup>-6</sup> Тор
Вакуум в ионопроводе	- 5 · 10 <sup>-6</sup> Тор

## 5. ИОННЫЕ ИСТОЧНИКИ

Для получения легких ионов ( $\text{He}_3^{1+}$ ,  $\text{He}_4^{1+}$ ,  $(\text{D})_2^{1+}$ ) на циклотроне У-200 используется дуговой источник с прямым подогревом катода<sup>7/8/</sup>. Время непрерывной работы источника определяется сроком службы вольфрамовой нити и достигает 50-60 ч. Ионы более тяжелых элементов /С, О, Ne, Ar/ генерируются дуговым источником с косвенным подогревом катода. Средние значения рабочих параметров такого источника следующие:

Ток дугового разряда	- 15 А
Напряжение дугового разряда	- 500 В
Время непрерывной работы	- 20-25 ч.
Длительность импульсов	- 1-2 мс.
Сквозность импульсов	- 2-4

С целью получения ионов твердых элементов /Ве, В, Al и др./ разрабатывается конструкция источника с распылением рабочего вещества. Ионный источник вводится в центральную область ускорителя через аксиальное отверстие в верхней балке и полюсе электромагнита.

Исследования, связанные с получением многозарядных ионов из лазерной плазмы, проводимые в Лаборатории в течение ряда лет, завершили созданием макета лазерного источника. Впервые в мире из источника такого типа на циклотроне были получены ускоренные ионы  $\text{C}_{12}^{3+}$ ,  $\text{Si}_{28}^{7+}$ ,  $\text{Ca}_{40}^{10+}$  /9,10/. Несмотря на пока еще невысокие интенсивности пучков  $10^9 \div 10^8$  част/с, использование лазерных источников представляется перспективным. К числу источников, позволяющих получать пучки ионов очень высокой зарядности, относится источник с электронно-циклотронным резонатором (ECR)<sup>11,12/</sup>, использование которого в дальнейшем расширит возможности циклотрона.

## 6. ПАРАМЕТРЫ ПУЧКОВ УСКОРЕННЫХ ИОНОВ

На циклотроне У-200 ускоряется широкий диапазон ионов от гелия до аргона. В течение многолетней эксплуатации уточнены режимы настройки ускорителя, усовершенствован ряд узлов. Параметры пучков ионов, ускоряемых на циклотроне, приведены в табл.2, где  $m_i$  - масса иона,  $m_0$  - атомная единица массы,  $Z$  - заряд иона,  $H_0$  - напряженность магнитного поля в центре ускорителя,  $f_{\text{иона}}$  - частота обращения иона,  $N$  - номер гармоники ускоряющего напряжения,  $E$  - полная энергия иона,  $I_{\text{вн}}$  - интенсивность пучка на конечном радиусе ускорения,  $I_{\text{выв.}}$  - интенсивность выведенного пучка на удаленной мишени,  $Z_{\text{выв.}}$  - заряд выведенных ионов.

Биологическая защита ускорителя позволяет вести длительные облучения легкими ионами / $\text{He}_3^{1+}$ ,  $\text{DH}^{1+}$ ,  $(\text{D})_2^{1+}$ ,  $\text{He}_4^{1+}$ / с интенсивностями не более 25-30 мкА. Максимальные интенсивности пучка  $\alpha$ -частиц на конечном радиусе циклотрона составляют 600 мкА.

Таблица 2

Ион	$\frac{m_i}{m_0 Z}$	$H_0$ [КЭ]	$f_{\text{иона}}$ [МГц]	N	E [МэВ]	E/A [МэВ/нук]	Режимы газ	$I_{\text{вн}}$ [мкА]	$I_{\text{выв}}$ [мкА]	$Z_{\text{выв}}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$\text{He}_3^{1+}$	3,0160	19,550	9,969	2	48	16	$\text{He}$ (обогащ.)	10*	5*	2
$(\text{DH})^{1+}$	3,0219	19,502	9,910	2	48	16	(DH)	15*		
$\text{He}_4^{1+}$	4,0026	19,809	7,600	2	36	9	$\text{He}$	600*	330*	2
$(\text{D})_2^{1+}$	4,0282	17,700	7,510	2	36	9	D	30*	10*	1
$\text{C}_{12}^{2+}$	6,0000	19,950	5,106	3	48	4	$\text{CO}_2$	15		
$\text{C}_{12}^{3+}$	4,0000	19,744	7,580	2	108	9	$\text{CO}_2$	70	30	6
$\text{C}_{12}^{4+}$	3,0000	19,536	10,000	2	192	16	$\text{CO}_2$	13		
$\text{C}_{13}^{3+}$	4,3345	19,758	7,000	2	100	7,7	$\text{CO}_2$ (обогащ.)	10	7	6
$\text{C}_{13}^{4+}$	3,2508	19,678	9,292	2	182	14	$\text{N}_2\text{CH}_4$ (обогащ.)	1,2		
							$\text{CO}_2$ (ест.)	0,2		
$\text{N}_{14}^{2+}$	7,0015	19,961	4,378	4	42	3	Воздух	10	6	6
$\text{N}_{14}^{3+}$	4,6677	19,909	6,550	3	94	6,7	Воздух	40	38	7
$\text{N}_{14}^{4+}$	3,5008	19,730	8,655	2	168	12	Воздух	8		
$\text{N}_{14}^{5+}$	2,8006	19,425	10,650	2	252	18	Воздух	7		
$\text{N}_{15}^{3+}$	5,0000	19,815	6,086	3	87	5,8	$\text{N}_2$ (обогащ.)	1,5	1	6
$\text{N}_{15}^{5+}$	3,0000	19,563	10,014	2	240	16	$\text{N}_2$ (обогащ.)	7		
$\text{O}_{16}^{3+}$	5,3316	19,838	5,714	3	82	5,1	$\text{O}_2$	17		
$\text{O}_{16}^{4+}$	3,9987	19,737	7,580	2	145	9	$\text{O}_2$	28	13	8
$\text{O}_{16}^{5+}$	3,1990	19,534	9,375	2	224	14	$\text{CO}_2$	0,1		
$\text{O}_{16}^{6+}$	4,4998	19,864	6,779	3	130	7,2	$\text{O}_2$ (обогащ.)		7	8
$\text{O}_{16}^{5+}$	3,5998	19,691	8,400	2	198	11	$\text{O}_2$ (обогащ.)	4		
$\text{O}_{16}^{6+}$	2,9999	19,591	10,029	2	288	16	$\text{O}_2$ (обогащ.)	1,6		
$\text{Ne}_{20}^{4+}$	4,9981	19,808	6,086	2	116	5,8	Ne	13	0,5	8
$\text{Ne}_{20}^{5+}$	3,9985	19,750	7,585	2	180	9	Ne		1,6	10
$\text{Ne}_{22}^{5+}$	4,3983	19,733	6,890	2	165	7,5	Ne(обогащ.)		6	10
							Ne(ест.)	0,2		10
$\text{Ar}_{40}^{7+}$	5,7089	19,827	5,333	3	180	4,5	Ar(ест.)	0,1		
$\text{Ar}_{40}^{8+}$	4,9953	19,796	6,086	3	232	5,8	Ar(ест.)		0,07	16

При ускорении ионов редких изотопов, полученных из небога-  
щенного вещества, интенсивности пучков уменьшаются пропорциональ-  
но содержанию изотопа в естественной смеси /табл.3/.

Таблица 3

$D_2$	0,015 %	$O_{17}$	0,0038 %
$He_3$	0,000138 %	$O_{18}$	0,2 %
$He_4$	99,999862 %	$Ne_{20}$	90,51 %
$C_{12}$	98,89 %	$Ne_{21}$	0,27 %
$C_{13}$	1,1 %	$Ne_{22}$	9,29 %
$N_{14}$	99,64 %	$Ar_{36}$	0,337 %
$N_{15}$	0,36 %	$Ar_{38}$	0,063 %
$O_{16}$	99,762 %	$Ar_{40}$	99,6 %

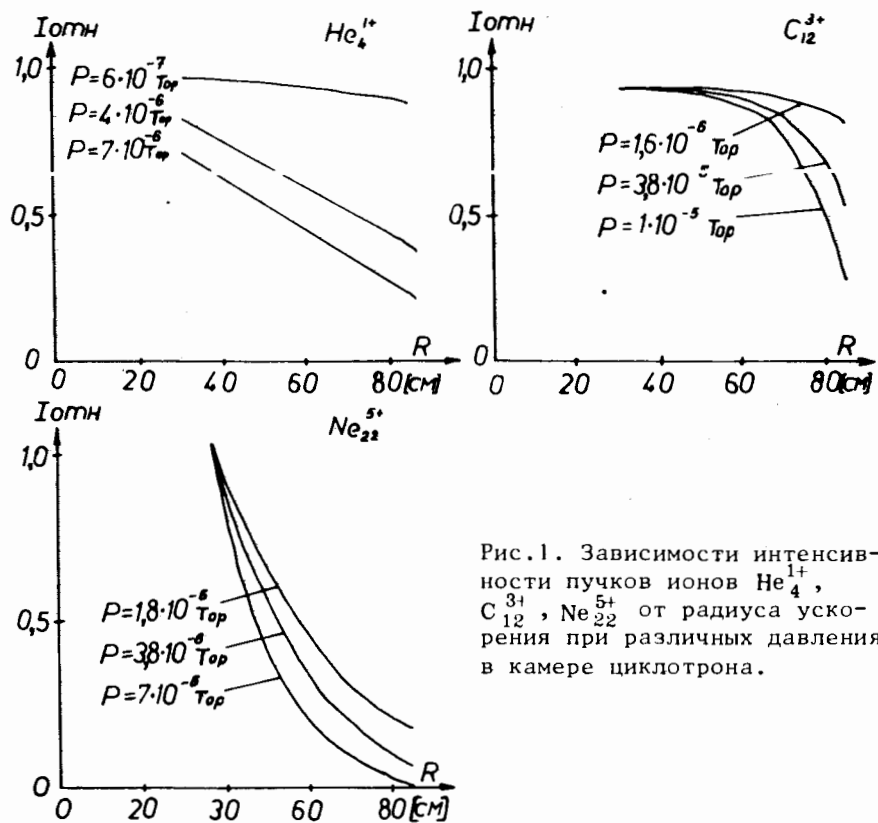


Рис.1. Зависимости интенсивности пучков ионов  $He_4^{1+}$ ,  $C_{12}^{3+}$ ,  $Ne_{22}^{5+}$  от радиуса ускорения при различных давлениях в камере циклотрона.

Поскольку магнитное поле У-200 близко к изохронному, то потери ионов в основном определяются перезарядкой частиц на остаточном газе камеры ускорителя /рис.1/. Основная нагрузка на вакуумную систему ускорителя создается потоком рабочего газа из ионного источника.

Зависимость интенсивности пучков от напряжения на дуантах свидетельствует об уменьшении потерь ионов с увеличением темпа ускорения /рис.2/.

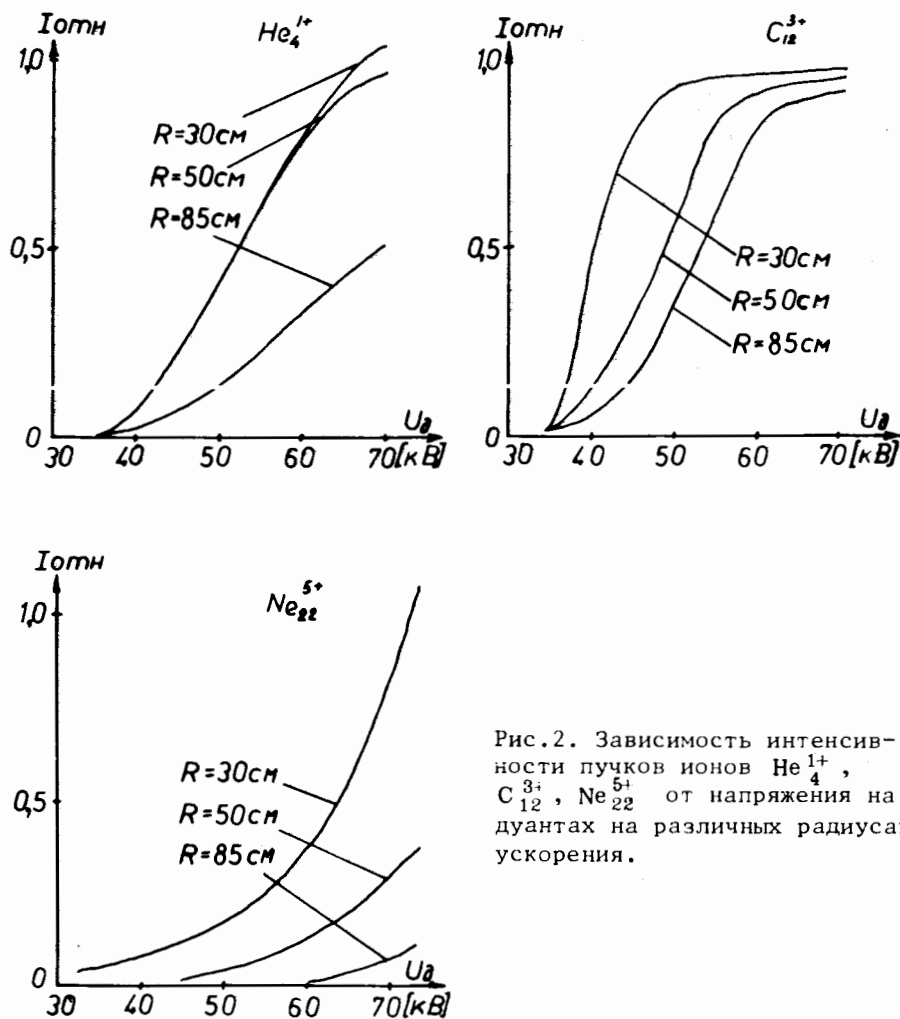


Рис.2. Зависимости интенсивности пучков ионов  $He_4^{1+}$ ,  $C_{12}^{3+}$ ,  $Ne_{22}^{5+}$  от напряжения на дуантах на различных радиусах ускорения.

Резонансные кривые /зависимость тока пучка от величины магнитного поля/ для ионов  $C_{12}^{3+}$ ,  $O_{16}^{4+}$ ,  $Ne_{22}^{5+}$  представлены на рис.3,4. Положение максимума кривых с ростом радиусов не меняется /изохронный режим ускорения/. Однако требуется весьма точная настройка ускорителя по частоте ускоряющего напряжения и уровню магнитного поля. Стабильность поля должна быть не хуже  $1,5 \div 2 \%$ , что обеспечивается существующей системой стабилизации. Высокие сепарирующие свойства циклотрона У-200 позволяют получить чистые пучки ионов, отношение массы к заряду у которых различается лишь за счет дефекта масс /рис.5/.

## 7. СИСТЕМА ВЫВОДА И ТРАССИРОВКИ ПУЧКА

Вывод пучка частиц с отношением  $\frac{A}{Z} \geq 3,8$  из циклотрона осуществляется методом перезарядки ионов на твердой мишени /графитовая фольга толщиной 40-60 мкг/см<sup>2</sup>. Коэффициент вывода составляет 100-40% в зависимости от энергии и типа ускоренных ионов, т.е. главным образом от эффективности перезарядки тяжелых ионов до требуемого для вывода заряда. На циклотроне У-200 используется однооборотный вывод частиц, увеличивающих в два раза заряд после прохождения обдирочной фольги /табл.4/.

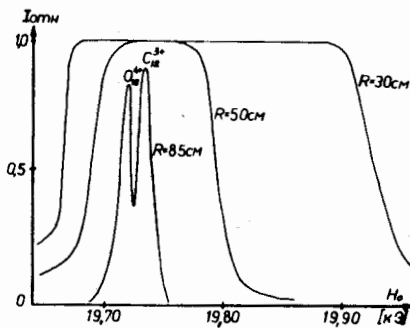


Рис.3. Резонансные кривые для ионов  $C_{12}^{3+}$  и  $O_{16}^{4+}$ . Рабочий газ ионного источника -  $CO_2$ .

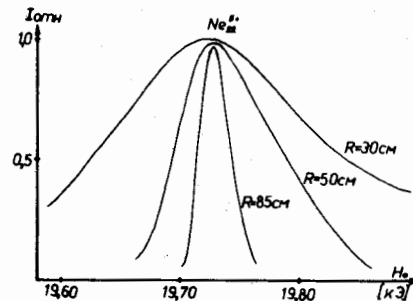


Рис.4. Резонансные кривые для ионов  $Ne_{22}^{5+}$ .

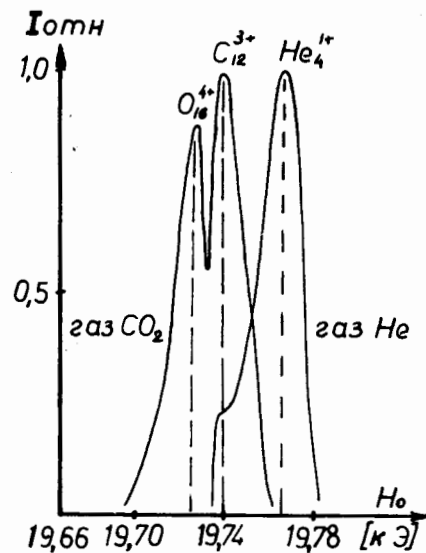


Рис.5. Резонансное разделение ионов  $He_4^{1+}$ ,  $C_{12}^{3+}$ ,  $O_{16}^{4+}$  на конечном радиусе ускорения.  $H_0$  - магнитное поле в центре циклотрона,  $I_{отн}$  - интенсивность пучков в относительных единицах. Рабочий газ ионного источника -  $CO_2$  и He.

Таблица 4

Ион	E (МэВ)	Заряд																			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$(DH)^{1+}$	48	100																			
$(D)^{1+}$	36	100																			
$He_4^{1+}$	48		100																		
$He_4^{1+}$	36		100																		
$C_{12}^{2+}$	48					37	63														
$C_{12}^{3+}$	108					5	95														
$C_{12}^{4+}$	192							100													
$C_{15}^{3+}$	100							7	93												
$C_{15}^{4+}$	182								100												
$N_{14}^{2+}$	112							3	67	30											
$N_{14}^{3+}$	94								27	73											
$N_{14}^{4+}$	168								6	94											
$N_{14}^{5+}$	252									100											
$N_{15}^{3+}$	87								30	70											
$N_{15}^{4+}$	150								10	90											
$N_{15}^{5+}$	240									1	99										
$O_{16}^{3+}$	82									60	40										
$O_{16}^{4+}$	145									28	72										
$O_{16}^{5+}$	224									10	90										
$O_{18}^{4+}$	130									32	68										
$O_{18}^{5+}$	198									14	86										
$O_{18}^{6+}$	288									4	96										
$Ne_{22}^{4+}$	116										7	67	26								
$Ne_{20}^{5+}$	180											55	45								
$Ne_{22}^{4+}$	106										8	69	23								
$Ne_{22}^{5+}$	165											59	41								
$Ar_{40}^{7+}$	180													8	35	41	15	1			
$Ar_{40}^{8+}$	232													3	24	46	24	3			

\*Распределение зарядов дано в процентах.

Выведенный пучок имеет горизонтальный эмиттанс  $30\pi$  мм·мрад, вертикальный -  $10\pi$  мм·мрад, разброс по энергии - 1,0%.

Простое кинематическое устройство для перемещения фольги по радиусу и азимуту циклотрона позволяет регулировать энергию выведенного пучка в пределах 35% от максимальной <sup>13/</sup> /см. табл.5, рис. 6 и 7/.

Таблица 5

Ион	E [МэВ]	E/A [МэВ/нукл]	Ион	E [МэВ]	E/A [МэВ/нукл]
He <sub>3</sub> <sup>1+</sup>	33-48	11-16	O <sub>16</sub> <sup>3+</sup>	56-82	3,5-5,1
He <sub>4</sub> <sup>1+</sup>	24-36	6-9	O <sub>16</sub> <sup>4+</sup>	96-145	6-9
C <sub>12</sub> <sup>2+</sup>	33-48	2,7-4,0	O <sub>18</sub> <sup>4+</sup>	88-130	4,9-7,2
C <sub>12</sub> <sup>3+</sup>	72-108	6-9	Ne <sub>20</sub> <sup>4+</sup>	78-117	3,9-5,8
C <sub>13</sub> <sup>3+</sup>	68-100	5,2-7,7	Ne <sub>20</sub> <sup>5+</sup>	120-180	6-9
N <sub>14</sub> <sup>2+</sup>	28-42	2-3	Ne <sub>22</sub> <sup>4+</sup>	72-106	3,3-4,8
N <sub>14</sub> <sup>3+</sup>	64-94	4,6-6,7	Ne <sub>22</sub> <sup>5+</sup>	112-165	5,1-7,5
N <sub>15</sub> <sup>3+</sup>	59-87	3,9-5,8	Ar <sub>40</sub> <sup>7+</sup>	120-180	3,1-4,5
			Ar <sub>40</sub> <sup>8+</sup>	156-232	3,9-5,8

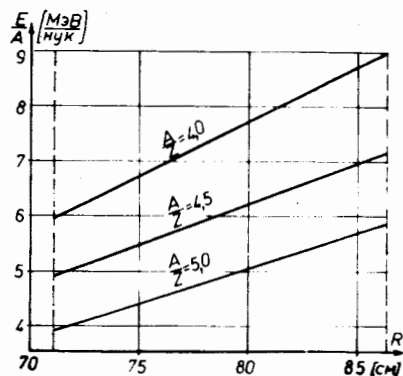


Рис.6. Зависимость энергии выведенных ионов от выводного радиуса для разных  $\frac{A}{Z}$ .

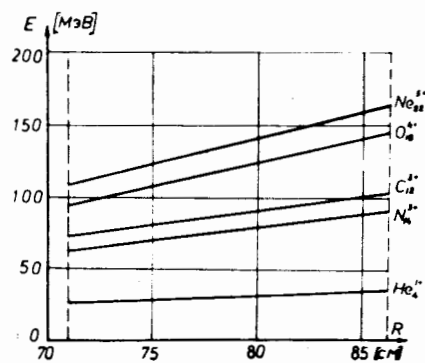


Рис.7. Зависимость энергии выведенных ионов, наиболее часто ускоряемых на У-200, от выводного радиуса.

Ионы с отношением  $\frac{A}{Z} < 3,8$  /C<sub>12</sub><sup>4+</sup>, N<sub>14</sub><sup>4+</sup>, N<sub>14</sub><sup>5+</sup>, O<sub>16</sub><sup>5+</sup> и др./, ускоренные до энергии 12-18 МэВ/нуклон, могут быть выведены из камеры ускорителя с помощью электростатического deflectора. Такая система была реализована в 1970 году <sup>14/</sup>. В условиях отсутствия фазовой селекции и стабилизации амплитуды ВЧ-напряжения на дуантах был получен коэффициент вывода около 15%.

Система транспортировки выведенных пучков циклотрона позволяет коммутировать пучок по 4 направлениям, включает в себя поворотный магнит, дуплеты квадрупольных линз и магниты для коррекции положения пучка на физической мишени <sup>15/</sup> /рис.8/.

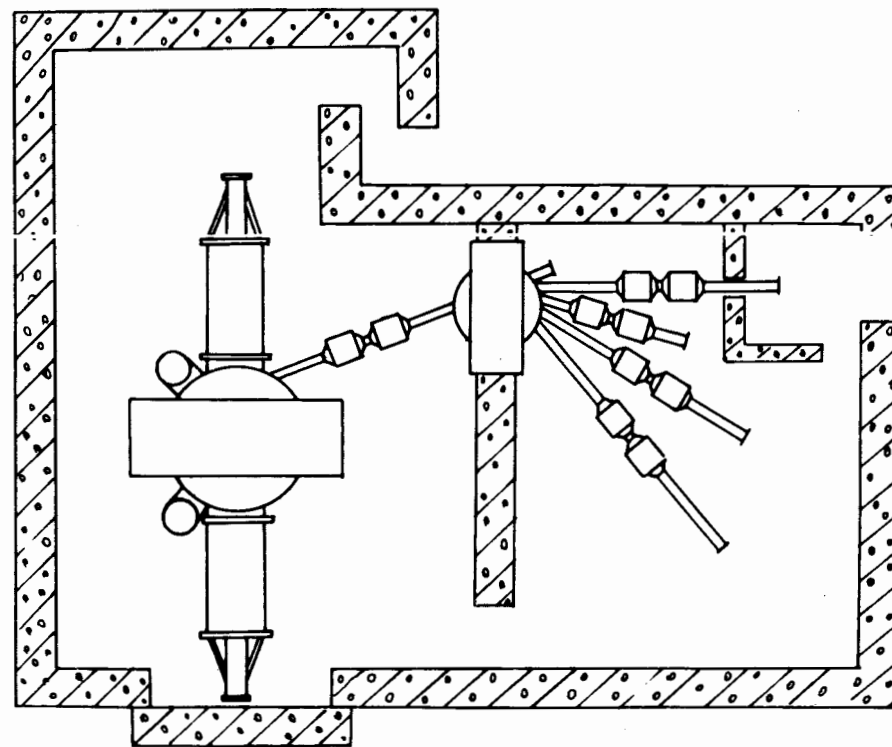


Рис.8. Схема расположения циклотрона и каналов транспортировки.

## 8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Отличительными особенностями двухметрового изохронного циклотрона У-200 являются: высокий уровень среднего магнитного поля /~ 20 кЭ/; возможность ускорения ионов в широком диапазоне

$\frac{A}{Z}$  при небольшой мощности корректирующих обмоток; простой и высокоэффективный вывод пучка методом перезарядки на тонкой мишени, позволяющий плавно варьировать энергию выведенных ионов.

Опыт создания и эксплуатации циклотрона У-200 послужил основой для разработки и выбора параметров целого ряда циклотронов тяжелых ионов: У-200П, создаваемого в Варшаве; У-250, проектируемого в НИИЭФА /Ленинград/, У-400, введенного в действие в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ в 1978 году.

В заключение авторы выражают благодарность академику Г.Н.Флерову, профессору Ю.Ц.Оганесяну за постоянное внимание к работам по совершенствованию циклотрона, а также всем сотрудникам Лаборатории, принимавшим участие в улучшении эксплуатационных параметров У-200.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Шелаев И.А. и др. ОИЯИ, 9-3988, Дубна, 1968.
2. Вейхерт Ч. и др. ОИЯИ, Р-9339, Дубна, 1976.
3. Оганесян Р.Ц., Бакевич Э., Енчевич И.Б. ОИЯИ, 9-12855, Дубна, 1979.
4. Shelaev I.A. et al. IEEE Transactions on Nucl. Science, v. NS-16, No. 3, 1969.
5. Флеров Г.Н. и др. В кн.: "Труды VII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц". ОИЯИ, Дубна, 1980, том 1, с. 59.
6. Батюня В.В. и др. ОИЯИ, 1858, Дубна, 1964.
7. Шелаев И.А. и др. ОИЯИ, Р9-5047, Дубна, 1970.
8. Таут Т., Шелаев И.А., Соловьева Г.М. ОИЯИ, 9-4368, Дубна, 1969.
9. Ананьин О.Б. и др. ОИЯИ, Р9-82-317, Дубна, 1982.
10. Гикал Б.Н. и др. Сборник аннотаций докладов VIII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Изд. ИФВЗ, Серпухов, 1982, с. 8.
11. Dougar-Jabon V.D., Golovanivsky K.S., Schepilov V.D. Phys.Scripta, 1978, 18, p. 506.
12. Dousson S., Geller R., Jacquot B. Second Intern.Conf. on Low Energy Ion Beams (LEIB-2) 14-17 April, Bath, 1980.
13. Гульбекян Г.Г., Евдокимов А.К., Козлов С.И. ОИЯИ, 9-1090, Дубна, 1977.
14. Шелаев И.А. и др. ОИЯИ, Р9-5037, Дубна, 1977.
15. Гульбекян Г.Г. и др. ОИЯИ, Р9-10117, Дубна, 1977.

Рукопись поступила в издательский отдел  
13 мая 1983 года.

Гикал Б.Н. и др. 9-83-311  
Опыт эксплуатации и совершенствование циклотрона У-200

В течение пятнадцати лет двухметровый изохронный циклотрон тяжелых ионов У-200 используется для проведения широкого круга ядерно-физических и прикладных исследований. Достигнутые параметры пучков, а также основные характеристики циклотрона приводятся в данной работе.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1983

Gikal B.N. et al. 9-83-311  
The Experience of Operating and Improving the U-200  
Cyclotron

During the last fifteen years the two-meter heavy-ion isochronous cyclotron U-200 has been used to carry out a wide range of nuclear-physical and applied investigations. The beam parameters achieved and the main characteristics of the cyclotron are presented.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1983

Перевод О.С.Виноградовой.