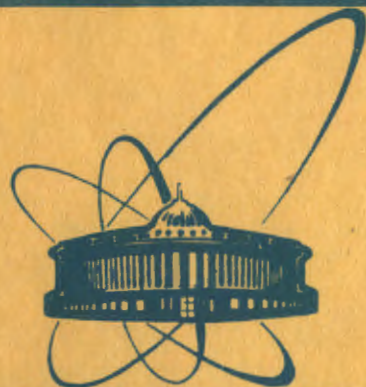


12/ХII-83



сообщения  
объединенного  
института  
ядерных  
исследований  
Дубна

6494/83

P9-83-604

П.Ф.Белошицкий, Н.Ю.Казаринов, Э.А.Перельштейн

РЕЖИМ УСКОРЕНИЯ  
В ТЯЖЕЛОИОННОМ СИНХРОТРОНЕ  
УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА  
ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ

1983

Тяжелоионный синхротрон /ТИС/ предназначен для ускорения ионов всех элементов таблицы Менделеева до энергий  $50 \div 800$  МэВ/нукл. <sup>/1/</sup>. В ТИСе предусмотрен медленный вывод ионного пучка для проведения физических экспериментов, а также быстрый вывод для перевода пучка в синхрофазотрон ОИЯИ.

В данной работе рассмотрены режимы, соответствующие ускорению легких ядер и урана в случаях медленного и быстрого вывода. Рассмотрено продольное движение ионов и определены режимы работы радиотехнической и магнитной систем в ТИСе, обеспечивающие минимальные потери частиц при ускорении с учетом реальных технических возможностей этих систем.

Установлены требования на стабильность магнитного поля и радиочастоты, допуски на гармонические и шумовые возмущения магнитного поля, амплитуды и частоты ускоряющего напряжения.

## 1. ИЗМЕНЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ И РАДИОЧАСТОТЫ В ЦИКЛЕ УСКОРЕНИЯ

В ТИСе принята инжекция пяти сгустков на плато магнитного поля длительностью  $\Delta t_{\text{и}} = 80$  мс <sup>/2/</sup>. Индукция магнитного поля при инжекции

$$B_0 = \frac{A}{300\rho Z} \sqrt{W(2E_0 + W)}, \quad /1/$$

где  $Z$  и  $A$  - зарядность и атомный номер иона,  $\rho = 7,4966$  м - радиус поворота в диполях,  $E_0 = 938$  МэВ - энергия покоя нуклона,  $W = 20$  МэВ/нуклон - энергия ионов, инжектируемых из коллективного ускорителя тяжелых ионов КУТИ-20 в ТИС.

Плавный переход магнитного поля от постоянного значения к линейно нарастающему осуществляется по закону <sup>/2/</sup>

$$B(t) = B_0 + \dot{B}_m \frac{2(t_1 - t_0)}{\pi} \left[ 1 - \cos \frac{\pi(t - t_0)}{2(t_1 - t_0)} \right], \quad t_0 \leq t \leq t_1, \quad /2/$$

где  $t_0$  - момент окончания захвата пучка в режим ускорения, значение  $\dot{B}_m = 15$  Т/с определяется возможностями системы питания и согласуется с заданной максимально допустимой скоростью изменения частоты ускоряющего ВЧ поля  $(df_0/dt)_{\text{max}} \leq 90$  МГц/с.

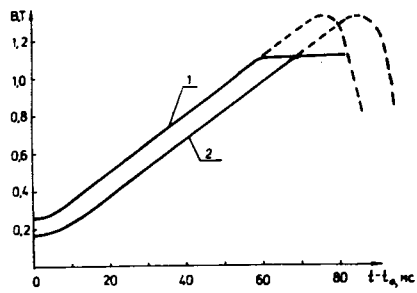


Рис. 1

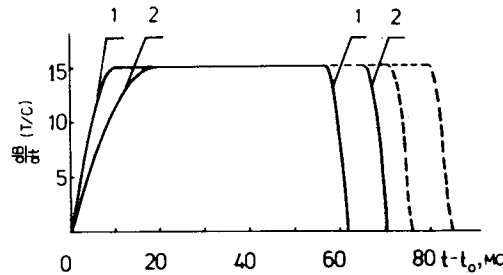


Рис. 2

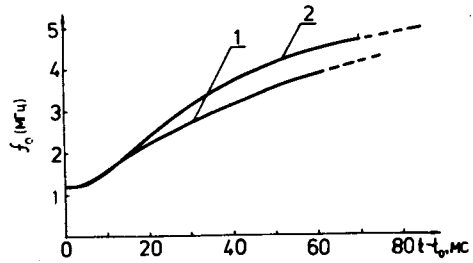


Рис. 3

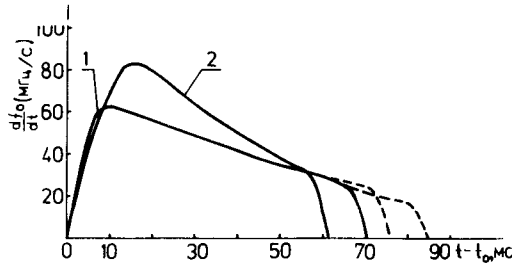


Рис. 4

В номинальном режиме время ускорения  $t_3 - t_0 \approx 60 \div 85$  мс. Зависимости индукции магнитного поля и ее производной от времени в различных режимах ускорения приведены на рис.1,2 /на рисунках 1-4, 6-8 1 - ионы урана, 2 - ядра с  $Z/A = 1/2$ , штриховой линией показан режим быстрого вывода/, а также в табл.1,2.

Чтобы обеспечить синхронизм изменения ускоряющего поля с обращением частицы по замкнутой орбите, частота ВЧ поля должна изменяться по закону

$$f_0 = \frac{qc}{\Pi} \frac{B}{\sqrt{\tilde{B}^2 + B^2}}, \quad \tilde{B} = \frac{E_0 A}{300\rho Z} (T), \quad /5/$$

На участке ускорения индукция магнитного поля

$$B(t) = B(t_1) + \dot{B}_m(t-t_1), \quad /3/$$

$$t_1 \leq t \leq t_2,$$

момент времени  $t_2$  выбирается в соответствии с требуемой энергией ионов. Переход к постоянному магнитному полю происходит по закону

$$B(t) = B(t_2) + \quad /4/$$

$$+ \frac{2(t_3 - t_2)}{\pi} \dot{B}_m \sin \frac{\pi(t - t_2)}{2(t_3 - t_2)},$$

$$t_2 \leq t \leq t_3.$$

где кратность ускорения  $q$  выбрана равной 3 /при этом частота находится в обычном для ускоряющих станций диапазоне  $1 \div 5$  МГц с коэффициентом перекрытия по частоте 5/, периметр орбиты  $\Pi = 154,56$  м. Зависимости частоты и ее производной от времени приведены на рис.3,4 и в табл.1,2.

## 2. ЗАХВАТ ПУЧКА В РЕЖИМ УСКОРЕНИЯ

В ТИСе предлагается осуществить квазиadiaбатический захват ионов в режим ускорения  $^{3,4/}$ , расчетная эффективность которого близка к 100%. При таком способе захвата амплитуда ускоряющего напряжения  $V$  увеличивается до максимального значения  $V_0 = V(t_0)$  за время, сравнимое с периодом синхротронных колебаний

$$T_c = 1/F_c, \quad F_c = \Omega_c/2\pi = \frac{1}{2\pi} (qZeV_0 |1 - \alpha\gamma_0^2| / 2\pi AM\gamma_0^3 R_0^2)^{1/2},$$

где  $\alpha = 0,046$  - коэффициент расширения орбит,  $\gamma_0 = \gamma(t_0)$  - релятивистский фактор,  $M$  - масса нуклона,  $R_0 = \Pi/2\pi$ . Нарастание ускоряющего напряжения обеспечивается последовательным включением через равные промежутки времени 6 ускоряющих станций. Напряжение на каждой станции равно  $V_0/6$ . При таком способе включения существенно уменьшается диапазон изменения амплитуды ускоряющего напряжения на ВЧ станции.

Для осуществления ~100%-ного захвата необходимо, чтобы импульс синхронной частицы оставался постоянным,  $p_s = p_0$ , поэтому при  $t \leq t_0$  величина магнитной индукции  $B = B_0 = \text{const}$  и радиочастота  $f_0 = \text{const}$ . Уравнение фазовых колебаний на участке захвата можно представить в виде

$$\phi' = -y, \quad y' = f(r) \cos\phi, \quad y = (2\pi q \frac{AMc^2 |1 - \alpha\gamma_0^2|^{1/2}}{Ze V_0 \gamma_0^3})^{1/2} \Delta p. \quad /6/$$

Здесь  $\phi$  - фаза частицы по отношению к ВЧ полю,  $\Delta p$  - отклонение импульса от синхронного значения,  $r = \Omega_0 t$ ,  $f(r) = V(r)/V_0$ .

Перед включением первой из станций ионный сгусток на фазовой плоскости занимает прямоугольник площадью  $4\pi\gamma_0$ . Для обеспечения максимальной эффективности захвата к моменту его окончания  $r = r_0$  площадь  $S_0$ , охватываемая сепаратрисой, должна быть по крайней мере не меньше начальной площади пучка,  $\kappa = 4\pi\gamma_0/S_0 \leq 1$ . Так как

$$S_0 = 4\sqrt{2} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \sqrt{1 + \sin\phi} d\phi = 16,$$

то  $y_0 \leq 4/\pi$ . Отсюда получается требование на амплитуду ускоряющего напряжения в конце захвата /4/:

$$\frac{Z}{A} \frac{eV_0}{Mc^2} \geq \left(\frac{\pi}{2}\right)^3 \frac{q(\gamma_0^2 - 1) |1 - \alpha\gamma_0^2|}{\kappa^2 \gamma_0^3} \left(\frac{\Delta p}{p}\right)_0^2, \quad /7/$$

где  $(\Delta p/p)_0$  - импульсный разброс инжектируемого пучка /для ТИСа  $(\Delta p/p)_0 = 3 \cdot 10^{-3}$ /.

Процесс захвата пучка в режим ускорения был исследован методом "крупных" частиц. Зависимость коэффициента захвата  $K_3$  от его длительности  $\Delta t_3$ , построенная по результатам численного расчета, показана на рис.5 для различных значений  $\kappa$  /сплошная линия -  $\kappa = 0,8$ , штриховая -  $\kappa = 0,9$ , штрихпунктирная -  $\kappa = 1$ /.

Как следует из результатов расчета, при  $\kappa = 0,95$  и соответствующем выборе длительности захвата /т.е. скорости нарастания ускоряющего напряжения/  $K_3 \geq 99\%$  /например, при  $\kappa = 0,95$  и  $\Delta t_3 = 1/F_c$  величина  $K_3 = 99,3\%$ . Суммарное напряжение на 6 станциях к концу захвата  $V_0 = 12,27$  кВ для  $Z/A = 80/238$  и  $V_0 = 8,18$  кВ для  $Z/A = 1/2$  при  $(\Delta p/p)_0 = 3 \cdot 10^{-3}$ ,  $\kappa = 0,95$ .

В ТИСе предусмотрена возможность одновременного ускорения ионов с зарядностями  $Z$ ,  $Z \pm 1$ . Отличие в величине импульса синхронной частицы /5/ для зарядности  $Z + \Delta Z$

$$\frac{\Delta p_s}{p_s} = \frac{\alpha\gamma^2}{\alpha\gamma^2 - 1} \frac{\Delta Z}{Z} \quad /8/$$

приводит для  $\Delta Z = \pm 1$  в ТИСе к  $\Delta p_s/p_s = \mp 6,3 \cdot 10^{-4}$  и уменьшению коэффициента захвата. Как показывают результаты численного моделирования, для урана с  $Z = 79,81$  коэффициент захвата  $K_3 = 90\%$ .

Оценим влияние пространственного заряда пучка на эффективность захвата в режим ускорения. Уравнения фазовых колебаний с учетом заряда пучка имеют вид /8/

$$\frac{d}{dt} (p - p_s) = \frac{ZeV}{2\pi R_0} \cos \phi + \frac{Zeq}{\gamma_0^2 R_0 C} \lambda'(\phi), \quad /9/$$

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{q}{MR_0} \frac{\alpha\gamma_0^2 - 1}{\gamma_0^3} (p - p_s).$$

Здесь  $p - p_s$  - отклонение импульса от синхронного значения,  $C$  - погонная емкость системы пучок-камера /при захвате пучок почти полностью занимает камеру и  $C \sim 1$ /,  $\lambda(\phi)$  - линейная плотность заряда, удовлетворяющая условию нормировки

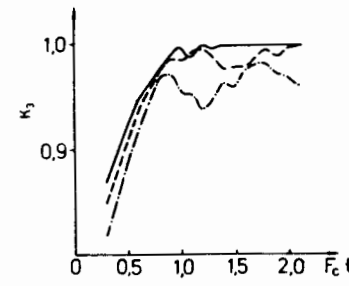


Рис.5

$$\int_{-\pi/2}^{\pi/2} \lambda(\phi) d\phi = \frac{ZeN_i}{R_0}, \quad N_i - \text{число ионов на орбите. Используя для удобства зависимость } \lambda(\phi) \text{ в виде } /7/ \quad \lambda(\phi) = \frac{ZeN_i}{2\pi R_0} (1 - \sin \phi), \quad \text{имеем}$$

$$\frac{d}{dt} (p - p_s) = \frac{Ze}{2\pi R_0} \left( V - \frac{qZeN_i}{\gamma_0^2 R_0 C} \right) \cos \phi. \quad /10/$$

Согласно /10/ влияние пространственного заряда пучка эквивалентно уменьшению напряжения на величину  $\Delta V = qZeN_i / \gamma_0^2 R_0 C$ . Для параметров ТИСа ОИЯИ  $\Delta V \leq 1\%$  и может быть легко компенсировано увеличением амплитуды ускоряющего напряжения.

### 3. УСКОРЕНИЕ ИОНОВ В СИНХРОТРОНЕ

Участок ускорения в соответствии с /2 - 4/ делится на три: переходный /когда производная магнитной индукции плавно нарастает от нуля до  $\dot{B}_m = 15$  Т/с/, участок ускорения с постоянным значением  $\dot{B} = \dot{B}_m$  и участок выхода на плато магнитного поля. Процесс ускорения также исследован методом "крупных" частиц. Уравнения фазовых колебаний

$$y' = f(r) \cos \phi - \chi p_s', \quad /11/$$

$$\phi' = \frac{\alpha [(p_s/mc)^2 + 1] - 1}{[\alpha [(p_0/mc)^2 + 1] - 1]} \left[ \frac{(p_0/mc)^2 + 1}{(p_s/mc)^2 + 1} \right]^{3/2} y.$$

/где  $\chi = \sqrt{2\pi q} \frac{Mc^2 |1 - \alpha\gamma_0^2|}{eV_0 \gamma_0^3}$  / были проинтегрированы на ЭВМ /900

"крупных" частиц с начальными условиями, соответствующими окончанию захвата при  $r = r_0$  / . Режим включения ВЧ станций /  $\Delta t_3 = 1/F_c$ ,  $\kappa = 0,95$  для  $Z/A = 80/238$  и  $\Delta t_3 = 1,2/F_c$ ,  $\kappa = 0,82$  для  $Z/A = 1/2$ / обеспечивает расчетное значение  $K_3 = 99,3\%$  и  $99,8\%$  соответственно. Функция  $f(r)$  определялась из решения уравнения

$$F(\cos \phi_s) f(r) \sqrt{\frac{1 - \alpha [(p_0/mc)^2 + 1]}{1 - \alpha [(p_s/mc)^2 + 1]} \left[ \frac{(p_s/mc)^2 + 1}{(p_0/mc)^2 + 1} \right]^{3/2}} = 1,$$



$$F(\cos \phi_s) = \frac{\phi \sqrt{\sin \phi + \sin \phi_s - (\phi + \phi_s) \cos \phi_s} d\phi}{\phi \sqrt{1 + \sin \phi} d\phi}, \quad /12/$$

выражающего условие неизменности площади, охватываемой сепаратрисой в процессе ускорения. Зависимость суммарного напряжения на станциях, построенная по результатам решения уравнения /12/, показана на рис. 6 и приведена в таблицах 1, 2. Как видно из рисунка, напряжение  $V$  нигде не превышает величины  $V_{\text{доп.}} = 54 \text{ кВ}$  - принятого максимально допустимого суммарного напряжения на 6 станциях. Этим же условием  $V < V_{\text{доп.}}$  определяется выбор значения  $k$  при захвате пучка в режим ускорения.

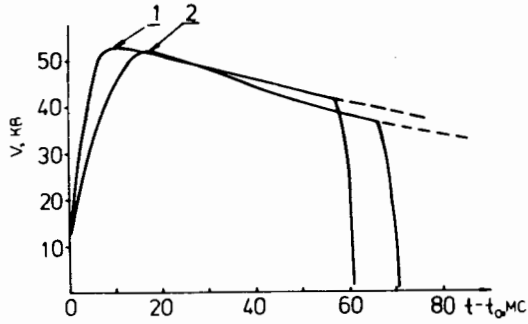


Рис. 6

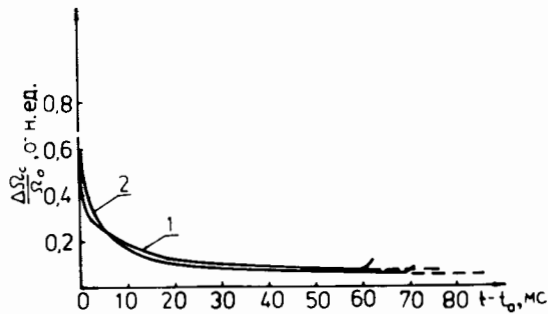


Рис. 7

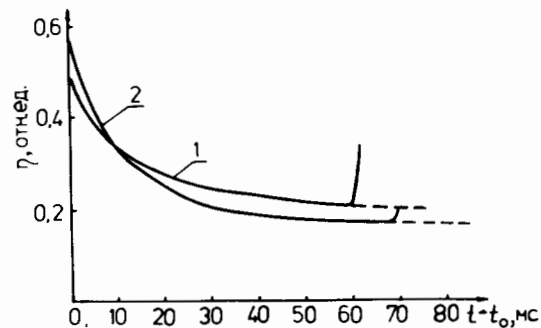


Рис. 8

Результаты численного моделирования показывают, что потери частиц происходят в начале переходного участка и составляют для урана 2,3%, для легких элементов 0,8%, так что после захвата и переходного участка в режим ускорения попадает 97% и 99% всех частиц соответственно. Длительность переходного участка определяется возможностями системы питания и составляет  $10 \div 20 \text{ мс}$ .

На участках ускорения при линейно растущем магнитном поле и переходе к плато магнитного поля потери частиц отсутствуют. Значения косинуса равновесной фазы  $\cos \phi_s = \frac{V}{V_s}$ , импульсного разброса в пучке  $\Delta p/p_s$ , частоты малых

синхротронных колебаний  $F_s$ , длины сгруппированного пучка  $L$ , релятивистского фактора  $\gamma$ , изменяющиеся в процессе ускорения, приведены в табл. 1, 2. На рис. 7, 8 показаны относительный разброс частот синхротронных колебаний в пучке на уровне 0,9 амплитуды колебаний и коэффициент банчиловки пучка  $\eta = \lambda/\lambda(\phi)_{\text{max}}$ .

Численный расчет ускорения ионов урана с  $Z = 79,81$  показывает, что ускоряются почти все захваченные в режим ускорения частицы боковых зарядностей, т.е. ~90% от числа инжектируемых частиц.

Таблица 1 /Z/A = 80/238/

$t-t_0$ , мкс	$V$ , кВ	$\theta$ , °	$\frac{d\theta}{dt}$ , 1/с	$\cos \phi_s$	$f_s$ , МГц	$\frac{H_s/ds}{H_s/c}$	$L$ , м	$\eta \cdot 10^4$	$\gamma$	$F_s$ , кГц
0	12,5	0,2578	0	0	1,1828	0	52	4,5	1,021	2,68
1	22,2	0,2590	2,35	0,14	1,1880	10	38	5,1	1,021	3,55
2	29,0	0,2625	4,64	0,21	1,2033	20	36	5,5	1,022	4,04
3	34,8	0,2629	6,81	0,25	1,2285	30	33	5,7	1,023	4,39
4	39,8	0,2761	8,82	0,28	1,2626	38	32	5,6	1,024	4,66
5	44,0	0,2858	10,6	0,31	1,3050	46	31	5,5	1,026	4,87
6	49,5	0,2972	12,1	0,33	1,3542	52	28	5,4	1,028	5,03
8	52,0	0,3238	14,3	0,35	1,4681	61	27	4,9	1,033	5,20
10	53,3	0,3533	15,0	0,36	1,5922	63	26	4,4	1,040	5,20
20	51,0	0,5033	15,0	0,38	2,1855	56	20	2,8	1,079	4,79
30	48,5	0,6533	15,0	0,40	2,7090	49	19	2,0	1,130	4,32
40	45,9	0,8033	15,0	0,42	3,1603	42	17	1,6	1,191	3,85
50	43,3	0,9533	15,0	0,44	3,5431	35	16	1,3	1,261	3,40
<b>Медленный вывод</b>										
57	41,6	1,058	14,9	0,46	3,7741	31	15	1,3	1,314	3,10
58	39,1	1,073	13,8	0,45	3,8038	28	16	1,2	1,321	3,0
59	34,0	1,086	11,3	0,43	3,8293	23	16	1,2	1,328	2,78
60	26,3	1,095	7,8	0,38	3,8485	15	17	1,1	1,333	2,47
61	16,2	1,101	3,4	0,27	3,8595	7	19	1,0	1,336	1,97
61,7	5,45	1,102	0	0	3,8620	0	24	0,8	1,337	1,42
<b>Быстрый вывод</b>										
60	41,0	1,103	15,0	0,47	3,8646	29	15	1,2	1,338	2,99
70	38,8	1,253	15,0	0,50	4,1333	25	15	1,1	1,421	2,63
72	38,4	1,283	14,4	0,48	4,1811	23	14	1,1	1,438	2,57
73	38,2	1,297	12,3	0,41	4,2021	19	14	1,1	1,446	2,59
74	38,0	1,307	9,1	0,31	4,2187	14	14	1,1	1,452	2,62
75	37,7	1,314	4,9	0,17	4,2294	8	14	1,1	1,456	2,65
76,1	37,5	1,317	0	0	4,2334	0	14	1,1	1,458	2,65

Таблица 2 / Z/A = 1/2/

$t-t_0$ мкс	$V, кВ$	$B, Т$	$\frac{dB}{dt}, Т/с$	$\cos \phi$	$f_0, МГц$	$\frac{df_0/dt}{f_0/c}$	$L, м$	$\frac{\Delta p}{p} \cdot 10^3$	$\beta$	$\bar{r}_c, кГц$
0	11,2	0,1733	0	0	1,1828	0	52	3,7	1,021	3,78
2	22,0	0,1758	2,49	0,16	1,1991	16	35	4,4	1,022	5,25
4	29,5	0,1832	4,91	0,24	1,2474	32	32	4,8	1,024	6,01
6	35,7	0,1954	7,19	0,29	1,3258	46	30	4,5	1,027	6,54
8	41,0	0,2119	9,28	0,32	1,4313	59	29	4,1	1,032	6,92
10	45,2	0,2323	11,1	0,35	1,5597	69	26	4,0	1,038	7,17
12	48,5	0,2561	12,6	0,37	1,7063	77	24	3,5	1,046	7,30
16	52,0	0,3110	14,6	0,40	2,0311	84	21	2,8	1,067	7,28
20	51,6	0,3706	15,0	0,41	2,3607	80	20	2,2	1,094	6,95
30	47,9	0,5206	15,0	0,44	3,0787	64	17	1,5	1,179	5,91
40	44,3	0,6706	15,0	0,48	3,6438	50	15	1,2	1,283	4,92
50	41,0	0,8206	15,0	0,52	4,0788	38	15	1,0	1,402	4,06
60	38,3	0,9706	15,0	0,55	4,4113	29	13	0,9	1,533	3,35
<b>Медленный вывод</b>										
66	36,6	1,061	14,9	0,57	4,5721	25	13	0,8	1,617	2,98
68	28,4	1,087	10,9	0,54	4,6150	17	14	0,8	1,642	2,59
69	20,7	1,096	7,1	0,49	4,6292	11	15	0,7	1,650	2,24
70	10,7	1,101	2,7	0,36	4,6368	4	17	0,6	1,655	1,66
70,6	2,6	1,102	0	0	4,6380	0	24	0,5	1,656	0,85
<b>Быстрый вывод</b>										
70	36,0	1,121	15,0	0,59	4,6661	22	13	0,8	1,674	2,77
80	34,0	1,271	15,0	0,62	4,8629	17	12	0,7	1,821	2,31
82	33,9	1,285	11,9	0,50	4,8943	13	12	0,7	1,849	2,36
83	33,7	1,309	8,47	0,36	4,9055	9	11	0,8	1,839	2,42
84	33,5	1,315	4,23	0,18	4,9124	5	11	0,8	1,866	2,46
84,9	33,2	1,317	0	0	4,9145	0	11	0,8	1,868	2,47

#### 4. ДОПУСКИ НА ПАРАМЕТРЫ МАГНИТНОГО И ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ПОЛЕЙ

Медленный уход индукции магнитного поля и радиочастоты от идеальных значений приводит к неточностям при посадке пучка в сепаратрису. Согласно /8/ отклонения  $\Delta B$  и  $\Delta f_0$  эквивалентны сдвигу синхронного импульса на величину  $\Delta p$  в соответствии с выражениями

$$\frac{\Delta B}{B} = \frac{|\alpha \gamma_0^2 - 1|}{\alpha \gamma_0^2} \frac{\Delta p}{p}, \quad \frac{\Delta f_0}{f_0} = \frac{|\alpha \gamma_0^2 - 1|}{\gamma_0^2} \frac{\Delta p}{p}. \quad /13/$$

Численные расчеты показывают, что при  $(\Delta p/p) < 5 \cdot 10^{-5}$  коэффициент захвата уменьшается не более чем на  $0,5 \div 1,0\%$  по сравнению с идеальным случаем. Отсюда получаем допуски на отклонения магнитного поля и радиочастоты  $\Delta B/B < 9,7 \cdot 10^{-4}$  и  $\Delta f_0/f_0 < 4,6 \cdot 10^{-5}$ .

Требования на величину допустимого ухода напряжения при захвате можно получить, варьируя величину  $k$  вблизи выбранного значения. Так, задаваясь допустимым уменьшением коэффициента захвата на  $1,5\%$ , получим  $\Delta V_0/V_0 \leq 4\%$ .

Неточность в настройке и нестабильность частоты в процессе ускорения вызывают смещение пучка по радиусу в соответствии с выражением

$$\frac{\Delta r_0}{r_0} = \left( \frac{1}{\gamma^2} - \alpha \right) \frac{\Delta R}{\psi_{\max}}, \quad /14/$$

где  $\psi_{\max} = 1,3$  м - максимальное значение дисперсионной функции. При допустимом отклонении по радиусу, равном  $\pm 1$  мм, стабильность частоты ВЧ напряжения должна быть не хуже  $7,0 \cdot 10^{-4}$  в начале ускорения и  $1,9 \cdot 10^{-4}$  в конце.

Средний квадрат амплитуды фазовых колебаний при наличии шумовых возмущений растет по закону /8/

$$\overline{A_{\text{возм.}}^2}(t) = A^2(t) \left[ 1 + \pi \int_0^t \frac{\Phi(\Omega_c) dt}{A^2(t) \Omega_c^2} \right]. \quad /15/$$

где  $A(t)$  - амплитуда фазовых колебаний в отсутствие возмущений,  $\Phi(\Omega)$  - спектральная плотность возмущений амплитуды ускоряющего напряжения, радиочастоты и магнитного поля.

$$\frac{\Phi(\Omega_c)}{\Omega_c^2} = \begin{cases} \frac{1}{\Delta \Omega_c} \Omega_c^2 \operatorname{ctg}^2 \phi_s \left( \frac{\Delta V}{V} \right)^2, \\ \frac{1}{\Delta \Omega_c} (2\pi f_0)^2 \left( \frac{\Delta f_0}{f_0} \right)^2, \\ \frac{\alpha^2}{\Delta \Omega_c} (2\pi f_0)^2 \left( \frac{\Delta B}{B} \right)^2. \end{cases} \quad /16/$$

В /16/ предполагается, что амплитуды гармоник шумов одинаковы в диапазоне изменения частоты синхротронных колебаний  $\Delta \Omega_c$ .

Полагая  $\Delta \Omega_c \approx \Omega_c(t = t_0)$ ,  $\frac{A_{\text{возм.}}^2(t) - A^2(t)}{A^2(t)} = 0,01$ ,  $t = t_3$ , по-

лучим допуск на среднеквадратичное шумовое возмущение амплитуды ВЧ напряжения  $\sqrt{(\Delta V/V)^2} < 3,6 \cdot 10^{-3}$ . Допуски на шумовые возмущения радиочастоты и магнитного поля получаются аналогично и равны  $\sqrt{(\Delta f_0/f_0)^2} < 1,0 \cdot 10^{-5}$  /в диапазоне  $0,85 \div 7,3$  кГц/,  $\sqrt{(\Delta B/B)^2} < 2,2 \cdot 10^{-4}$ .

Допуски на гармонические возмущения, находящиеся в диапазоне изменения синхротронной частоты, определяются из соотношений

$$\frac{(\Delta A)^2}{A^2} = \frac{\pi}{8} \frac{F_{\Omega'}^2}{\Omega'^2 A^2 |d\Omega/dt|}, \quad \frac{F_{\Omega'}^2}{\Omega'^2} = \begin{cases} \Omega^2 \operatorname{ctg}^2 \phi_s \left(\frac{\Delta V}{V}\right)_{\Omega}^2, \\ (2\pi f_0)^2 \left(\frac{\Delta f_0}{f_0}\right)_{\Omega}^2, \\ a^2 (2\pi f_0)^2 \left(\frac{\Delta B}{B}\right)_{\Omega}^2, \end{cases} \quad /17/$$

где  $(\Delta A)^2$  - среднеквадратичное изменение амплитуды фазовых колебаний после прохождения резонанса  $\Omega' = \Omega_c$  /величины со штрихом берутся в момент резонанса/. Из /17/ получаем величины допусков на гармонические возмущения, лежащие в диапазоне  $0,85 \div 7,3$  кГц /отметим, что наиболее жесткие допуски получаются для логких элементов с  $Z/A = 1/2$ /:

$$\left(\frac{\Delta V}{V}\right)_{\Omega} < 1,0 \cdot 10^{-2}, \quad \left(\frac{\Delta f_0}{f_0}\right)_{\Omega} < 3,9 \cdot 10^{-6}, \quad \left(\frac{\Delta B}{B}\right)_{\Omega} < 8,2 \cdot 10^{-5}. \quad /18/$$

Амплитуда гармоники напряжения, вызывающей параметрический резонанс, определяется из соотношения

$$\frac{(\Delta A)^2}{A^2} = \frac{\pi}{64} \frac{\Omega_c'^2}{|d\Omega/dt|} \left(\frac{\Delta V}{V}\right)_{2\Omega_c}^2 \quad /19/$$

и при  $(\Delta A/A)^2 = 0,01$  должна удовлетворять условию  $(\Delta V/V)_{2\Omega_c} < 9 \cdot 10^{-3}$  в диапазоне  $1,7 \div 14,6$  кГц /этот и предыдущий допуски приведены для однократного прохождения резонанса/.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Беляев Л.Н. и др. В кн.: Аннотации докладов VIII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Протвино, 1982, с. 7.

2. Белов В.П. и др. В кн.: Аннотации докладов VIII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Протвино, 1982, с. 36.
3. Казанский Г.С., Михайлов А.И., Пучков Г.П. В кн.: Труды III Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т.2, "Наука", М., 1973, с. 236.
4. Мяз Э.А., Пашков П.Т. АЭ, 1973, 34, с. 465.
5. Шукейло И.А. В кн.: Труды X Международной конференции по ускорителям заряженных частиц высоких энергий. Серпухов, 1977, с. 339.
6. Пашков П.Т., Шукейло И.А. ЖТФ, 1971, 41, с. 1002.
7. Мяз Э.А., Пашков П.Т., Смирнов А.В. Препринт ИФВЭ, ОКУ 78-47, Серпухов, 1978.
8. Коломенский А.А., Лебедев А.Н. Теория циклических ускорителей. Физматгиз, М., 1962.

Рукопись поступила в издательский отдел  
23 августа 1983 года.



## НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

Вы можете получить по почте перечисленные ниже книги, если они не были заказаны ранее.

ДЗ-11787	Труды III Международной школы по нейтронной физике. Алушта, 1978.	3 р. 00 к.
Д13-11807	Труды III Международного совещания по пропорциональным и дрейфовым камерам. Дубна, 1978.	6 р. 00 к.
	Труды VI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1978 /2 тома/	7 р. 40 к.
Д1,2-12036	Труды V Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1978.	5 р. 00 к.
Д1,2-12450	Труды XII Международной школы молодых ученых по физике высоких энергий. Приморско, НРБ, 1978.	3 р. 00 к.
	Труды VII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1980 /2 тома/	8 р. 00 к.
Д11-80-13	Труды рабочего совещания по системам и методам аналитических вычислений на ЭВМ и их применению в теоретической физике, Дубна, 1979.	3 р. 50 к.
Д4-80-271	Труды Международной конференции по проблемам нескольких тел в ядерной физике. Дубна, 1979.	3 р. 00 к.
Д4-80-385	Труды Международной школы по структуре ядра. Алушта, 1980.	5 р. 00 к.
Д2-81-543	Труды VI Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1981.	2 р. 50 к.
Д10,11-81-622	Труды Международного совещания по проблемам математического моделирования в ядерно-физических исследованиях. Дубна, 1980.	2 р. 50 к.
Д1,2-81-728	Труды VI Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1981.	3 р. 60 к.
Д17-81-758	Труды II Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1981.	5 р. 40 к.
Д1,2-82-27	Труды Международного симпозиума по поляризационным явлениям в физике высоких энергий. Дубна, 1981.	3 р. 20 к.
Р18-82-117	Труды IV совещания по использованию новых ядерно-физических методов для решения научно-технических и народнохозяйственных задач. Дубна, 1981.	3 р. 80 к.
Д2-82-568	Труды совещания по исследованиям в области релятивистской ядерной физики. Дубна, 1982.	1 р. 75 к.
Д9-82-664	Труды совещания по коллективным методам ускорения. Дубна, 1982.	3 р. 30 к.
ДЗ,4-82-704	Труды IV Международной школы по нейтронной физике. Дубна, 1982.	5 р. 00 к.

Заказы на упомянутые книги могут быть направлены по адресу:  
101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79  
Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований

Белошицкий П.Ф., Казаринов Н.Ю., Перельштейн Э.А. P9-83-604  
Режим ускорения в тяжелоионном синхротроне ускорительного комплекса тяжелых ионов

Рассмотрен режим ускорения в тяжелоионном синхротроне ускорительного комплекса тяжелых ионов в ОИЯИ. Определены режимы работы радиотехнической и магнитной систем в синхротроне, обеспечивающие минимальные потери частиц при ускорении, с учетом реальных технических возможностей этих систем. Исследована динамика ионного пучка при захвате, ускорении и в режимах быстрого и медленного выводов. Установлены требования на стабильность магнитного поля и радиочастоты, допуски на шумовые и гармонические возмущения магнитного поля, амплитуды и частоты ускоряющего напряжения. Энергия ионов урана в конце цикла ускорения будет достигать 430 МэВ/нуклон, ядер легких элементов - 815 МэВ/нуклон.

Работа выполнена в Отделе новых методов ускорения ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1983

Beloshitskij P.F., Kazarinov N.Yu., Pereishtejn E.A. P9-83-604  
Regime of Acceleration in Heavy Ion Accelerator of Heavy Ion Accelerating Complex

The regime of acceleration in heavy ion synchrotron of JINR heavy ion accelerating complex is considered. The regimes of operation of RF and magnetic systems are chosen which provide minimum losses of ions per cycle of acceleration with taking into account real technical possibilities of these systems. Computational study of ion beam dynamics is performed during the capture, acceleration and low and fast extraction of the beam. The requirements on stability of RF and magnetic systems and tolerance on noise and harmonic disturbances of magnetic field, amplitude and frequency of accelerating voltage are defined. The 430 MeV/nucleon uranium ion energy at the end of acceleration will be achieved, for light element nuclei - 815 MeV/nucleon.

The investigation has been performed at the Department of New Methods of Acceleration, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1983

Перевод О.С.Виноградовой