

Л. А. САРКИСЯН

КОЛЬЦЕВОЙ ЦИКЛОТРОН — КАОН-НЕЙТРОННЫЙ ГЕНЕРАТОР

Пионные фабрики. В 1972—1974 гг. в Лос-Аламосе (США) [1], Цюрихе (Швейцария) [2] и Ванкувере (Канада) [3] были сооружены сверхточные протонные ускорители в домиллиардной области энергий, так называемые пионные фабрики. В настоящее время средний ток пучка на линейном ускорителе в Лос-Аламосе, (энергия 800 МэВ) достиг уровня 250 мкА (проектное значение 1000 мкА). В течение нескольких последующих лет запланировано его увеличение до 700 мкА. На циклотронах в Цюрихе (590 МэВ) и Ванкувере (525 МэВ) средний ток достиг проектного значения 100 мкА. Поскольку Цюрихский кольцевой циклотрон работает как ускоритель с «разделенными орбитами» с однооборотным выводом пучка (эффективность вывода 99,9%), запланировано увеличение интенсивности пучка до 1 мА путем замены инжектора (циклотрон на 72 МэВ, запуск в 1982 г.). Дальнейшее увеличение тока до 2—4 мА может быть достигнуто за счет модификации высокочастотной системы циклотрона. Отметим, что в Ванкуверском циклотроне средний ток пучка H^- -ионов при энергии 450 МэВ равен 300 мкА.

Каонные фабрики. Существующие пионные фабрики являются естественными инжекторами каонных фабрик. В случае инжектора линейного ускорителя повышение энергии протонов до 5—7 ГэВ может быть осуществлено с помощью либо линейного ускорителя [4, 5], либо синхротрона с многооборотной инжекцией H^- -ионов (средний ток ≤ 50 мкА) [6], однако в обоих случаях скважность пучка без использования растяжителя будет низкой. В случае инжектора циклотрона дальнейшее повышение энергии протонов свыше E_0 может быть обеспечено за счет каскада из кольцевых циклотронов с прохождением целочисленных резонансов по радиальным бетатронным колебаниям ($Q_R = 2, 3, 4, \dots$), что было предложено автором в 1970 г. [7, 8]. В настоящее время в ряде физических центров сформировалось мнение, что наибольший интерес представляют надпороговые K -мезоны с энергией до 500 МэВ. При этом уменьшаются длины трактов мезонных каналов, фон и затраты на каонную фабрику (достаточна энергия протонов $\sim 2,5$ ГэВ). В табл. 1 приведены возможные параметры двухступенчатой циклотронной каонной фабрики на энергию протонов $\sim 4,2$ ГэВ и средний ток пучка 100—500 мкА, в которой первая ступень — проект циклотрона ОИЯИ на энергию 800 МэВ [9].

Центральной проблемой во втором высокоэнергетичном кольцевом циклотроне каскада является прохождение нескольких целых резонансов по радиальным бетатронным колебаниям ($Q_R = 2, 3, 4, \dots$). Наиболее опасным из них является целый резонанс $Q_R = 2$ (энергия $W \sim 845$ МэВ). Существовавшая теория прохождения целых резонансов, развитая в линейном приближении [10, 11], и эксперименты на электронной модели циклотрона в Ок-Ридже [12] не давали ответа на поведение в процессе ускорения возмущенной в целом резонансе $Q_R = 2$ амплитуды свободных радиальных колебаний частиц в случае медленного прохождения (частица пребывает в зоне резонанса несколько де-

ния протонов по полным уравнениям [14—18], согласно методике, изложенной в работе [19]. Основные параметры кольцевого циклотрона были приняты равными: $H_0=2$ кЭ, $N=20$, $\varepsilon=1$, $Q_z=1,1$; $1,6 \leq Q_R \leq 5$, $R_\infty=1563,73$ см. На рис. 1—3 приведено изменение радиальной коор-

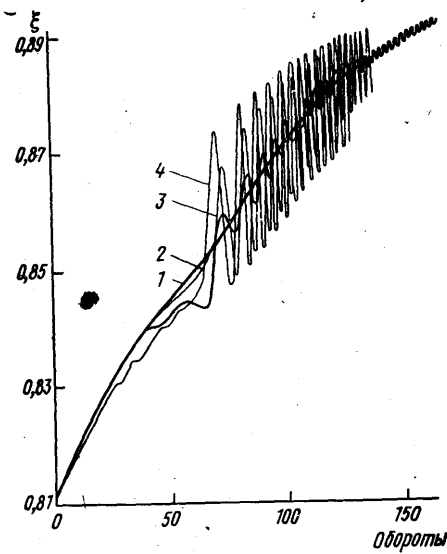


Рис. 1. Поведение радиальной координаты частицы на фиксированном азимуте с целыми оборотами ($eV=3$ МэВ/об) при изменении второй гармоники поля: 1 — $H_2=0$, 2 — $H_2=0,5Э$, 3 — $H_2=2Э$, 4 — $H_2=5Э$

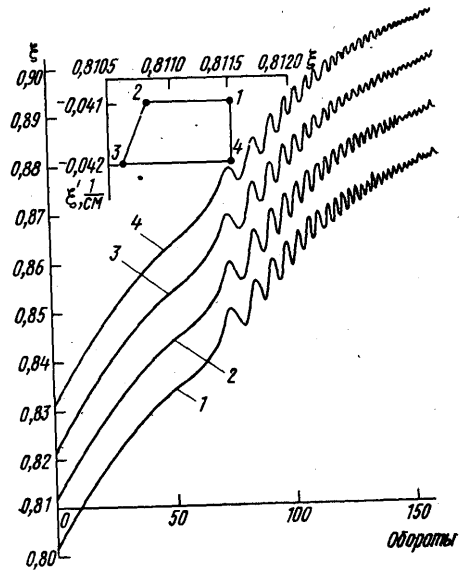


Рис. 2. Изменение радиальной координаты частицы с целыми оборотами на фиксированном азимуте для различных частиц пучка при $H_2=0,5Э$ и $eV=3$ МэВ/об. Для кривых 1, 3 и 4 начало координат по оси ординат должно быть смещено на 0,01, $-0,01$ и $-0,02$ соответственно

динаты частицы $\xi=r/R_\infty$ с целыми оборотами на азимуте инжекции в зависимости от величины второй гармоники магнитного поля, набора энергии за оборот и изменения начальной координаты частиц ($\xi, \xi' = \frac{d\xi}{d\varphi}$). Энергия инжекции протонов выбрана равной 665 МэВ ($Q_R=1,75$, $R=1270$ см). Ускорение осуществлялось с помощью четырех щелей, установленных на фиксированных равноотстоящих азимутах. Инжектор сдвинут относительно щелей на угол 45° . Характер траектории частиц (зубчатой и гладкой) постоянной энергии внутри одного оборота представлен на рис. 4 (расчет проведен в статическом режиме ($eV=0$); начальные координаты частиц ξ, ξ' и ее энергия W взяты из кривой 1 рис. 3). Видно, что амплитуда свободных радиальных колебаний частицы (гладкая траектория) $\rho=(r-R)/R_\infty$ практически совпадает с амплитудой колебаний, изображенной на графике изменения радиальной координаты частицы с оборотами на фиксированном азимуте при одинаковых значениях энергии частицы и второй гармоники поля (рис. 3). На рис. 5 приведено изменение вертикальной координаты частицы $\eta=z/R_\infty$ с целыми оборотами на азимуте инжекции при наборе энергии за оборот 3 МэВ и второй гармонике поля, представ-

ленной кривой 1 рис. 3. Видно, что вертикальная координата частицы ~ 5 мм не возрастает в процессе прохождения целого резонанса $Q_R=2$.

Расчеты показали, что при прохождении резонанса $Q_R=2$ в случае $H_2 > 0$ свободные радиальные колебания частиц испытывают возмущение (воздействие целого резонанса на амплитуду колебаний частиц пучка является когерентным), величина которого достаточно хорошо описывается асимптотической формулой ($\sim 80\%$), и далее с ростом энергии частиц (частоты Q_R и радиуса орбиты) имеет место силь-

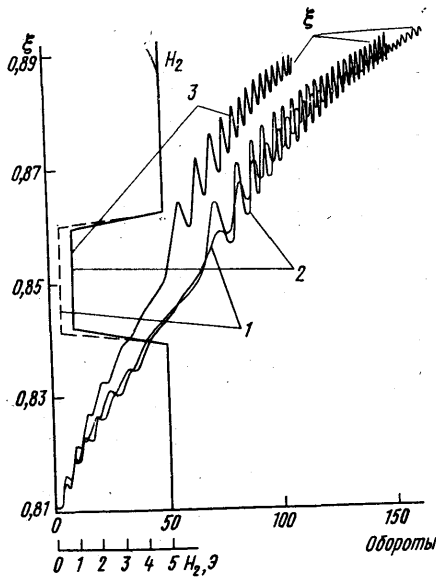


Рис. 3. Поведение радиальной координаты частицы на фиксированном азимуте с целыми оборотами для ступенчатого изменения второй гармоники поля с радиусом и различной энергии за оборот: 1 — ширина зоны резонанса $\Delta Q_R = \pm 0,05$, где $H_2=0,5$ Э, $eV = 3$ МэВ/об; 2 — ширина зоны резонанса $\Delta Q_R = \pm 0,05$, где $H_2=1$ Э, $eV = 3$ МэВ/об; 3 — ширина зоны резонанса $\Delta Q_R = \pm 0,05$, где $H_2=1$ Э, $eV = 4$ МэВ/об

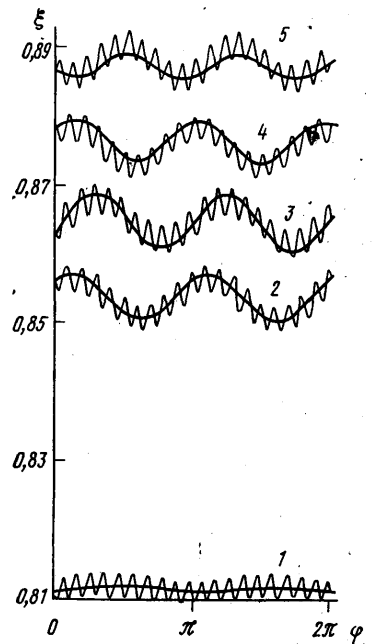


Рис. 4. Траектория (зубчатая и гладкая) частиц постоянной энергии внутри одного оборота. Начальные координаты ξ, ξ' и энергии частицы взяты из кривой 1 рис. 3: 1 — $W=665$ МэВ, $Q_z \approx 1,75$; 2 — $W=875$ МэВ, $Q_z \approx 2,02$; 3 — $W=932$ МэВ, $Q_z \approx 2,06$; 4 — $W=995$ МэВ, $Q_z \approx 2,15$; 5 — $W=1100$ МэВ, $Q_z \approx 2,25$

ное послерезонансное затухание колебаний, исчезающее при увеличении Q_R на $\sim 0,25$ (энергия ~ 1120 МэВ). При ширине зоны резонанса $\Delta Q_R \pm 0,05$, где вторая гармоника поля равна $0,5$ Э (в остальной зоне по радиусу гармоника равна 5 Э), и наборе энергии за оборот 3 МэВ исходная амплитуда свободных радиальных колебаний ~ 1 см (энергия 665 МэВ) возрастает при прохождении целого резонанса до $\sim 5,6$ см и далее с ростом энергии частиц уменьшается до ~ 1 см при $Q_R=2,25$. Из рисунков видно, что возмущенная в целом резонансе ам-

плитуда свободных радиальных колебаний затухает при $Q_R \approx 2,25$ примерно на 70%, что не может быть объяснено известным адиабатическим затуханием, пропорциональным $(Q_R \hbar)^{-\frac{1}{2}}$ (последнее приводит к величине затухания 12,5%). Сильное послерезонансное затухание свободных радиальных колебаний доминирует над адиабатическим затуханием при увеличении Q_R от целого значения на $\sim 0,25$ и далее с ростом Q_R остается адиабатическое затухание.

Таким образом, обнаружено неизвестное ранее явление сильного послерезонансного (по сравнению с известным адиабатическим) затухания с ростом радиуса орбиты амплитуд свободных радиальных колебаний заряженных частиц, возмущенных при прохождении целого резонанса, которое обусловлено уходом частоты радиальных колебаний от резонанса в магнитном поле с пространственной вариацией [14—18]. Это обстоятельство позволяет в циклотронах (у которых широкая область формирования магнитного поля по радиусу) осуществлять медленное прохождение целочисленных резонансов по радиальным бетатронным колебаниям ($Q_R = 2, 3, 4, \dots$) при наборе энергии за оборот $\sim 2\text{--}3$ МэВ и допуске на низшие гармоники поля $\sim 0,5$ Э в зонах соответствующих целых резонансов. Приведенные значения набора энергии за оборот и допуска на низшие гармоники поля реализованы на циклотронах в Цюрихе и Ванкувере.

Отметим, что предложение автора повысить энергию протонов до нескольких ГэВ за счет кольцевых циклотронов с прохождением целых резонансов по Q_R от существующих циклотронных пионных фабрик было позднее рассмотрено в работах [20, 21]. В Ванкувере в 1978 г. начата проработка фабрики К-мезонов и антипротонов [21]. Протоны с энергией 450 МэВ будут ускоряться за счет каскада из двух кольцевых циклотронов последовательно до 3 и 8,5 ГэВ (табл. 2). Циклотроны рассмотрены в сверхпроводящем варианте (максимальное значение магнитного поля 50 кЭ). В Цюрихе изучается кольцевой циклотрон, повышающий энергию протонов с 590 МэВ до ~ 2 ГэВ.

Нейтронные генераторы. Наряду с использованием сильноточных ускорителей для проведения фундаментальных и прикладных исследований в связи с энергетическим кризисом все более актуальной становится задача их практического применения для наработки ядерного горючего. Пучок протонов, падая на мишень, выбивает нейтроны, захватив которые ^{238}U превращается в ^{239}Pu и ^{232}Th в ^{233}U . При энергии протонов 1 ГэВ в мишени рождается около 50 нейтронов [22, 23]. Число возникающих нейтронов, а следовательно, и количество расщепляющегося материала в мишени растет линейно с ростом энергии протонов в диапазоне энергий несколько ГэВ. Весовое количество наработки ^{233}U

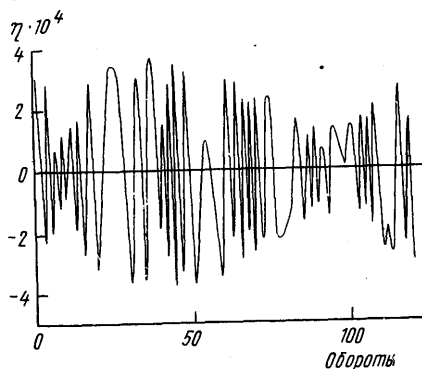


Рис. 5. Поведение вертикальной координаты частицы η на фиксированном азимуте с целыми оборотами ($eV=3$ МэВ/об) для второй гармоники поля (кривая 1 рис. 3)

или ^{239}Pu будет равно $Q_R (\text{г/сут}) = 10 WI$, где W — энергия протонов в гигаэлектронвольтах, I — ток пучка в миллиамперах.

В Чок-Ривере (Канада) разрабатывается проект протонного линейного ускорителя на энергию 1—2 ГэВ и среднюю мощность пучка 300 МВт, позволяющего наработать в сутки 3 кг делящегося материала. Стоимость проекта 750 млн. долл. [23].

В Брукхавене (США) рассматривается проект линейного ускорителя на энергию протонов 1 ГэВ и средний ток пучка 300 мА (стоимость проекта 1000 млн. долл.) [24].

В Дубне (СССР) разрабатывается проект циклотрона на энергию протонов 800 МэВ и средний ток пучка 1—100 мА (табл. 1) [9]. На первом этапе (ток пучка 10 мА) наработка ядерного горючего составит 100 г/сут (стоимость ускорителя 50 млн. руб.).

Таблица 2

Возможные параметры каонной фабрики. Инжектор — пионная фабрика Ванкувера на энергию протонов 525 МэВ

Параметр	I ступень	II ступень
Энергия инжекции, МэВ	450	3000
Конечная энергия, МэВ	3000	8500
Напряженность магнитного поля в центре, кЭ	3	1,5
Радиус, соответствующий бесконечной энергии, м	10,3	20,6
Радиальная ширина ускорения, м	2,3	0,5
Число секторов	15	30
Число основных резонаторов	8 при 46 МГц	15 при 69 МГц
Число гармонических резонаторов	4 при 92 МГц	6 при 207 МГц
Размер основных резонаторов, м ²	$5,9 \times 3,6$	$4 \times 2,6$
Размер дополнительных резонаторов, м ²	$5,9 \times 1,6$	$4 \times 1,5$
Полная ВЧ мощность, МВт	2	1,7
Набор энергии за оборот, МэВ:		
при инжекции	1,2	7,9
при выводе	3,6	7,9
Радиальный шаг за оборот, мм:		
при инжекции	5,3	4,2
при выводе	0,64	0,26
Число оборотов	900	700
Частота бетатронных колебаний:		
радиальных	$\sim 1,5 \leq Q_R \leq 4$	$\sim 4 \leq Q_R < 10$
аксиальных		$\sim 1,5 < Q_z < 2,8$
Вес стали магнита, т	2000	1800

Поскольку с ростом энергии протонов требуемая для наработки одинакового количества ядерного горючего интенсивность пучка падает (и снижается уровень радиационных потерь), в качестве генератора нейтронов предлагается использовать рассмотренный выше кольцевой циклотрон на энергию протонов $\sim 4,2$ ГэВ при средней интенсивности пучка 10—100 мА (табл. 1), инжектором которого является циклотрон, разрабатываемый в Дубне. Основной задачей для таких циклотронов является разработка высокочастотных резонаторов с высокой передачей средней мощности пучку. Проблема 100%-ного вывода пучка из циклотронов основана на механизме расширения замкнутых орбит [9]. При

среднем токе пучка 100 мА каскадный циклотрон при энергии протонов $\sim 4,2$ ГэВ позволит наработать в сутки $\sim 4,2$ кг ядерного горючего.

Закключение. В отношении развития высокоэнергетических сильноточных протонных ускорителей можно сделать следующие выводы.

1. Предложенный автором новый ускоритель — кольцевой циклотрон с прохождением целых резонансов по радиальным бетатронным колебаниям ($Q_R = 2, 3, 4, \dots$) — позволяет повысить энергию протонов в циклотронном режиме от 0,5—0,8 ГэВ до нескольких ГэВ при среднем токе пучка 0,1—1 мА (каонная фабрика) с последующим увеличением тока до 10—100 мА (нейтронный генератор).

2. В ближайшие годы развитие действующих пионных фабрик будет проходить в направлении увеличения интенсивности пучка до 0,5—1 мА и использования их в качестве инжекторов каонных фабрик, разработка которых уже ведется.

3. Проработка проектов нейтронных генераторов вступит в стадию макетирования и моделирования различных узлов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jameson R. A. Тр. IV Всесоюзн. совещ. по ускорителям заряженных частиц, т. 1. М., 1975, с. 131.
2. Виллакс Г. А. Тр. X Межд. конф. по ускорителям заряженных частиц высоких энергий, т. 1. Серпухов, 1977, с. 199.
3. Маккензи Г. Х. Тр. X Межд. конф. по ускорителям заряженных частиц высоких энергий, т. 1. Серпухов, 1977, с. 184.
4. Passow C. Proceed. of the VI Intern. conf. on high energy accelerators. Cambridge, 1967, p. 383.
5. Мурин Б. П. Тр. III Всесоюзн. совещ. по ускорителям заряженных частиц, т. 1. М., 1973, с. 234.
6. Басаргин Ю. Г. и др. ДАН СССР, 1973, 209, 819.
7. Саркисян Л. А. Тр. II Всесоюзн. совещ. по ускорителям заряженных частиц, т. 1. М., 1972, с. 33.
8. Саркисян Л. А. «Атомная энергия», 1971, 30, 446; 1972, 32, 55.
9. Дзелепов В. П., Дмитриевский В. П. Препринт ОИЯИ, 9-10534. Дубна, 1977.
10. Dunn P. D. et al. Proceed. Symp. on high energy accelerators and pion physics. CERN, 1956, v. I, p. 9.
11. Дмитриевский В. П. Препринт ОИЯИ, P9-9341. Дубна, 1976, 178.
12. Martin Y. A., Mann J. E. „Nucl. Inst. and Meth.“, 1962, 18, 19, 461.
13. Дзелепов В. П. и др. Препринт ОИЯИ, P9-7833. Дубна, 1974.
14. Саркисян Л. А. В кн.: Ломоносовские чтения. М., 1976, с. 36.
15. Саркисян Л. А. «Вестн. Моск. ун-та. Физ., астрон.», 1976, 17, № 3, 282.
16. Sarkisyan L. A. „Nucl. Inst. and Meth.“, 1977, 142, 393.
17. Саркисян Л. А. VI Всесоюзн. совещ. по ускорителям заряженных частиц. Препринт. Аннотации докладов. Д9-11874. Дубна, 1978, с. 37.
18. Саркисян Л. А. Рабочее совещание по технике изохронных циклотронов. Аннотации докладов. Краков, 1978, с. 10.
19. Дмитриевский В. П. и др. Препринт ОИЯИ, P9-5498. Дубна, 1971, с. 24.
20. Blosser H. Proceed. VI Intern. cyclotron conf. N. Y., 1972, p. 16.
21. Craddock M. K. et al. „JEEE Trans. on Nucl. Sci.“, 1979, NS-26, Paper C-6.
22. Барашенков В. С. и др. «Атомная энергия», 1974, 37, 475.
23. Шрибер С. О. и др. Тр. X Межд. конф. по ускорителям заряженных частиц высоких энергий, т. 2. Серпухов, 1977, с. 408.
24. Grand P. et al. „JEEE Trans. on Nucl. Sci.“, 1977, NS-24, 1043.

НИИЯФ

Поступила в редакцию
25.10.77
После переработки
22.11.78