

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

9 - 7088

M-69

МИХАЙЛОВ  
Анатолий Иванович

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ УСКОРЕНИЯ ЯДЕР  
НА СИНХРОФАЗОТРОНЕ ОИЯИ

Специальность - 05 280 -  
электрофизические установки и ускорители

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

(Диссертация написана на русском языке)

Дубна 1973

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий  
Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель:  
кандидат технических наук Г.С.Казанский

Официальные оппоненты:  
доктор технических наук А.А.Васильев,  
кандидат физико-математических наук И.Н.Иванов

Ведущее научно-исследовательское учреждение:  
Институт физики высоких энергий, г.Серпухов.

Автореферат разослан " \_\_\_\_\_ 1973 года.  
Защита диссертации состоится " \_\_\_\_\_ 1973 го-  
да на заседании Ученого совета Лаборатории высоких  
энергий Объединенного института ядерных исследований.

Адрес: г. Дубна, Московской области, конференц-зал ЛВЭ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке  
Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Ученый секретарь Совета  
кандидат физико-математических наук

С.В.Мухин

9 - 7088

МИХАЙЛОВ  
Анатолий Иванович

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ УСКОРЕНИЯ ЯДЕР  
НА СИНХРОФАЗОТРОНЕ ОИЯИ

Специальность - 05 280 -  
электрофизические установки и ускорители

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

(Диссертация написана на русском языке)

Объединенный институт  
ядерных исследований  
БИБЛИОТЕКА

В последние годы все возрастающий интерес проявляется к ускорению до релятивистских энергий более тяжелых частиц, чем протоны. Возможность ускорения дейтронов,  $\alpha$ -частиц и других, более тяжелых ядер до релятивистских энергий создает необходимые условия для проведения исследований в области релятивистской ядерной физики /1/.

Проблема получения релятивистских ядер на синхрофазотронах тесно связана с решением целого ряда физических и инженерных задач, касающихся в первую очередь создания эффективных ионных источников, систем инжекции и систем, обеспечивающих синхротронный режим ускорения ионов.

В 1970 году на синхрофазотроне ОИЯИ был реализован метод ускорения дейтронов и  $\alpha$ -частиц, предложенный в 1968 году независимо в США /2/ и в СССР /3,4/, и впервые в мире был получен пучок релятивистских дейтронов, ускоренных до энергии  $\sim 10$  Гэв /5,6,7/. Реализация этого метода ускорения явилась по сути дела началом нового направления в ускорительной технике /8,9/.

Основное содержание реферируемой диссертации составляют вопросы, связанные с решением задач по осуществлению синхротронного режима ускорения атомных ядер на синхрофазотроне ОИЯИ.

В первой главе диссертации проведен анализ состояния техники ускорения многозарядных ионов на современном этапе и тенденции ее развития. Наряду с ускорительным комплексом типа "Омнитрон" /10/, сооружаемым в Лоуренсовской национальной лаборатории /Беркли, США/ и пред-

назначенном для ускорения любых ионов до энергий  $\sim 500$  Мэв/нуклон, появились предложения по использованию существующих протонных синхрофазотронов для ускорения ядер до релятивистских энергий. В этом случае требования, предъявляемые к высокочастотной ускоряющей системе, обеспечивающей синхротронный режим ускорения, в немалой степени зависят от параметров инжектирующих устройств. В частности, чем выше энергия инжектируемых ионов, тем меньше частотный диапазон ускоряющей системы. В свою очередь, повышение энергии инжектируемых в синхрофазотрон ионов тесно связано с решением проблемы ионизации атомов.

Широко используемые в настоящее время искровые источники, дуоплазматроны и источники *PIG* - типа не могут в должной мере обеспечить получение высокозарядных ионов, в том числе и ядер даже легких элементов. Отсутствие таких источников вынуждает прибегать к использованию обдирочных мишеней как к наиболее эффективному методу получения высокозарядных ионов. Однако такой метод эффективен лишь в том случае, если перед обдиркой ионы ускорены до необходимой энергии. Таким образом, ускорение по многоступенчатой схеме, состоящей из двух или более ускорителей /в качестве отдельных ускорителей могут использоваться линейные ускорители, генераторы Ван де Граафа и циклотроны/ с размещением между ними обдирочных устройств, является в настоящее время наиболее рациональным путем ускорения ионов до энергий  $\sim 10$  Мэв/нуклон.

Многоступенчатые ускорительные системы, предназначенные, главным образом, для получения многозарядных ионов, используемых при проведении исследований в ядерной физике, химии, биологии и медицине, могут служить в качестве наиболее эффективных инжектирующих устройств синхрофазотронов.

Использование протонного линейного ускорителя для ускорения дейтронов и других ядер с таким же отношением заряда иона к его массе  $(Z/A)$  в режиме двукратного дрейфа<sup>/3/</sup> приводит к снижению скорости частиц на выходе из ЛУ в два раза, вследствие чего во столько же раз требуется увеличение частотного диапазона ускоряющей

системы синхрофазотрона. Предложенный двухэтапный режим синхротронного ускорения даже при наличии лишь одной ускоряющей станции позволяет сравнительно просто обойти проблему расширения частотного диапазона ускоряющей системы.

Во второй главе проведен анализ двухэтапного режима синхротронного ускорения с возможностью наиболее эффективного перехода от первого этапа ко второму. Получено соотношение между частотой ускоряющего напряжения " $f_0$ " и напряженностью магнитного поля " $H$ "

$$f_0 = \frac{qc}{2\pi R_0 + L} \frac{H}{\sqrt{\left(\frac{E_{0A}}{eR_0}\right)^2 \left(\frac{A}{Z}\right)^2 + H^2}}, \quad /1/$$

а также выражение для определения значения магнитного поля  $H_{I \text{ кон}}$ , при котором необходимо осуществить переход с первого этапа на второй

$$H_{I \text{ кон}} = \frac{f_{\text{max}}}{f_{\infty}} \left(\frac{E_{0A}}{eR_0}\right) \frac{A}{Z} \frac{1}{\sqrt{q^2 - \left(\frac{f_{\text{max}}}{f_{\infty}}\right)^2}}. \quad /2/$$

Здесь  $q$  - кратность ускорения;  $E_{0A}$  - полная энергия частицы на нуклон;  $R_0$  - радиус центральной орбиты;  $L$  - суммарная длина прямолинейных промежутков;  $f_{\text{max}}$  - верхняя частота диапазона ускоряющей системы;  $f_{\infty}$  - значение частоты по формуле /1/ при  $H \rightarrow \infty$  и  $q=1$ . На рис. 1 представлена зависимость  $f_0 = \Phi(H)$  при различных кратностях на первом этапе и при  $q=1$  на втором.

При наличии одной ускоряющей станции, для которой требуется определенное время на перестройку с одной частоты на другую, усложняется процесс перехода от первого этапа ко второму. Исследованный режим перехода при выключенном ускоряющем напряжении и постоянном во времени магнитном поле оказался наиболее пригодным для данного конкретного случая<sup>/11,12/</sup>.

Проведенный анализ потерь ускоряемых частиц из-за рассеяния и изменения заряда в результате взаимодейст-

вия их с атомами остаточного газа в процессе синхротронного ускорения показал, что потери частиц из-за рассеяния одинаковы при одинаковых  $Z/A$  и не играют существенного значения по сравнению с потерями из-за изменения заряда, которые следует ожидать на начальном участке ускорения.

На основании полученного соотношения для оценки потерь ускоряемых ядер из-за захвата ими электронов /13/

$$\frac{N_I}{N_i} = e^{-0,77 \cdot 10^{30} \sigma_{i,Z,Z-1} \frac{p}{\dot{H} W_{iA}^{3/2}} \left[ 1 - \left( \frac{H_i}{H_I} \right)^3 \right]} \quad /3/$$

/Здесь  $N_i, N_I$  - соответственно, число ядер, захваченных в синхротронный режим при  $H=H_i$  и ускоренных до значения магнитного поля  $H_I$ ;  $\sigma_{i,Z,Z-1}$  - сечение захвата инжектируемым ядром одного электрона;  $W_{iA}$  (кэВ/нуклон) - кинетическая энергия на нуклон инжектируемых ядер;  $\dot{H}$  (кэ/сек) - скорость нарастания магнитного поля;  $p$  - давление в вакуумной камере в торах/ и зависимости показателя степени экспоненты в функции напряженности магнитного поля /см.рис.2/ предложен метод ускорения ядер, основанный на совмещении участка наибольших потерь с первым этапом ускорения и форсировании скорости нарастания магнитного поля на этом участке. В этой же главе исследован режим повторного захвата частиц при ускорении /14/, и на основании анализа фазового движения частиц, первоначально оказавшихся за пределами области устойчивости, в соответствии с уравнениями /15,16/

$$Q = \frac{\dot{\phi}}{\omega_0 \sqrt{\frac{eV_0 KF}{\pi E_A} \frac{Z}{A}}} = \sqrt{\sin \phi - \sin \phi_{нач} + Q_{нач}^2} \quad /4/$$

$$\int_{\phi_{нач}}^{\phi_{\tau}} \frac{d\phi}{\sqrt{\sin \phi - \sin \phi_{нач} + Q_{нач}^2}} = \int_0^{\tau} \omega_0 \sqrt{\frac{eV_0 KF}{\pi E_A} \frac{Z}{A}} dt \quad /5/$$

/здесь:  $\omega_0 = 2\pi f_0$ ;  $V_0$  - амплитуда ускоряющего напряжения;  $K = 1 + \frac{n}{1-n} \frac{1}{\beta^2}$ ;  $F = 1 - \frac{L}{(2\pi R_0 + L) [1 + \beta^2(1-n)]}$ ,  
 $n$  - показатель спада магнитного поля по радиусу;

$\beta = \frac{v}{c}$  - относительная скорость частиц;  $E_A$  - полная

энергия частицы на нуклон;  $\phi$  и  $\dot{\phi}$  - фаза и скорость ее изменения;  $\tau$  - интервал времени после начала второго этапа;  $\phi_{нач}, Q_{нач}$  - начальные значения  $\phi$  и  $Q$  /предложен метод повышения эффективности захвата на втором этапе посредством скачкообразного увеличения амплитуды ускоряющего напряжения через  $1/4$ -,  $1/2$  - периода синхротронных колебаний /см.рис.3/.

Исходя из особенностей процесса перехода магнитного поля от постоянного к растущему, характеризуемого появлением пульсаций и некоторой "просадки" в поле, связанной с переходными процессами в системе питания электромагнита, проведен анализ изменений области устойчивости /см.рис.4/ и в результате полученных соотношений /18/

$$\psi_k = a \frac{\dot{H}}{V_0} \quad /6/$$

$$V_0 = \frac{V_{oc}}{2} + \frac{a\pi}{4} |\dot{H}| + \sqrt{\left( \frac{V_{oc}}{2} + \frac{a\pi}{4} |\dot{H}| \right)^2 - \frac{a^2}{2} \dot{H}^2} \quad /7/$$

/где:  $\psi_k$  - компенсирующий фазовый сдвиг ускоряющего напряжения;  $a = 300 R_0 \frac{2\pi R_0 + L}{c}$ ;  $V_{oc}$  - амплитуда

ускоряющего напряжения, соответствующая заданному размеру области устойчивости при  $\dot{H}=0$  /предложен метод уменьшения потерь частиц в переходном режиме магнитного поля, заключающийся в модуляции фазы ускоряющего напряжения пропорционально скорости изменения магнитного поля " $\dot{H}$ ", а амплитуды ускоряющего напряжения пропорционально абсолютному значению  $|\dot{H}|$ .

В этой главе рассмотрен вопрос о возможностях ускоряющей системы с точки зрения обеспечения необходимой амплитудой ускоряющего напряжения в условиях двухэтапного ускорения при различных значениях скорости нарастания магнитного поля на разных этапах. Показано, что при существующем ускоряющем электроде и форсированной скорости нарастания магнитного поля необходимый прирост энергии частиц за один оборот может быть обеспечен выбором соответствующей кратности ускорения на первом этапе.

В *третьей* главе рассмотрены вопросы, связанные с практической реализацией синхротронного режима ускорения дейтронов на синхрофазотроне ОИЯИ. С помощью разработанной аппаратуры /17-19/ обеспечено программное управление частотой, амплитудой и фазой ускоряющего напряжения в режиме двухэтапного ускорения при  $q=2$  на первом и  $q=1$  на втором.

Исследована зависимость эффективности захвата от параметров магнитного поля и амплитуды ускоряющего напряжения, и экспериментально получен ~100-процентный захват пучка на втором этапе. Введением в ускоряющее напряжение управляемого фазового сдвига, пропорционального скорости изменения магнитного поля, уменьшены не менее чем в 2 раза потери интенсивности при переходе магнитного поля из режима "стола". На рис. 5 представлена осциллограмма сигнала интенсивности с сигнальных электродов в режиме двухэтапного ускорения дейтронов.

Проведенные исследования позволили успешно осуществить ускорение дейтронов и  $\alpha$ -частиц до энергий ~10 и ~20 Гэв соответственно и начать плановое проведение физических экспериментов с пучком релятивистских ядер.

Подводя итог результатам исследований, выполненных в диссертации, можно заключить следующее:

1. Решена проблема ускорения дейтронов,  $\alpha$ -частиц и других, более тяжелых ядер в синхротронном режиме без расширения частотного диапазона ускоряющей системы и при наличии одной ускоряющей станции. Этот режим представляет собой ускорение в два этапа на

разных кратностях с переходом от одной кратности к другой при постоянном во времени магнитном поле;

2. Получен необходимый закон связи между частотой ускоряющего напряжения и напряженностью магнитного поля при различных кратностях ускорения на первом этапе и  $q=1$  - на втором.

3. Разработана аппаратура программного управления частотой ускоряющего напряжения в режиме двухэтапного ускорения и осуществлено ускорение дейтронов и  $\alpha$ -частиц до энергий ~10 и ~20 Гэв соответственно.

4. Предложен и реализован на практике режим захвата пучка на втором этапе ускорения посредством скачкообразного увеличения амплитуды ускоряющего напряжения через  $1/4$ - и  $1/2$ -периода синхротронных колебаний, что позволило осуществить ~100-процентный захват пучка на втором этапе.

5. Экспериментально исследовано влияние характера изменения амплитуды ускоряющего напряжения и пульсаций в магнитном поле на эффективность захвата на втором этапе.

6. Исследован вопрос о влиянии переходного процесса и пульсаций в магнитном поле на потери частиц в начале второго этапа и найден метод уменьшения этих потерь. С помощью разработанной аппаратуры управления фазой ускоряющего напряжения экспериментально получено, что компенсация колебаний равновесной фазы с использованием информации о скорости изменения магнитного поля позволяет существенно снизить эти потери.

7. Проведен анализ потерь ускоряемых ядер из-за упругого рассеяния атомами остаточного газа и из-за изменения заряда вследствие захвата ускоряемыми ядрами электронов. На основании этого анализа предложен метод ускорения ядер, в котором значительное уменьшение потерь частиц может быть достигнуто увеличением скорости нарастания магнитного поля на одном лишь первом этапе.

8. Найдено практическое решение для обеспечения нормального режима синхротронного ускорения ядер в условиях повышенной скорости нарастания магнитного поля, которое заключается в необходимости увеличения крат-

ности ускорения на первом этапе во столько раз, во сколько увеличена скорость нарастания поля по сравнению с номинальным значением.

Основное содержание диссертации изложено в работах /3-7, 14-20/, опубликованных в виде препринтов, статей и докладов на всесоюзных и международных конференциях по ускорителям.

### Литература

1. А.М.Балдин. ОИЯИ, Р7-5808, Дубна, 1971.
2. E.D.Courant. United States Patent Office, 3, 374, 378, Patented Mar, 19, 1968.
3. Ю.Д.Безногих, Л.П.Зиновьев, Г.С.Казанский, А.И.Михайлов, В.И.Мороз, Н.И.Павлов. ОИЯИ, Р9-4214, Дубна, 1968.
4. Ю.Д.Безногих, Л.П.Зиновьев, Г.С.Казанский, А.И.Михайлов, В.И.Мороз, Н.И.Павлов. ПТЭ, 4, 202, 1969.
5. А.М.Балдин, Ю.Д.Безногих, Л.П.Зиновьев, И.Б.Иссинский, Г.С.Казанский, А.И.Михайлов, В.И.Мороз, Н.И.Павлов, Г.П.Пучков. ОИЯИ, Р9-5442, Дубна, 1970.
6. А.М.Балдин, Ю.Д.Безногих, Л.П.Зиновьев, И.Б.Иссинский, Г.С.Казанский, А.И.Михайлов, В.И.Мороз, Н.И.Павлов, Г.П.Пучков. ПТЭ, 3, 29 /1971/.
7. A.M.Baldin, Yu.D.Beznogikh, I.B.Issinsky, G.S.Kazansky, A.I.Mikhajlov, V.I.Moroz, N.I.Pavlov, G.P.Puchkov, I.N.Semenjushkin, L.P.Zinovjev, IEEE Trans.Nucl.Sci., NS-18, 3, 1024 (1971).
8. M.V.Isaila et al., IEEE Trans.Nucl.Sci., NS-19, 2, 204 (1972).
9. H.A.Grunder et al., IEEE Trans.Nucl.Sci., NS-19, 2, 212 (1972).
10. The Omnitron UCRL-16828, LRL, July, 1966.
11. Г.С.Казанский, А.И.Михайлов, Г.П.Пучков. ОИЯИ, Р9-5311, Дубна, 1970.
12. Г.С.Казанский, А.И.Михайлов, Г.П.Пучков. Труды II Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, 11-18 ноября, 1970, Москва, т.1, 53 /1972/.
13. Е.Д.Донец, Г.С.Казанский, А.И.Михайлов, А.А.Смирнов. ОИЯИ, 9-7043, Дубна, 1973.
14. Г.С.Казанский, А.И.Михайлов, ОИЯИ, 2795, Дубна, 1966.
15. Г.С.Казанский, А.И.Михайлов, Н.Б.Рубин, А.П.Царенков. Атомная энергия, т.18, в 6, 555 /1965/.
16. Г.С.Казанский, А.И.Михайлов, Г.П.Пучков. ОИЯИ, 9-6375, Дубна, 1972.

17. А.И.Михайлов. ОИЯИ, 9-6793, Дубна, 1972.

18. Г.С.Казанский, А.И.Михайлов, Г.П.Пучков. ОИЯИ, 9-5821, Дубна, 1971.

19. Г.А.Боков, А.И.Михайлов, Г.П.Пучков, А.П.Царенков. Труды Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, окт. 1968, Москва, т.11, 79 /1970/.

Рукопись поступила в издательский отдел  
20 апреля 1973 года.

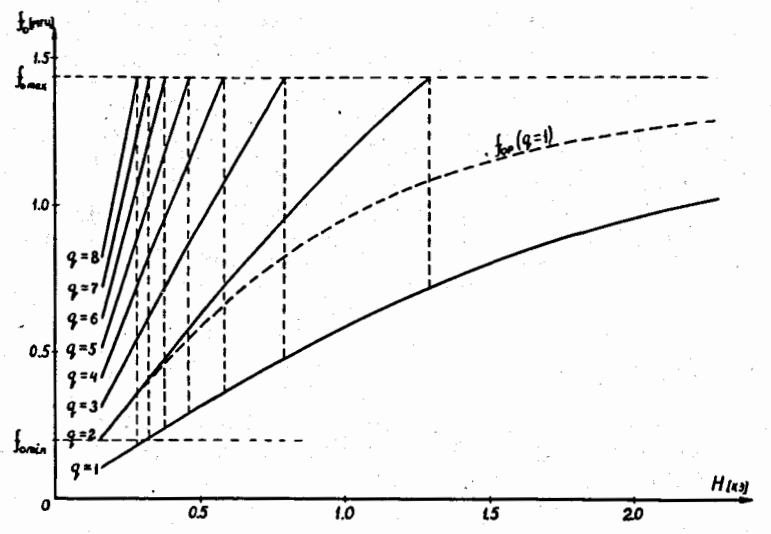


Рис. 1. Зависимость частоты ускоряющего напряжения в функции напряженности магнитного поля для ядер с отношением  $A/Z=2$  при различных кратностях ускорения на первом этапе и при  $q=1$  на втором.  $f_{op}$  - аналогичная зависимость для протонов ( $A/Z=1$ ).

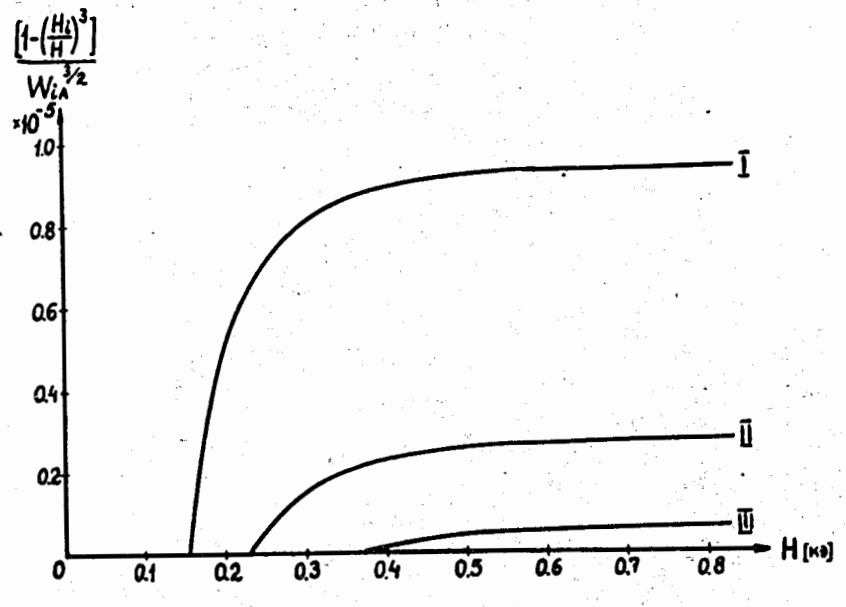


Рис. 2. Зависимость  $[1 - (\frac{H_i}{H})^3] / W_{iA}^{3/2}$  в функции напряженности магнитного поля для различных энергий инжектируемых частиц  $W_{iA}$ : I - 2,25 Мэв/нуклон; II - 5 Мэв/нуклон; III - 12,5 Мэв/нуклон.

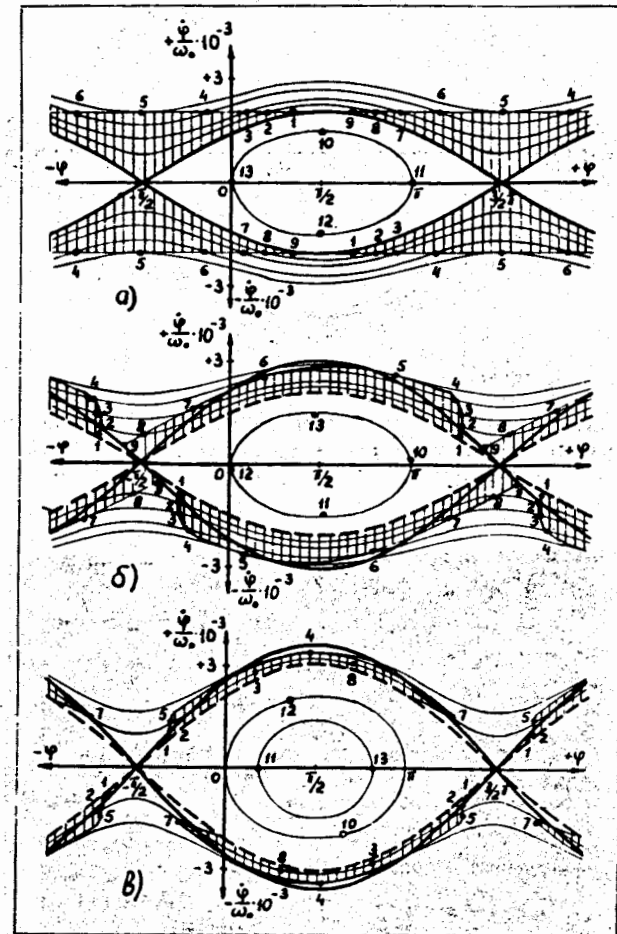


Рис. 3. Положение частиц с начальными условиями 1,2,3... 13 в фазовой плоскости: а/ в момент включения ускоряющего напряжения /  $V_0 = 1,8$  кэ/; б/ через четверть периода синхротронных колебаний /  $V_0$  возрастает от 1,8 кэ до 3,6 кэ/; в/ через полпериода синхротронных колебаний /  $V_0$  возрастает от 3,6 кэ до 5,4 кэ/. Заштрихованные области - области, занимаемые первоначально незахваченными частицами.



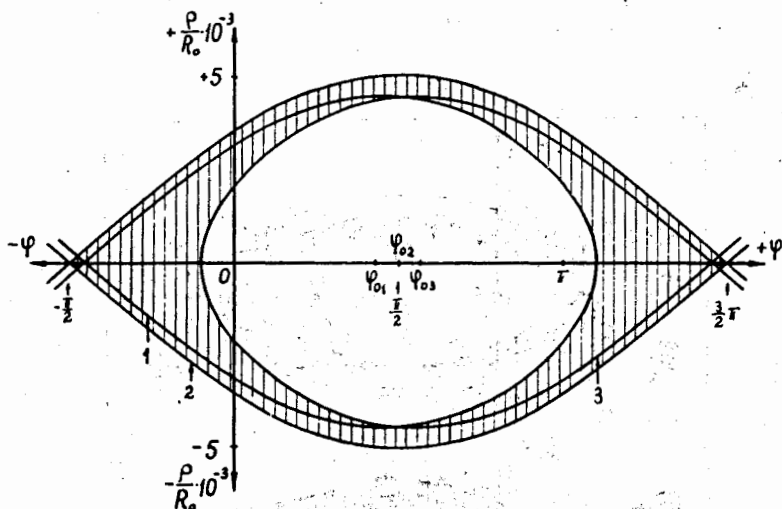


Рис. 4. Характер изменений области устойчивости при ускорении в начале второго этапа /  $V_0 = 4,2$  кв/: 1 - при  $\dot{H} = +1 \cdot 10^3$  э/сек; 2 - при  $\dot{H} = 0$ ; 3 - при  $\dot{H} = -1 \cdot 10^3$  э/сек.

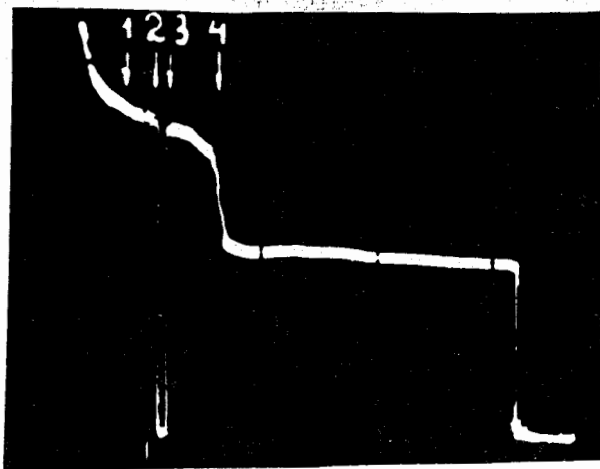


Рис. 5. Осциллограмма сигнала интенсивности дейтронного пучка в цикле ускорения: 1 - момент перехода магнитного поля в режим "стола"; 2 - конец первого этапа; 3 - начало второго этапа; 4 - момент перехода магнитного поля из режима "стола" на растущую ветвь. Интенсивность в конце цикла ускорения  $10^{10}$  дейтронов.