

P9-2009-163

О. В. Савченко

РАССМОТРЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ
ФАЗОТРОНА **ОИЯИ** В СИЛЬНОТОЧНЫЙ КОЛЬЦЕВОЙ
ЦИКЛОТРОН

Савченко О. В.

P9-2009-163

Рассмотрение возможности преобразования фазотрона ОИЯИ в сильноточный кольцевой циклотрон

Предложена и рассмотрена возможность преобразования фазотрона ОИЯИ в сильноточный изохронный циклотрон кольцевого типа с током протонного пучка до 5 мА и энергией протонов ~ 600 МэВ. Определены основные параметры этого ускорителя и условия его реализации при максимальном использовании оборудования действующего фазотрона ОИЯИ.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В.П.Джелепова ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2009

Savchenko O. V.

P9-2009-163

Consideration of the Possibility of Conversion of the JINR Phasotron into the High-Current Ring Cyclotron

The possibility of the conversion of the JINR Phasotron into a high-current ring cyclotron with a proton beam current of up to 5 mA and proton energy ~ 600 MeV is proposed and considered. The main parameters of its cyclotron and conditions of its realization with maximum using of the facility of the operating JINR Phasotron are determined.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2009

ВВЕДЕНИЕ

Основой экспериментальной базы Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ до 1979 г. служил первый ускоритель Дубны — синхроциклотрон, введенный в действие в 1949 г. Благодаря ряду усовершенствований синхроциклотрон по интенсивности первичных и вторичных пучков долгое время оставался одним из наиболее мощных ускорителей данного типа [1]. Энергия внутреннего пучка протонов составляла 680 МэВ, ток ускоренных протонов — 2,3 мкА. На синхроциклотроне было выполнено много важных исследований в области сильных взаимодействий пионов и нуклонов, электромагнитных процессов и слабых взаимодействий с участием пионов и мюонов, ядерной спектроскопии нейтрон-дефицитных и сильнодеформированных ядер. Тринадцать наиболее важных научных результатов Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ, полученных на синхроциклотроне, зарегистрированы как открытия.

С развитием физики высоких энергий необходимость получения значительно более точных количественных данных обо всех основных видах взаимодействий элементарных частиц настойчиво требовала существенного увеличения интенсивности пучков частиц, получаемых на действующих ускорителях.

На решение этой задачи в шестидесятые годы прошлого века был направлен разработанный в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ проект переоборудования действующего синхроциклотрона в релятивистский циклотрон на энергию 700 МэВ и ток внутреннего пучка 500 мкА [2, 3].

По разным причинам этот проект так и не был реализован. Однако сегодня, рассматривая этот проект с учетом накопленного опыта создания и эксплуатации сильноточных изохронных циклотронов — мезонных фабрик, следует отметить такой трудноустраняемый недостаток, присущий релятивистскому циклотрону, как сравнительно низкая ($\sim 95\%$) эффективность вывода, обусловленная недостаточным разделением орбит в зоне вывода протонного пучка. Это вызвано относительно небольшим (~ 400 кэВ) приращением энергии за один оборот из-за использования в релятивистском циклотроне обычной дуантной системы классических изохронных циклотронов.

Такая эффективность вывода приведет к весьма значительным (~ 25 мкА) потерям протонного пучка в вакуумной камере ускорителя, резко увеличит активацию ее деталей и потребует применения для проведения ремонтных и профилактических работ на таком ускорителе специально разработанных роботов и манипуляторов.

Все это сильно усложняет и удорожает эксплуатацию такого релятивистского циклотрона и делает его в настоящее время малоперспективным вариантом для переоборудования действующего фазотрона, особенно если принять во внимание уже достигнутый в 1995 г. коэффициент вывода $\sim 99,95\%$ на кольцевом секторном циклотроне в PSI [4].

В 1968 г. в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ был разработан проект реконструкции синхроциклотрона в малую мезонную фабрику (фазотрон с пространственной вариацией магнитного поля, или установка «Ф») с энергией протонов 700 МэВ, средним током внутреннего пучка 50 мкА и интенсивностью выведенного протонного пучка 25 мкА [5].

В 1979–1984 гг. этот проект был реализован. Однако после проведения всех пусконаладочных работ рутинная интенсивность внутреннего и выведенного протонных пучков оказалась соответственно на уровне ~ 5 и $\sim 2,5$ мкА [6].

В результате полученный после реконструкции фазотрона уровень интенсивности выведенного протонного пучка, а также всех вторичных пучков существенно ограничил программу физических и прикладных исследований на этом ускорителе, изначально нацеленных на его проектные параметры, и в 1993 г. фазотрон, как устаревшая и неконкурентоспособная базовая установка, был выведен из бюджетного финансирования, и его дальнейшее функционирование осуществлялось только за счет внебюджетных средств (грантов) и собственных ограниченных ресурсов Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Такое значительное отклонение полученной интенсивности от проектных параметров, как это было выяснено в процессе наладки реконструированного фазотрона, определяется прежде всего процессами, происходящими в центральной зоне фазотрона в течение первого фазового колебания, где доминирующим ограничением является слабость вертикальной фокусировки. Также было выяснено, что потери пучка после прохождения радиуса 30–50 см при дальнейшем ускорении практически отсутствуют [7]. Для выхода из создавшегося положения автором этой статьи еще в 1990 г. было выдвинуто предложение [8] и сделаны первые оценки [9] возможности осуществления внешней инжекции пучка на радиус 30–50 см от расположенного рядом с фазотроном линейного ускорителя H^- -ионов на энергию 6–15 МэВ путем двухступенчатой перезарядки $H^- \rightarrow H^0 \rightarrow H^+$. Сначала H^- перезаряжаются в H^0 на газовой мишени, расположенной вне магнитного поля фазотрона, а затем на тонкой фольге, установленной на выбранном радиусе, происходит перезарядка H^0 в H^+ с эффективностью 100 %.

Однако стоимость реализации этого варианта внешней инжекции составила бы около 10 млн долларов США, что находилось далеко за пределами финансовых возможностей ОИЯИ. В последующее время автором этой статьи были предложены еще несколько вариантов внешней инжекции в фазотрон ОИЯИ [10] на основе использования в качестве ускорителя-инжектора

сильноточного секторного циклотрона и изохронного циклотрона (с дополнительным накопителем), разработанных в отделе новых ускорителей Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ, стоимость реализации которых была бы значительно меньше стоимости первоначального варианта внешней инжекции, однако продолжающиеся финансовые ограничения в ОИЯИ все еще не позволяют реализовать даже такие варианты внешней инжекции в фазотрон ОИЯИ.

В результате Лаборатория ядерных проблем ОИЯИ оказалась единственной среди лабораторий ОИЯИ, не обладающей конкурентоспособной базовой установкой. При этом следует отметить, что даже реализация какого-либо из предложенных вариантов внешней инжекции в фазотрон ОИЯИ при возможно достижимой интенсивности пучка 50 мкА все равно не позволит ему конкурировать с действующими мезонными фабриками, где, как, например, в PSI, уже получена интенсивность около 2 мА и намечается получение ~ 5 мА [4, 11]. В этом случае позитивной альтернативой окончательному закрытию фазотрона ОИЯИ может явиться проект создания такой базовой установки Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ, параметры которой находились бы на уровне или превосходили параметры существующих мезонных фабрик.

Целью настоящей работы является предложение и рассмотрение возможности преобразования фазотрона ОИЯИ в сильноточный изохронный циклотрон кольцевого типа с энергией ~ 600 МэВ, интенсивностью протонного пучка до 5 мА и коэффициентом вывода, превышающим 99,9 %, при максимальном использовании основного магнита, существующей инфраструктуры и оборудования трактов пучков действующего фазотрона, а также всех имеющихся разработок отдела новых ускорителей Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ по сильноточным изохронным циклотронам для электроядерных технологий.

1. ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФАЗОТРОНА ОИЯИ

На рис. 1 представлена схема возможного варианта ускорительного комплекса после преобразования фазотрона ОИЯИ в сильноточный изохронный циклотрон кольцевого типа (СКЦ). В основе ее лежит двухэтапный цикл ускорения, когда H^- -ионы сначала ускоряются в циклотроне-инжекторе типа ЦИ-10 до энергии около 30 МэВ, затем H^- -ионы перезаряжаются в H^0 , которые, в свою очередь, уже в основном ускорителе — сильноточном изохронном кольцевом циклотроне перезаряжаются в H^+ , где затем происходит дальнейшее ускорение протонов до энергии ~ 600 МэВ.

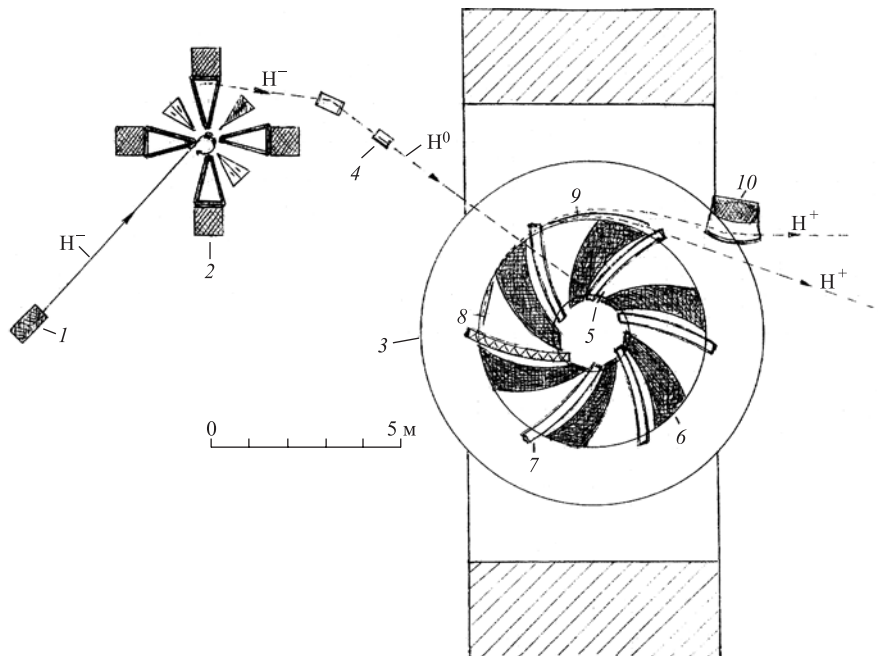


Рис. 1. Общая схема преобразования фазотрона ОИЯИ в комплекс сильноточных изохронных циклотронов: 1 — источник H^- -ионов и форинжектор; 2 — сильноточный секторный циклотрон типа ЦИ-10; 3 — сильноточный изохронный циклотрон кольцевого типа на основе магнита Е-1Б фазотрона ОИЯИ с Ш-образным магнитопроводом; 4 — газовая мишень для перезарядки H^- в H^0 ; 5 — тонкая углеродная мишень для перезарядки H^0 в H^+ ; 6 — отрезки спиральных шимм; 7 — объемные резонаторы; 8 — электростатический дефлектор; 9 — электростатический делитель пучка; 10 — септум-магнит для отклонения отщепленного пучка

Более детально этот двухэтапный цикл ускорения можно представить следующим образом. H^- -ионы из объемного источника (1), подобного созданному в лаборатории TRIUMF, с током 25 мА и нормализованным эмиттансом $\varepsilon_N = 0,6\pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$ [12] ускоряются в форинжекторе до энергии 0,3 МэВ и затем направляются в секторный циклотрон (2) типа ЦИ-10, разработанный в отделе новых ускорителей Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ для ускорения дейтронов до конечной энергии 15 МэВ с интенсивностью ~ 20 мА [13]. Секторный циклотрон ЦИ-10 при незначительном ($\sim 5\%$) изменении изохронного магнитного поля из-за увеличения релятивистского фактора может ускорять протоны или H^- -ионы до энергии 34 МэВ с учетом удвоенной частоты обращения этих частиц по сравнению с дейтроном.

При проектной величине набора энергии за оборот в ЦИ-10 0,4–0,8 МэВ время ускорения H^- -ионов составит около 5 мкс, и за это время потери пучка на электрическую диссоциацию H^- -ионов в магнитном поле циклотрона ЦИ-10, оцененные по формуле (2) работы [14], не превысят величины $\sim 10^{-7}$, а потери из-за взаимодействия с молекулами остаточного газа в камере ЦИ-10, определенные из выражения (7) работы [14], будут на уровне $\sim 10^{-3}$ от начальной интенсивности пучка H^- -ионов с энергией 0,3 МэВ.

Далее H^- -ионы на газовой мишени (4), расположенной вне магнитного поля основного ускорителя СКЦ (3), с вероятностью около 30 % перезаряжаются в H^0 , и затем полученный пучок H^0 инжектируется в СКЦ (3), собранный на базе магнита фазотрона ОИЯИ путем формирования в его межполюсном зазоре $\approx 1,5$ м изохронного магнитного поля с азимутальной вариацией за счет установки отрезков спиральных шимм (6) в кольцевой зоне полюсов ускорителя. На углеродной мишени (5) толщиной около 20 мкг/см², размещенной на радиусе ≈ 1 м, с вероятностью ≈ 100 % происходит перезарядка H^0 в H^+ , и полученный протонный пучок, проходя вертикально ориентированные резонаторы (7), установленные в глубоких долинах между отрезками спиральных шимм, ускоряется до конечной энергии ~ 600 МэВ. На радиусе ≈ 3 м с помощью электростатического дефлектора (8) осуществляется вывод протонного пучка с последующим отщеплением от основного пучка с помощью электростатического делителя (9) и септум-магнита (10) пучка протонов с малой (~ 25 мкА) интенсивностью и дальнейшей разводкой этих пучков по соответствующим каналам транспортировки.

Следует отметить, что при максимальном токе 5 мА мощность пучка, теряемая в фольге мишени (5) при однократном прохождении, составляет всего 1,5 Вт. При этом шаг орбиты при инжекции близок к 3 см и многократное прохождение пучка диаметром около 1 см через перезарядную мишень почти полностью исключено. В этом случае срок службы углеродной перезарядной мишени, как показывают данные работы [15], практически неограничен.

Важно также отметить, что в выбранной двухэтапной схеме ускорения инжекция протонов с энергией 34 МэВ на заданный радиус ускорителя СКЦ была бы практически невозможна из-за наличия сильного магнитного поля в долинах между отрезками спиральных шимм, достигающего значения 0,5–0,8 Тл.

2. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

Магнитное поле СКЦ формируется в межполюсном зазоре магнита Е-1В фазотрона ОИЯИ высотой $\approx 1,5$ м, который образуется после удаления существующей вакуумной камеры и внешних дисков. Магнитное поле в этом зазоре при токе возбуждения 3700 А (число ампер-витков $\approx 1,24 \cdot 10^6$) соста-

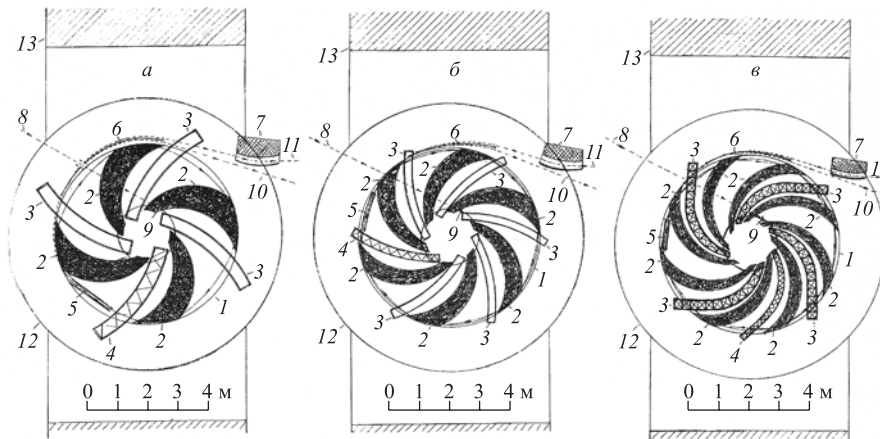


Рис. 2. Схема расположения основных элементов в межполюсном зазоре магнита Е-1В фазотрона ОИЯИ при формировании изохронного поля с азимутальной вариацией в сильноточном кольцевом циклотроне для вариантов *a*, *b* и *в* с 4, 6 и 8 отрезками спиральных шимм (вид в плане в медианной плоскости): 1 — полюс магнита Е-1В фазотрона ОИЯИ; 2 — отрезки спиральных шимм; 3 — основные резонаторы; 4 — flat-top-резонатор; 5 — электростатический дефлектор; 6 — электростатический делитель пучка; 7 — септум-магнит; 8 — инжектируемый пучок H^0 ; 9 — углеродная мишень для перезарядки H^0 в H^+ ; 10 — основной выведенный протонный пучок; 11 — отщепленный пучок; 12 — катушка возбуждения фазотрона ОИЯИ; 13 — боковое ярмо магнита фазотрона

влетает около 1 Тл [16], что позволяет без особых затруднений сформировать в этом зазоре с помощью отрезков спиральных шимм изохронное магнитное поле с необходимой азимутальной вариацией.

На рис. 2 и 3 в двух проекциях показаны три возможных варианта формирования такого изохронного поля с четырьмя, шестью и восемью отрезками спиральных шимм, где в глубоких (~ 1 м) долинах между ними размещены вертикально ориентированные основные резонаторы, работающие на одинаковой частоте с резонаторами ЦИ-10, а также по одному flat-top-резонатору с кратной частотой.

Азимутальная протяженность отрезков спиральных шимм в каждом из этих вариантов составляет соответственно около 30, 20, 15°, а величина вертикального зазора между ними на конечном радиусе выбрана равной 5 см.

На рис. 4, *a* представлена радиальная зависимость среднего значения изохронного магнитного поля $\bar{B}(r)$, рассчитанного по простой формуле

$$\bar{B}(r) = B_0 / \sqrt{1 - \frac{r^2}{r_{II}^2}}, \quad (1)$$

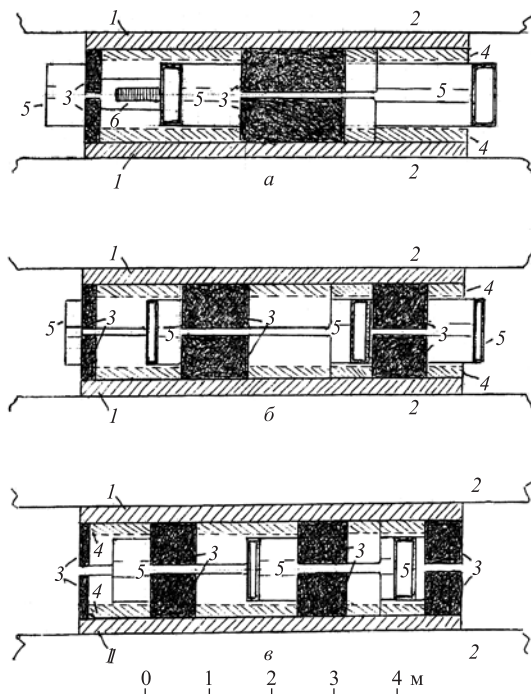


Рис. 3. Вид со стороны бокового ярма магнита Е-1Б на межполюсной зазор магнита фазотрона ОИЯИ после его преобразования в сильноточный кольцевой циклотрон для вариантов *а*, *б* и *в* с 4, 6 и 8 отрезками спиральных шимм: 1 — полюса магнита Е-1Б; 2 — катушки возбуждения фазотрона; 3 — торцы основных спиральных шимм; 4 — дополнительные шиммы в долинах магнитного поля; 5 — вертикально ориентированные резонаторы; 6 — электростатический дефлектор

для энергии протонов 600 МэВ и конечного радиуса ускорения 2,9 м, где $r_{ц} = 3,66$ м, а $\overline{B}(r)$ изменяется от $B_0(r = 0) = 0,854$ Тл, $\overline{B}(r = 0,9 \text{ м}) = 0,885$ Тл до $\overline{B}(r = 2,9 \text{ м}) = 1,4$ Тл на конечном радиусе.

Выбор такого изохронного магнитного поля позволяет получить отношение частот обращения в ЦИ-10 и СКЦ, равное 1 : 1,5, что существенно облегчает задачу точного согласования резонансных частот в этих ускорителях с учетом кратности ускорения для сохранения фазовой протяженности ускоряемых сгустков частиц.

Путем тщательной оптимизации тока возбуждения магнита Е-1Б фазотрона ОИЯИ и тока в корректирующих обмотках вокруг каждой спиральной шиммы, изменением в зависимости от радиуса азимутальной протяженности отрезков спиральных шимм и вертикального зазора между ними, а также радиальным шиммированием магнитного поля в долинах можно будет получить

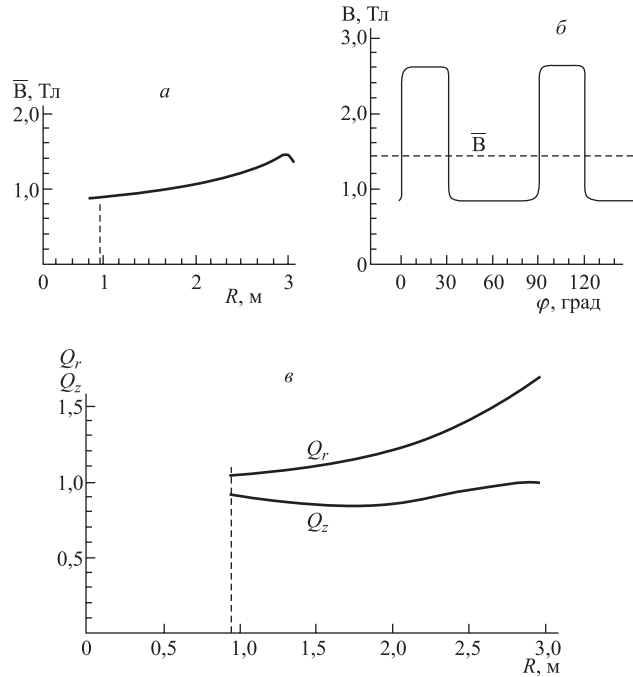


Рис. 4. а) Радиальная зависимость среднего значения изохронного магнитного поля; б) азимутальное распределение магнитного поля на радиусе 2,9 м; в) частоты свободных бетатронных колебаний Q_r и Q_z в зависимости от радиуса для выбранных параметров магнитного поля

величину магнитного поля в холме и долине на конечном радиусе, близкую соответственно к 2,6 и 0,8 Тл при глубине долины до ~ 1 м. На радиусе инъекции 0,95 м соответствующие значения магнитных полей должны быть равными 1,59 и 0,49 Тл.

Приблизительное азимутальное распределение магнитного поля на конечном радиусе 2,9 м показано на рис. 4, б, для которого значение флаттера F , определяемого по приближенной формуле

$$F = (B_{\text{холм}} - \bar{B}) (\bar{B} - B_{\text{дол}}) / \bar{B}^2, \quad (2)$$

где $B_{\text{холм}}$ и $B_{\text{дол}}$ — соответственно значения магнитных полей в холме и долине, а \bar{B} — среднее значение магнитного поля, будет составлять $F = 0,367$.

В других возможных вариантах формирования магнитного поля в СКЦ азимутальная протяженность отрезков спиральных шимм может быть увеличена, например, до 45° на конечном радиусе. В этом случае для получения среднего магнитного поля $\bar{B} = 1,4$ Тл величина магнитного поля в холме мо-

жет быть уменьшена до 2,4 Тл, а в долине — до 0,4 Тл, а значение флаттера F возрастет до $F \approx 0,5$, что позволит несколько уменьшить углы спиральности на всех радиусах кольцевой зоны.

Подтверждение возможности формирования рассмотренных вариантов магнитного поля можно получить из результатов расчета магнитных полей изохронных циклотронов для протонной терапии, приведенных в работе [17].

Так, для изохронного циклотрона С-220р (ОИЯИ) поле в холме и долине на радиусе вывода составляет соответственно 2,65 и 0,95 Тл при вертикальном зазоре в холме 5 см и в долине 40 см, а для изохронного циклотрона С-235 (ИВА) соответствующие величины магнитного поля достигают значений 3,09 и 0,985 Тл при вертикальных зазорах в холме 9,6–0,9 см и долине 60 см.

При этом следует отметить, что указанные значения магнитных полей были получены при числе ампер-витков, равном $3,4 \cdot 10^5$ для С-220р и $5,25 \cdot 10^5$ для С-235, в то время как для магнита фазотрона Е-1Б реальное число ампер-витков составляет $1,24 \cdot 10^6$, а глубина долины будет находиться в пределах 1,0–1,5 м. Это может существенно облегчить задачу получения требуемого изохронного магнитного поля и снизить величину мощности, потребляемой магнитом фазотрона ОИЯИ.

Частоты радиальных и аксиальных свободных (бетатронных) колебаний Q_r и Q_z , определяющие устойчивость движения в изохронном циклотроне с азимутальной вариацией магнитного поля, можно оценить по приближенным формулам из работы [18]:

$$Q_r = \sqrt{1 + K + \dots} \approx 1/\sqrt{1 - \beta^2}, \quad (3)$$

$$Q_z = \sqrt{-K + N^2 F (1 + 2 \operatorname{tg}^2 \gamma) / (N^2 - 1) + \dots}, \quad (4)$$

где $K = (R/\bar{B})(d\bar{B}/dR)$ — показатель неоднородности магнитного поля, равный для изохронного поля $K = \beta^2/(1 - \beta^2)$; β — относительная скорость ускоряемых частиц; N — число спиралей; F — функция вариации магнитного поля или флаттер; γ — угол спиральности, зависящий от радиуса орбиты.

Для показанных на рис. 2 отрезков спиральных шимм, аппроксимированных дугами окружностей, угол γ на радиусе инжекции выбран равным 40° , а на радиусе вывода увеличен до 60° .

Значения Q_r и Q_z , рассчитанные по формулам (3) и (4), представлены на рис. 4, в. Полученные величины Q_r ($1,03 \div 1,64$) и Q_z ($0,8 \div 0,9$) близки к аналогичным значениям Q_r ($1,05 \div 1,55$) и Q_z ($0,9 \div 0,8$) в секторном циклотроне в PSI [4], что позволяет по этому критерию уверенно рассчитывать на достижение в СКЦ интенсивности ускоренного протонного пучка до 2 мА, а с учетом планируемого в PSI повышения интенсивности до 5 мА путем увеличения напряжения на резонаторах значение предельной интенсивности в СКЦ также может возрасти до 5 мА.

Таблица 1. Основные параметры комплекса сильноточных циклотронов

Тип циклотрона	ЦИ-10	СКЦ (для 4, 6 и 8 спиралей)
Ускоряемая частица	H ⁻ -ион	Протон
Энергия инъекции, МэВ	0,3	34
Конечная энергия, МэВ	34	600
Максимальная интенсивность, мА	20	5
Число секторов или спиралей	4	4, 6 или 8
Угловая протяженность сектора или спирали, °	30	30, 20, 15
Межполюсной зазор, см	3	5
Радиальная протяженность полюса, см	15–165	90–300
Среднее магнитное поле на радиусе вывода, Тл	0,53	1,4
Магнитное поле в холме на конечном радиусе, Тл	1,6	2,6
Магнитное поле в долине на конечном радиусе, Тл	0	0,8
Максимальный флаттер	1,45	0,37
Угол спиральности на радиусе инъекции, °	0	40
Угол спиральности на радиусе вывода, °	0	60
Число основных резонаторов	2	3,5, 4
Число flat-top-резонаторов	1	1
Частота обращения, МГц	8,7	13,05
Кратность ускорения	6, 9, 12	4, 6, 8
Резонансная частота, МГц	52,2, 78,3, 104,4	52,2, 78,3, 104,4
ВЧ-напряжение, кВ	200	500
Набор энергии за один оборот, МэВ	0,8	1,5, 2,5, 2,0
Шаг орбиты инжектируемых частиц, см	12	2, 3,3, 2,7
Шаг орбиты в зоне вывода, см	4	0,45, 0,75, 0,6
Частоты свободных (бетатронных) колебаний: радиальных Q_r аксиальных Q_z	1,1 ÷ 1,2 1,0 ÷ 1,2	1,04 ÷ 1,64 0,8 ÷ 0,9

Предельная интенсивность, которая может быть получена после преобразования фазотрона ОИЯИ в СКЦ, дополнительно определяется током инъекции, числом резонаторов и подводимой к ним мощностью и коэффициентом

вывода протонного пучка. Для циклотрона-инжектора ЦИ-10 проектная интенсивность пучка H^- -ионов составляет ~ 20 мА [13]. С учетом потерь при выводе и перезарядки H^- в H^0 на газовой мишени с вероятностью до 30 % величина интенсивности пучка H^0 , инжектируемого в СКЦ, будет ограничена величиной ~ 7 мА.

Коэффициент вывода, допускающий потери пучка в вакуумной камере СКЦ не более 3 мкА, определяется шагом орбит, который, в свою очередь, зависит от набора энергии за один оборот и, следовательно, от числа ускоряющих резонаторов, что предопределяет выбор варианта с четырьмя, шестью или восемью отрезками спиральных шимм, показанных на рис. 2 и 3.

Применение метода вывода, основанного на эффекте расширения орбит [19] путем специального формирования магнитного поля в зоне вывода [20], как показано в работе [21], может существенно снизить требования к набору энергии за один оборот и мощности резонаторов, получить коэффициент вывода не менее 99,95 %, уже достигнутый в PSI [4], и тем самым определить по этому критерию ограничение на предельную интенсивность протонного пучка из СКЦ на уровне ~ 6 мА. Таким образом, максимально возможное значение интенсивности протонного пучка в СКЦ с учетом всех рассмотренных выше ограничений составит ~ 5 мА, что уже достаточно близко к проектным значениям тока пучка ≈ 10 мА в сильноточных циклотронах, разрабатываемых для электроядерных технологий [22–24].

Основные параметры секторного циклотрона-инжектора ЦИ-10 и сильноточного кольцевого циклотрона СКЦ для числа спиралей 4, 6 и 8 приведены в табл. 1.

3. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПУЧКОВ ЧАСТИЦ ОТ СИЛЬНОТОЧНОГО КОЛЬЦЕВОГО ЦИКЛОТРОНА И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ

Общая схема разводки трактов пучков после преобразования фазотрона ОИЯИ в сильноточный кольцевой циклотрон показана на рис. 5. От выведенного из СКЦ (2) протонного пучка интенсивностью несколько мА с помощью электростатического разделителя отщепляется пучок (4) с малой (~ 25 мкА) интенсивностью и направляется на вход углеродного замедлителя, после прохождения которого или тормозится до энергии 70–600 МэВ, или пропускается с максимальной энергией дальше для транспортировки по каналам IX, X, XII и получения медицинских пучков отрицательных пи-мезонов, нейтронов или проведения экспериментов на установке ЯСНАПП-2. Заторможенные протоны транспортируются по каналам VIII и XI в процедурные кабины медикотехнического комплекса или по каналу VI выводятся в лабораторию № 4 для экспериментов по ядерной физике на пучках протонов разных энергий (10).

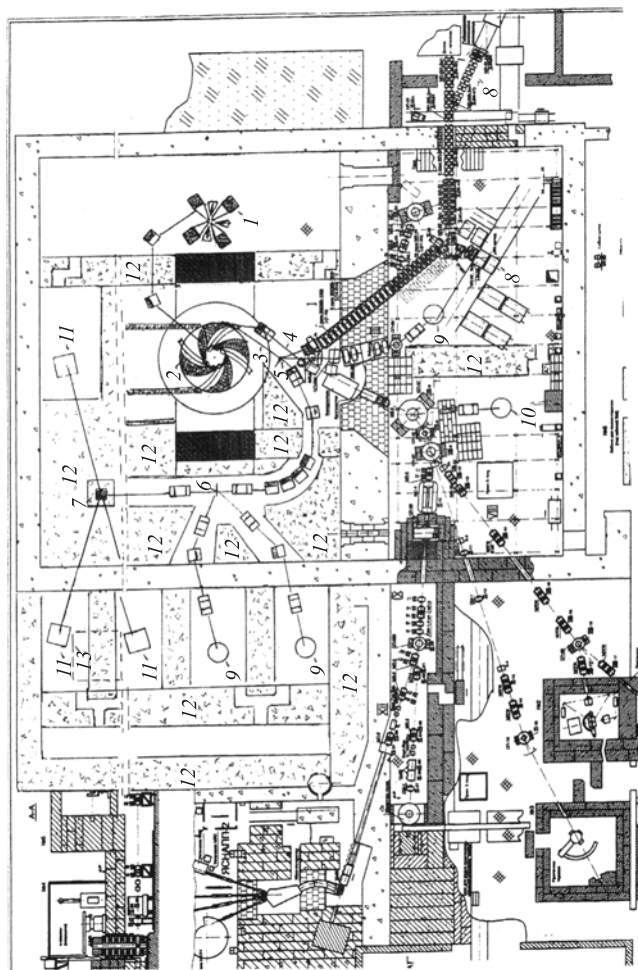


Рис. 5. Общая схема разводки трактов пучков после преобразования фазотрона ОИЯИ в сильноточный кольцевой циклотрон (пояснения в тексте): 1 — циклотрон-инжектор ЦИ-10; 2 — сильноточный кольцевой циклотрон; 3 — основной выведенный протонный пучок; 4 — отщепленный пучок; 5 — первая мезонная мишень; 6 — вторая мезонная мишень; 7 — нейтронная мишень-гаситель протонного пучка с замедлителем для нейтронов; 8 — мюонные пучки; 9 — пионные пучки; 10 — пучок загорюженных протонов; 11 — нейтронные пучки; 12 — дополнительная защита из переносных бетонных блоков; 13 — подземная нейтронная лаборатория

Основной выведенный пучок (3) направляется на первую мезонную мишень (5) толщиной ~ 1 г/см, установленную на входе каналов I, III, головные элементы которых переставлены и перенастроены на новое расположение мезонной мишени. Далее протонный пучок проходит по каналу транспортировки из квадрупольных линз и отклоняющих магнитов, заворачивающих пучок параллельно боковому ярму магнита Е-1Б фазотрона ОИЯИ, и направляется на вторую, более толстую (~ 3 г/см), мезонную мишень (6), а затем полностью поглощается в массивной охлаждаемой мишени-гасителе протонного пучка (7), окруженной толстой защитой из бетона и железа.

Пучки мезонов от второй мишени и нейтроны от мишени-гасителя, протонного пучка через коллиматоры в защитных стенах и дополнительных бетонных блоках попадают в новый павильон экспериментальных установок, который может быть сооружен в промежутке между двухметровой боковой защитной стеной здания фазотрона ОИЯИ и параллельной защитной стеной здания ЯСНАПП-2 путем установки крыши и мостового крана с опорой на эти стены.

Канал транспортировки и место гашения протонного пучка окружены дополнительными переносными блоками бетонной и железной защиты (12), а первая и вторая мезонные мишени окружены со всех сторон, за исключением отверстий для прохода пучков, локальной защитой из свинца, железа и тяжелого бетона.

Район вывода протонных пучков, первая мезонная мишень и углеродный замедлитель окружены сбоку и сверху дополнительными блоками бетонной защиты (12), а новый экспериментальный павильон должен быть снабжен дополнительной защитой из переносных бетонных блоков (12), примыкающих к зданиям фазотрона ОИЯИ и ЯСНАПП-2, и поделен на отсеки с толстыми стенами для установки регистрирующей аппаратуры. В новом павильоне на глубине 10–15 м предполагается сооружение низкофоновой лаборатории (13) для изучения свойств мюонных нейтрино, образующихся при полном торможении протонного пучка в мишени-гасителе.

Для непревышения допустимого уровня радиационного фона вне экспериментальных павильонов здания фазотрона ОИЯИ при увеличении интенсивности выведенного протонного пучка до ~ 1000 раз толщина дополнительной защиты (12) в зоне вывода пучка, канале транспортировки до места мишени-гасителя протонного пучка должна быть не менее 4,2 м обычного бетона, 2,9 м тяжелого бетона или 1,5 м стали, а вокруг мишени-гасителя — около 10 м тяжелого бетона.

Возможен и менее затратный вариант схемы разводки трактов пучков преобразованного фазотрона, изображенный на рис. 6, без сооружения дополнительного экспериментального павильона между корпусом ЯСНАПП-2 и зданием фазотрона ОИЯИ. В этом случае выведенный пучок протонов

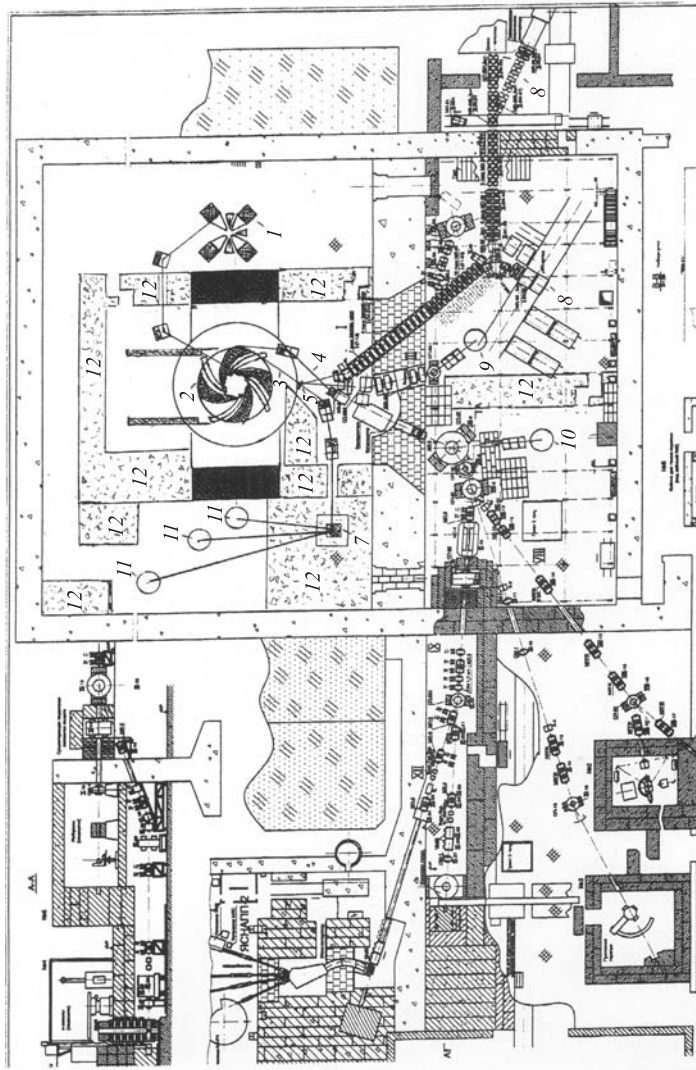


Рис. 6. Вариант схемы разводки трактов пучков после преобразования фазогрона ОИЯИ без сооружения дополнительного экспериментального павильона. Обозначения те же, что и на рис. 5

Таблица 2

Наименование пучка	Тип ускорителя	
	СКЦ	Фазотрон ОИЯИ
Выведенный протонный пучок, с^{-1}	$3 \cdot 10^{16}$	$1,5 \cdot 10^{13}$
Положительные пионы, с^{-1}	$6 \cdot 10^9$	$3 \cdot 10^7$
Отрицательные пионы, с^{-1}	10^9	$5 \cdot 10^6$
Сепарированные μ^+ -мезоны, с^{-1}	$6 \cdot 10^7$	$3 \cdot 10^5$
Сепарированные μ^- -мезоны, с^{-1}	$2 \cdot 10^7$	10^5
Пучок поверхностных мюонов, с^{-1}	$4 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^4$
Пучки нейтронов на расстоянии 15 м от мишени-гасителя, $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	10^{10}	—
Пучок нейтрино (30 МэВ), $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	$5 \cdot 10^8$	
Медицинский протонный пучок (200 МэВ), с^{-1}	10^{10}	10^9
Медицинский пучок отрицательных пионов (80 МэВ), с^{-1}	$4 \cdot 10^8$	$4 \cdot 10^7$
Медицинский нейтронный пучок, с^{-1}	10^{10}	10^9
Пучок сепарированных поверхностных мюонов, с^{-1}	$2 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^5$

гасится в области нейтронной мишени (7) (рис. 6), а нейтронные пучки заканчиваются в дополнительно окруженном бетонными блоками отсеке между боковым яром магнита Е-1Б и двухметровой защитной стеной здания фазотрона ОИЯИ.

При ожидаемой максимальной интенсивности выведенного протонного пучка ~ 5 мА (т. е. в 2000 раз большей, чем интенсивность существующего выведенного пучка фазотрона ОИЯИ ($\sim 2,5$ мкА)), интенсивности мезонных пучков от первой мишени толщиной ~ 1 г/см углерода возрастут на каналах I, II и III примерно в 200 раз, а интенсивности пучков частиц на каналах VI, VIII, IX, X, XI и XII увеличатся примерно на один порядок при интенсивности отщепленного протонного пучка ~ 25 мкА. Ожидаемые интенсивности пучков частиц после преобразования фазотрона ОИЯИ в сильноточный кольцевой циклотрон и интенсивности пучков частиц действующего фазотрона ОИЯИ [6] приведены в табл. 2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное рассмотрение показало принципиальную возможность преобразования фазотрона ОИЯИ в сильноточный кольцевой циклотрон и отсутствие каких-либо непреодолимых технических препятствий на пути реализации такого преобразования.

Максимальное использование имеющегося готового оборудования, и в первую очередь магнита Е-1Б фазотрона ОИЯИ, большей части элементов трактов пучков с источниками питания, существующих зданий и всей инфраструктуры для эксплуатации и обслуживания фазотрона, а также привлечения обширного накопленного опыта отдела новых ускорителей Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ по разработке сильноточных циклотронов позволят в несколько раз сократить затраты на реализацию такого преобразования фазотрона по сравнению с затратами на сооружение целиком нового сильноточного циклотрона в другом, необустроенном месте.

Реализация рассмотренной возможности преобразования фазотрона ОИЯИ в сильноточный кольцевой циклотрон на десятки лет вперед обеспечит Лабораторию ядерных проблем ОИЯИ конкурентоспособной базовой установкой и проведение на новом ускорителе широкого круга перспективных исследований по ядерной физике и физике элементарных частиц, а также прикладным междисциплинарным исследованиям по физике конденсированных сред, материаловедению, радиобиологии и адронной терапии онкологических больных.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Роганов В. С.* ОИЯИ, Б1-9-4707. Дубна, 1969.
2. *Глазов А. А. и др.* // Труды Международной конференции по ускорителям. М.: Госатомиздат, 1963. С. 547.
3. *Джелепов В. П. и др.* // УФН. 1965. Т. 85, вып. 4. С. 651.
4. *Schryber U. et al.* // Proc. 14th Int. Conf. on Cyclotron and Their Application, Cape Town, South Africa, 1995. P. 32.
5. *Глазов А. А. и др.* Препринт ОИЯИ 9-3951. Дубна, 1968.
6. Фазотрон Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ и его пучки. ОИЯИ, 9-92-232. Дубна, 1992.
7. *Ворожцов С. Б. и др.* // Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна: ОИЯИ, 1985. Т. 1. С. 324.
8. *Савченко О. В.* // Совещание по программе экспериментов на фазотроне ОИЯИ. Дубна, 1990. С. 17.
9. *Савченко О. В.* ОИЯИ, Б1-9-90-72. Дубна, 1990.
10. *Савченко О. В.* Сообщение ОИЯИ Р9-2008-22. Дубна, 2008.
11. PSI annual report 2000. V. 6.
12. *Новиков Д. Л.* Сообщение ОИЯИ Р9-2001-138. Дубна, 2001.
13. *Самсонов Е. В. и др.* Сообщение ОИЯИ Р9-99-126. Дубна, 1999.
14. *Кольга В. В. и др.* Сообщение ОИЯИ Р9-88-637. Дубна, 1988.

15. *Гикал Б. Н. и др.* Сообщение ОИЯИ Р9-2005-110. Дубна, 2005.
16. *Аленицкий Ю. Г. и др.* Сообщение ОИЯИ Р9-81-664. Дубна, 1981.
17. *Аленицкий Ю. Г. и др.* Сообщение ОИЯИ Р9-2004-32. Дубна, 2004;
Alenitsky Yu. G. et al. // Proc. of XIX RUPAC (Russian Particle Acceleration Conference), Dubna, October 4–8, 2004. P. 162.
18. *Комар Е. Г.* Основы ускорительной техники. М.: Атомиздат, 1975. С. 177.
19. *Дмитриевский В. П. и др.* Сообщение ОИЯИ Р9-6733. Дубна, 1972.
20. *Глазов А. А. и др.* Сообщение ОИЯИ Р9-98-198. Дубна, 1998.
21. *Самсонов Е. В.* Сообщение ОИЯИ Р9-86-14. Дубна, 1986.
22. *Fietier N. et al. // Proc. 14th Int. Conf. on Cyclotron and Their Application, Cape Town, South Africa, 1995. P. 598.*
23. *Аленицкий Ю. Г. и др.* Сообщение ОИЯИ Р9-97-333. Дубна, 1997.
24. *Аленицкий Ю. Г. и др.* Сообщение ОИЯИ Р9-2002-224. Дубна, 2002.

Получено 28 октября 2009 г.

Редактор *А. И. Петровская*

Подписано в печать 25.02.2010.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,25. Уч.-изд. л. 1,48. Тираж 270 экз. Заказ № 56906

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/