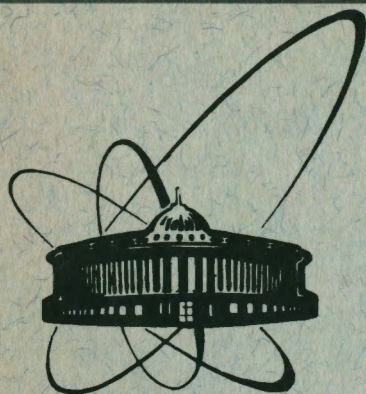


91-76



сообщения  
объединенного  
института  
ядерных  
исследований  
Дубна

9-91-76

О. Н. Борисов, С. Б. Ворожцов, В. П. Дмитриевский,  
Н. А. Морозов, В. А. Саенко, А. Ф. Чеснов

СИСТЕМА ВЫВОДА ПУЧКА ИЗ УСКОРИТЕЛЯ  
У-120К

1991

В Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ разрабатывается проект ускорителя У-120К для Республики Куба, предусматривающий ускорение протонов ( $11+40$  МэВ), дейтронов ( $6+17$  МэВ),  $\alpha$ -частиц ( $11+35$  МэВ), гелий-3 ( $15+45$  МэВ) с интенсивностью выведенного пучка до 100 мкА. Система вывода ускоренного пучка из камеры изохронного циклотрона У-120К должна обеспечить вывод сгустков частиц во всём диапазоне энергий в заданном направлении, в связи с этим осуществляются два основных процесса: возбуждение радиальных колебаний, в результате которых создается требуемый заброс частиц в дефлектор ( $\approx 4+5$  мм), и отклонение пучка через рассеянное магнитное поле (при соблюдении условий его вертикальной и горизонтальной фокусировки) в заданную точку начала тракта транспортировки пучка. Для этой цели в ускорительной камере расположено пять электромагнитных и электростатических элементов (возбудитель, компенсатор и 3 секции отклоняющего канала) с возможностью дистанционной независимой регулировки их положения и параметров (Рис.1). Шестой элемент, расположенный вне ускорительной камеры, осуществляет корректировку направления вывода и согласование эмиттанса пучка с акцептансом системы транспортировки.

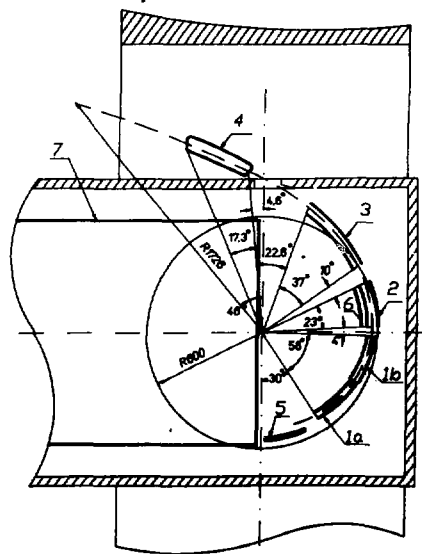


Рис. 1. Схема системы вывода пучка: 1-эл.-стат. секция (а-однородная часть; б-фокусирующая часть); 2 - эл.-магн. секция; 3 - токовая секция; 4 - корректирующая секция; 5 - эл.-магн. возбудитель; 6 - эл.-стат. компенсатор; 7 - дуант.

## Требования к системе вывода пучка

Более высокая интенсивность выведенного пучка в У-120К ( $\approx 100$  мкА) по сравнению с прототипным циклотроном У-120М (Ржеж, ЧСАН) требует более эффективную систему вывода для снижения радиационных и тепловых нагрузок на элементы выводной системы. Некоторое повышение эффективности вывода может быть достигнуто за счет модернизации и оптимизации параметров действующей системы. Однако получение коэффициента вывода на уровне  $\approx 80$  % возможно лишь на пути радикального изменения и оптимизации систем заброса и отклонения пучка, для чего необходим анализ причин потерь частиц в процессе вывода из У-120М.

Необходимо обеспечить требуемую эффективность вывода пучка для всего диапазона энергий с величинами радиального и аксиального эмиттансов на входе в систему транспортировки :

$E_r \leq 60 \text{ П мм} \cdot \text{мрад}$  ;  $E_z \leq 40 \text{ П мм} \cdot \text{мрад}^{1/}$ . Энергетический разброс выведенного пучка должен составлять  $\approx (6 \div 8) \times 10^{-3}$ . Дополнительным требованием является необходимость вывода пучка в точку с заданными координатами.

### Анализ причин потерь частиц при выводе из У-120 М

- Реальный радиальный эмиттанс пучка в зоне конечных радиусов оказался в несколько раз выше расчетного ( $40 \text{ П мм} \cdot \text{мрад}$  вместо  $8 \text{ П мм} \cdot \text{мрад}$ ), для которого проектировалась выводная система<sup>2/</sup>.
- Применяемый резонансный метод раскочки радиальных колебаний, использующий одновременное действие 1-й и 2-й гармоник возмущения поля<sup>3,4/</sup>, приводит к увеличению амплитуды аксиальных колебаний.
- Уменьшение реальных значений потенциалов на пластинах дефлектора по сравнению с расчетными (около  $90 \text{ кВ}$ ) привело к необходимости снижения радиальной апертуры 1-й секции дефлектора до  $4 \text{ мм}$ .

- Нестабильность во времени геометрических параметров электростатических элементов выводной системы (разогрев в процессе работы), а также недостаточная точность изготовления и установки этих элементов в ускорительной камере.

#### Раскачка радиальных колебаний

При помощи численного моделирования выполнялся поиск метода раскачки радиальных колебаний с требуемыми углом влета, радиусом и энергией на входе в дефлектор первоначально для режима с максимальной энергией протонов ( $W_p \approx 40$  МэВ), как наиболее сложного с точки зрения вывода. Обращалось особое внимание на устойчивость по  $z$ -движению при минимальных разбросах  $\Delta r$ ,  $\Delta W$ .

Анализируя известные методы раскачки радиальных колебаний для условий У-120К, можно прийти к следующим заключениям:

- заброс частиц за счет набора энергии за оборот равен  $\approx 0,6$  мм и не может быть использован для вывода при эффективной толщине септума дефлектора около 0,6 мм;
- однооборотный механизм заброса при радиальном размере пучка  $2 \cdot A_r = 8$  мм и радиальной апертуре входа в дефлектор 4+5 мм теоретически ограничен по эффективности величиной 50+60%. К этим методам можно отнести прецессионный, резонансный при  $Q_r = 1$ , раскачка при помощи нелинейного резонанса  $4 \times Q_r = 4$ ;
- многооборотный заброс на основе электродинамического метода, возбуждая резонансное увеличение радиальной амплитуды при помощи ВЧ-резонатора с частотой ( $Q_r \times$  частоту обращения), требует при угловом размере резонатора порядка  $20^\circ$  слишком большого значения амплитуды ВЧ напряжения ( $\approx 50$  кВ);
- классический регенеративный на основе двух локальных неоднородностей поля ускорителя (возбудителя и регенератора) обеспечивает нужную для требуемой эффективности величину заброса и необходимую аксиальную

устойчивость пучка. Однако не удаётся получить угол влёта в дефлектор, требуемый для дальнейшего отклонения пучка.

В связи с вышесказанным основной упор в исследовании был сделан на анализе возможностей преодоления трудностей, возникающих при раскачке пучка в прототипном ускорителе. В У-120М механизм возбуждения когерентных<sup>/3, 4/</sup> радиальных колебаний основан на использовании 1-й гармоники, возрастающей по амплитуде вдоль радиуса в области раскачки. Вначале первая гармоника создаёт когерентные колебания с требуемой фазой по отношению ко входу в дефлектор, а затем быстрый рост амплитуды второй гармоники возбуждает параметрический резонанс  $2 \times Q_r = 2$ . Таким образом используется совместное действие внешнего  $Q_r = 1$  и параметрического  $2 \times Q_r = 2$ .

Расположение возбудителя и компенсатора, создающих требуемые гармоники, показано на Рис.1. Радиальная ширина зоны раскачки  $\approx 2,5$  см. Уменьшение аксиальной раскачки пучка достигается динамическим путём за счёт увеличения эффективной силы магнитного возбудителя. При этом раскачка частиц происходит за меньшее число оборотов, что позволяет не допустить заметного роста аксиального размера пучка. Градиенты возбуждающего магнитного поля достигают величины  $20 \div 25$  мТл/см при токе в обмотках  $I_{\text{возб}} = 510$  А. На основании проведенного исследования предложена модификация системы раскачки, параметры которой приведены в Таблице 1. Здесь же приведены эмиттансы пучка на входе в дефлектор для протонов и дейтронов различных энергий. Режимы для  $\alpha$ -частиц и гелия-3 занимают промежуточное положение.

При численных расчётах пучок представлялся  $50 \div 100$  частицами с различными начальными амплитудами по  $r$  и  $z$  ( $A_r = 1; 2; 3; 4$  мм;  $A_z = 0,5; 1,0; 1,5$  мм). Эффективность заброса пучка на вход в дефлектор составила  $\approx 85 \div 90\%$ , что для эффективной толщины септума  $0,6$  мм и величины заброса пучка  $\approx 5$  мм является теоретическим пределом. Увеличение коэффициента заброса возможно при уменьшении эффективной толщины септума.

Таблица 1. Параметры системы раскачки и эмиттансы пучков на входе в дефлектор.

Параметры	протоны			дейтроны		
Энергия (МэВ)	11,6	30,6	39,7	11,6	15,3	18,5
Ток возбуд. (А)	15	225	510	36	90	180
Потенц. компенс. (кВ)	7	52,5	70	8,4	21	42
Эффект. рад. эмиттанс (П мм·мрад)	13,9	9,5	11,5	17,7	15,5	16,4
Эффект. акс. эмиттанс (П мм·мрад)	3,2	2,3	1,2	3,1	2,4	2,0
Кoeff. заброса (%)	91	94	88	83	91	87

В рамках проводимых исследований совместно с сотрудниками ИЯФ ЧСАН на У-120М был проведён эксперимент по забросу протонов с энергией 30 МэВ на вход в дефлектор. На Рис.2 приведены экспериментальные и расчётные данные, показывающие распределение частиц по  $r$  и  $z$  на входе в канал. Результаты эксперимента подтвердили правильность численных расчётов.



Рис. 2. Экспериментальные (линии) и расчётные (гистограммы) данные по радиальному и аксиальному распределению пучка протонов с энергией 30 МэВ на входе в дефлектор циклотрона У-120М.

## Отклонение пучка через рассеянное магнитное поле

Комбинированный дефлектор циклотрона У-120К включает электростатическую, электромагнитную и токовые секции (Рис. 1), выполняющие различные функции<sup>/5/</sup>. Однородная часть первой секции имеет плоские электроды, что позволяет сделать достаточно тонкий эффективный септум ( $\approx 0,6$  мм) и обеспечить высокую эффективность заброса пучка в дефлектор. Остальная часть первой секции, а также вторая и третья секции имеют радиальный градиент электростатического поля, фокусирующий пучок вдоль всей системы отклонения и компенсирующий искажение радиального эмиттанса при проводке пучка. Протяжённость отдельных секций выбрана исходя из конструктивных требований с учётом свободных промежутков для ввода ионного источника и пробника. Элементы системы можно оперативно подстраивать под форму траектории (при изменении энергии) за счёт независимо передвигающихся секций дефлектора. Параметры элементов системы отклонения приведены в Таблице 2.

Таблица 2. Параметры системы отклонения

Параметры	Азимут. полож. (град.)	Радиал. аперт. $\Delta r$ , (см)	Аксиал. аперт. $\Delta z$ , (см)	Потенц. $V$ , (кВ)	Изменен. магн. поля $\Delta B$ , (Тл)	Град. магн. поля $dB/dr$ (Тл/см)
Секция 1а (эл.-стат)	30÷60	0,5÷0,6	1,0	30÷75	-	-
Секция 1б (эл.-стат)	60÷88	0,8÷0,9	1,0	30÷75	-	-
Секция 2 (эл.-магн)	92÷115	1,0	1,0	-	-(0,1±0,5)	0,01±0,05
Секция 3 (токовая)	125±162	1,2	1,0	-	-0,1	0,1
Секция 4 (токовая)	185±202	2,0	2,0	-	0,1±0,5	0,01±0,04

На Рис.3 показано согласование эмиттанса выводимого пучка с аксептансом дефлектора на входе в канал для протонов с максимальной энергией. Огибающие частиц при проводке пучка через рассеянное поле магнита до входа в систему разводки изображены на Рис.4. В расчётах проводка пучка через систему отклонения осуществлена с эффективностью  $\approx 80+90\%$ . Фазовый портрет пучка на входе в систему транспортировки показан на Рис.5. Эффективные радиальный и аксиальный эмиттансы при этом не превышают величин:  $E_r \leq 55\Pi$  мм·мрад;  $E_z \leq 30\Pi$  мм·мрад.

Энергетический разброс в пучке определяется процессом многооборотного заброса в дефлектор ( $\approx 4+5$  оборотов) и при максимальном наборе энергии за оборот  $0,1$  МэВ составляет  $\approx 8 \cdot 10^{-3}$  для заданного диапазона энергии.

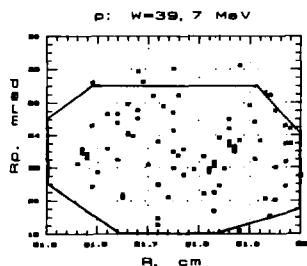


Рис.3. Согласование эмиттанса выводимого пучка с аксептансом дефлектора для протонов с максимальной энергией.

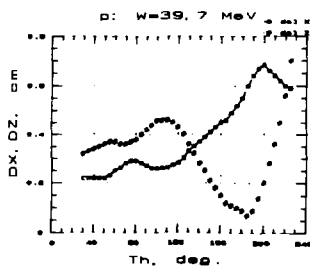


Рис.4. Огибающие пучка при прохождении системы вывода до входа в систему транспортировки.

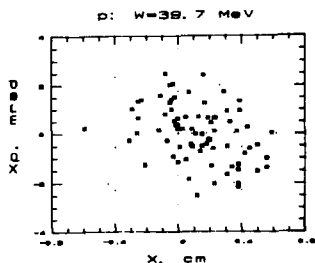
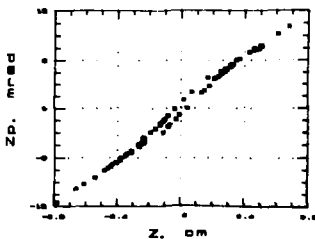


Рис.5. Фазовый портрет пучка на входе в систему разводки для протонов с максимальной энергией.





#### Закключение

- При соблюдении расчетных требований эффективность вывода пучка достигнет 75 %.
- Интенсивность выведенного пучка протонов в У-120К составит  $\approx 100$  мкА при интенсивности внутреннего пучка  $\approx 130$  мкА.
- Для повышения эффективности вывода пучка необходимо особое внимание обратить на снижение радиального эмиттанса установки, особенно на этапе инжекции. При уменьшении радиальных амплитуд до уровня  $A_{r\max} \leq 2$  мм ожидается возрастание эффективности вывода до  $\approx 85\%$ .
- Допуски на установку элементов системы вывода пучка составляют от 0,1 до 0,5 мм для различных секций.

В заключение авторы благодарят З.Трейбала (ИЯФ ЧСАН) за ценные советы и предложения и О.В.Ломакину за помощь в обработке результатов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Боркова А., Паливец С., В кн.: Труды II Международного совещания по циклотронам и их применению, Бехине, ЧССР, ОИЯИ, Д9-89-708, Дубна, 1989, стр.264.
2. Дмитриевский В.П., Кольга В.В., Полумордвинова Н.И., Трейбал З. В кн.: Материалы III совещания по изохронному циклотрону У-120 М и его использованию для решения физических проблем. Ческе Будейовице, ЧССР, ОИЯИ, Р9-7339, Дубна, 1973, стр.93.
3. Van Nieuwland J.M. In: Proc. of 5 Int. Conf. on Cycl. Appl., Oxford, 1969, p.215.
4. Трейбал З., ОИЯИ, 9-10388, Дубна, 1977, Автореферат диссертации.
5. Дмитриевский В.П., Кольга В.В., Полумордвинова Н.И., Трейбал З. В кн.: Материалы III совещания по изохронному циклотрону У-120М и его использованию для решения физич. проблем. Ческе Будейовице, ЧССР, ОИЯИ, Р9-7339, Дубна, 1973, стр.102.

Рукопись поступила в издательский отдел

7 февраля 1991 года.