

СЗ45а+СЗ45к

А-471

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА



2015/1-73

9 - 7148

4/11-73

В.П. Алексеев, А.М. Балдин, Ю.Д. Безногих,  
А.А. Васильев, М.А. Воеводин, Е.И. Дьячков,  
Л.И. Зайдина, А.Г. Зельдович, Л.П. Зиновьев,  
И.Б. Иссинский, Г.С. Казанский, И.Ф. Колпаков,  
А.А. Кузьмин, Л.Г. Макаров, Е.С. Миронов,  
А.И. Михайлов, Б.П. Мурин, Н.И. Павлов,  
И.Н. Семенюшкин, В.Ф. Сиколенко, А.А. Смирнов,  
В.Л. Степанюк, А.П. Царенков, К.В. Чехлов

ПЕРСПЕКТИВЫ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ПО РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКЕ  
В ЛВЭ ОИЯИ

(Соображения по развитию ускорительного комплекса)

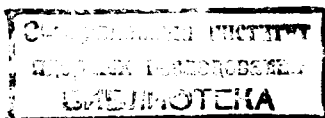
**1973**

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

В.П. Алексеев,\* А.М. Балдин, Ю.Д. Безногих,  
А.А. Васильев,\* М.А. Воеводин, Е.И. Дьячков,  
Л.И. Зайдина,\* А.Г. Зельдович, Л.П. Зиновьев,  
И.Б. Иссинский, Г.С. Казанский, И.Ф. Колпаков,  
А.А. Кузьмин,\* Л.Г. Макаров, Е.С. Миронов,\*  
А.И. Михайлов, Б.П. Мурин,\* Н.И. Павлов,  
И.Н. Семенюшкин, В.Ф. Сиколенко, А.А. Смирнов,  
В.Л. Степанюк, А.П. Царенков, К.В. Чехлов

**ПЕРСПЕКТИВЫ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ПО РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКЕ  
В ЛВЭ ОИЯИ**

(Соображения по развитию ускорительного комплекса)



---

\* Радиотехнический институт АН СССР

Предоставление физикам уникальных или редких возможностей проведения эксперимента является одним из важнейших факторов успешных исследований в области физики высоких энергий. В связи с этим во всех крупнейших ускорительных центрах мира очень большое внимание уделяется коренной модернизации крупных установок, и в первую очередь, ускорителей. Заново создаются большие ускорители, причем новые системы держат рекорд по параметрам пучков в течение всего лишь нескольких лет. Со времени запуска в 1957 году основной базовой установки ОИЯИ в области физики высоких энергий - синхрофазотрона - были предприняты лишь довольно ограниченные усовершенствования этого ускорителя. Синхрофазотрон давно утратил рекордность параметров пучков, и перед ЛВЭ и Институтом стоит трудная задача - поиск направлений исследований, которые позволили бы ответить на наиболее острые вопросы физики высоких энергий и предоставить физикам, базирующимся на ОИЯИ, уникальные и редкие условия эксперимента. Одно из таких направлений - выход на крупнейшие ускорители мира - уже принесло хорошие плоды. Создание ЛВЭ крупнейших электронных установок и двух пузырьковых камер на Серпуховском ускорителе в период, когда этот ускоритель обладал рекордными параметрами пучков, позволил Лаборатории не только получить ряд важных научных результатов, но и обеспечить лаборатории стран-участниц ОИЯИ уникальной информацией, которая будет ими обрабатываться в течение ближайших двух-трех лет. Это направление с привлечением ускорителей на встречных пучках и электронных ускорителей имеет хорошие перспективы и на будущее. Однако, несмотря на значительные успехи в этой области, выход на крупнейшие ускорители не может обеспечить потребностей

физиков, базирующихся на ОИЯИ. Такому крупному международному институту необходима собственная достаточно современная ускорительная база. Для постановки экспериментов на значительном расстоянии от основной базы необходимо иметь возможность не только полностью отладить и откалибровать установки, но и испытать их в рабочих условиях. Проведение экспериментов на "чужих" ускорителях требует слишком больших усилий и не позволяет полностью использовать потенциальные возможности установок.

Предпринятая в последние годы модернизация синхрофазотрона в значительной степени решает проблему создания собственной ускорительной базы ОИЯИ на ближайшее время. Создание системы медленного вывода <sup>1,2/</sup>, уникальных пучков релятивистских ядер и монохроматических нейтронов <sup>3,4/</sup>, сооружение экспериментального павильона - создадут хорошие предпосылки для проведения фундаментальных исследований.

Возникшее и разрабатываемое в ЛВЭ новое научное направление - релятивистская ядерная физика <sup>5+9/</sup> - имеет хорошие перспективы, обеспечивая не только нетривиальный подход к самым острым проблемам физики элементарных частиц (множественные процессы, проблема структуры частиц и др.), но и важные практические применения. Это направление подхвачено и интенсивно развивается американскими физиками. Однако его дальнейшее развитие - увеличение интенсивности пучков и зарядности ядер - на существующем ускорителе встретится со значительными трудностями, связанными с особенностями конструкции синхрофазотрона ЛВЭ. Необеспеченной пока остается и более далекая перспектива других направлений физики высоких энергий в ОИЯИ.

Ниже излагаются соображения по созданию в ЛВЭ ОИЯИ сверхпроводящего жесткофокусирующего ускорителя релятивистских ядер - "Нуклотрона", который в будущем заменит синхрофазотрон.

"Нуклотрон" - трехкаскадный ускорительный комплекс (рис.1), в котором ядра ускоряются последовательно в существующем линейном ускорителе до энергии 10 Мэв на нуклон, промежуточном кольце ускорителя (ПКУ) до энергии 0,75 Гэв на нуклон, основном кольце ускорителя (ОКУ) - до энергии 20 + 25 Гэв на нуклон.

Ускорительный комплекс будет работать в следующем режиме: ядра, ускоренные в линейном ускорителе, за 3-4 оборота вводятся в промежуточное кольцо; из ПКУ ядра переводятся в основное кольцо, где после накопления нескольких импульсов, инжектируемых промежуточным кольцом, ускоряются до конечной энергии. Предусматривается вывод ядер в экспериментальные павильоны как из промежуточного кольца при энергии 10 + 750 Мэв на нуклон и интенсивности примерно  $10^{12}/z$  ядер в секунду ( $z$  - заряд ядра), так и с основного кольца при энергии 0,75 + 25 Гэв на нуклон и интенсивности примерно  $10^{12}/z$  ядер в цикле.

Применение сверхпроводящих магнитов позволит примерно в 4 раза увеличить энергию ускоренных ядер при размещении сверхпроводящего кольца в существующем здании синхрофазотрона и обеспечить большую длительность вывода (более 5 секунд).

Реализация этого предложения позволит обеспечить физиков, базирующихся на ОИЯИ, широким спектром пучков частиц высоких энергий: релятивистские ядра вплоть до средних и, возможно, тяжелых ядер с энергией 20 + 25 Гэв на нуклон, что позволит получать на основе кумулятивного эффекта вторичные пучки частиц с энергией значительно выше 100 Гэв, выведенный протон-

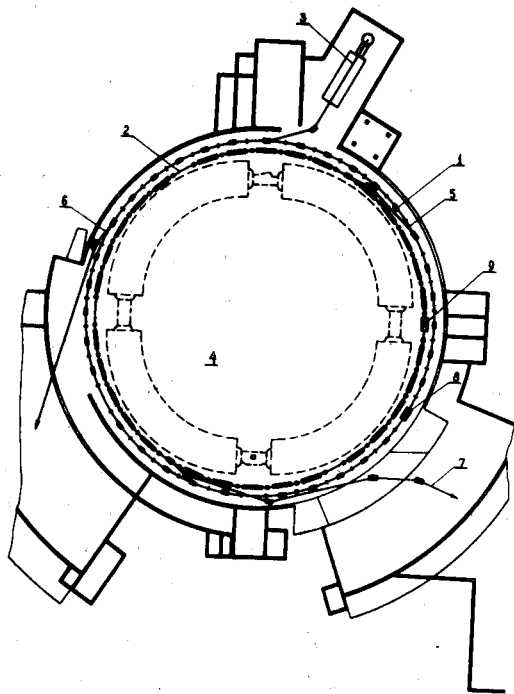


Рис. I. Схема "Нуклотрона" - криогенного ускорителя релятивистских ядер:

1. Промежуточное кольцо ускорителя (ПКУ)
2. Основное кольцо ускорителя (ОКУ)
3. Инжектор
4. Существующий синхрофазотрон
5. Система вывода пучка из ПКУ и ввода в ОКУ
6. Вывод пучка ядер из ПКУ в экспериментальный павильон № 1
7. Вывод пучка ядер из ОКУ в экспериментальный павильон № 2
- 8,9. Ускоряющие резонаторы

ный пучок с энергией до 50 Гэв, интенсивный монохроматический пучок нейтронов с регулируемой энергией и др.

Создание "Нуклотрона" потребует относительно скромных затрат, так как предлагается максимально использовать развитие существующей площадки, имеющиеся сооружения, коммуникации и аппаратуру синхрофазотрона, а также накопленный в Лаборатории опыт, традиционные направления научных и технических исследований. Как показывают оценки, затраты на сооружение такого ускорителя укладываются в рамки финансирования развития ЛВЭ.

Применение сверхпроводимости, автоматизации и других достижений современной техники обеспечит снижение и эксплуатационных расходов по сравнению с расходами на эксплуатацию существующего синхрофазотрона. Важным моментом сооружения ускорителя является освоение и развитие специалистами социалистических стран новой техники, в частности, техники сверхпроводимости, что будет способствовать повышению научно-технического потенциала социалистических стран. Особое значение имело бы такое развитие ОИЯИ, если будет принято решение о сооружении в социалистических странах ускорителя или накопителей на сверхвысокие энергии. В этом случае "Нуклотрон" мог бы служить прототипом таких ускорителей. "Нуклотрон" будет первым ускорителем, специально сооружаемым для ускорения релятивистских ядер, что обеспечит ему уникальность и высокую конкурентоспособность исследований.

В разделе I настоящего предложения описываются направления научных исследований, которые будут актуальными к моменту создания "Нуклотрона", оценивается их значимость, делаются прогнозы развития этой области физики.

В разделе II приводятся соображения по выбору параметров основных узлов предлагаемого сверхпроводящего кольцевого ускорителя "Нуклотрона".

### I. ПРОБЛЕМАТИКА ИССЛЕДОВАНИЙ НА "НУКЛОТРОНЕ"

Основу проблематики исследований на "Нуклотроне" составят эксперименты в области релятивистской ядерной физики, т.е. исследования явлений, в которых важную роль играют многобаррионные системы, движущиеся со скоростями, близкими к скорости света. В настоящее время эта область физики только зарождается, и прогнозирование ее развития может содержать некоторые неопределенности. Вместе с тем, становится все более очевидным, что решение одной из центральных проблем современной физики — проблемы построения теории сильных взаимодействий — невозможно без привлечения существенной информации о многочастичных процессах. Процессы множественного рождения частиц являются в настоящее время наиболее интенсивно изучаемыми процессами физики высоких энергий. Их экспериментальное исследование привело к пониманию важной роли масштабной инвариантности в физике элементарных частиц, что, в свою очередь, оказало и продолжает оказывать большое влияние на развитие всей квантовой теории поля. Тенденция увеличения значимости исследований процессов множественного рождения, несомненно, сохранится на многие годы, ибо эти процессы необычайно сложны и многообразны. Исследование столкновений релятивистских ядер дает возможность нетривиального подхода к многочастичным процессам.

Определение релятивистской ядерной физики как области многобаррионных явлений, задаваемой условием

$$\xi = \frac{P^2}{m^2} \gg 1,$$

где  $P^2$  — квадраты импульсов частиц, а  $m^2$  — квадраты их масс, совпадает с определением области применимости масштабной инвариантности. Применение принципа масштабной инвариантности очень сильно ограничивает возможный класс моделей и существенно упрощает задачу построения теории. Очень важными особенностями, составляющими специфику столкновений релятивистских ядер по сравнению со столкновениями частиц, являются: (1) возможность варьировать в широких пределах квантовые числа (в частности, исследование многобаррионных обменов); (2) возможность исследовать множественные процессы, когда не только в конечном, но и в начальном состоянии присутствует много частиц; (3) возможность исследования "поперечного размера" столкновения, тесно связанного с перпендикулярной проекцией импульсов вторичных частиц.

Как постановка задачи о применении масштабной инвариантности к столкновениям релятивистских ядер, так и первые эксперименты в этой области были предложены и выполнены в ЛВЭ. В настоящее время мы располагаем пучками с параметром  $\xi = 25$ , что пока не достигнуто в других лабораториях. В Беркли (США), где недавно также начаты эксперименты с релятивистскими ядрами, параметр  $\xi$  не превышает 6. Даже в нашей области энергии поправки на конечность  $\xi$  оказываются существенными и заметно маскируют эффекты проявления масштабной инвариантности.

Создание "Нуклотрона" позволит достигнуть значения параметра  $\xi \approx 0,5 \cdot 10^3$ . Кроме того, существующая вакуумная система синхрофазотрона не позволяет получить сколько-нибудь значимые интенсивности пучков ядер тяжелее неона. Для "Нуклотрона" же ограничения по зарядности и интенсивности пучков ядер будут определяться только условиями инжекции, которые получают в ЛВЭ значительное развитие до создания "Нуклотрона".

В ЛВЭ начато изучение принципиально нового явления - кумулятивного эффекта, т.е. такого столкновения релятивистских ядер, когда энергия группы нуклонов передается одной частице. Ускорение частиц, обладающих зарядом, большим единицы, в принципе, дает возможность получать энергию ускоряемых частиц (при одинаковых параметрах ускорителя) большую, чем энергия протонов, в число раз, равное кратности заряда.

На "Нуклотроне" при радиусе его, равном радиусу синхрофазотрона, можно будет получать, например, ядра кальция с энергией около 1000 Гэв. (Энергия на нуклон - 20 + 25 Гэв). Как показывают оценки кумулятивного эффекта, основанные на применении масштабной инвариантности, на "Нуклотроне" можно получить вторичные пучки частиц с энергиями, значительно превышающими 100 Гэв. Хотя изучение кумулятивного эффекта только началось и надежные оценки интенсивностей пучков вторичных частиц сделать трудно, однако уже сейчас ясно, что в этих пучках можно будет провести большую программу экспериментов в области физики высоких энергий, особенно на основе камерной методики.

Таким образом, исследование кумулятивного эффекта кроме большого принципиального значения, имеет и практическое значение - существенное повышение энергий пучков ускорителей. Помимо неупругих столкновений и процессов множественного образования частиц, большой интерес представляют задачи упругого рассеяния и бинарные реакции с релятивистскими протяженными системами. Это также совершенно открытое поле деятельности. Эти реакции представляют большой интерес с точки зрения проверок ряда моделей, используемых в теории элементарных частиц, ибо ядра могут служить реалистичной "кварковой" моделью релятивистского протяженного объекта, о котором мы многое знаем, хотя бы в нерелятивистском пределе. Причем мы можем в широких пределах варьировать структуру таких объектов, выбирая разные пучки и мишени. Область этих явлений чрезвычайно многообразна, а проблема описания структуры частиц становится все более важной, ибо уже в настоящее время в физике высоких энергий мы имеем дело с длинами волн частиц, значительно меньшими их размеров. Поэтому актуальность исследований не только сохранится, но и существенно возрастет.

Создание "Нуклотрона" позволит начать систематическое изучение нового раздела физики - гиперядерную физику и изоядерную физику. Возможность наблюдения движущихся групп барионов, особенно групп барионов, обладающих странностью, даст возможность исследовать так называемое экзотическое ядро, в том числе возбужденные состояния ядер с очень короткими временами жизни вплоть до  $10^{-23}$  сек. Как показывают оценки, при ускорении ядер среднего веса можно получить квазистабильные ядра, содержащие, помимо протонов и нейтронов, несколько лямбда-частиц.

Многие из этих явлений до создания "Нуклотрона" на существующих ускорителях вообще невозможно изучать. В частности, несмотря на значительные усилия, до сих пор фактически не обнаружено ни одно возбужденное состояние гиперядер, в то же время гиперядерная спектроскопия — одно из возможных существенно новых направлений в ядерной физике.

Пока почти совершенно нетронутой областью исследований остается получение сверхсильных электромагнитных полей, которые возникают при сближении двух зарядов большой величины, движущихся со скоростями, близкими к скорости света. Эти задачи представляют большой интерес, однако экспериментально они даже не сформулированы. Наибольший интерес здесь представляло бы изучение образования электронных или мюонных пар.

Использование ускоренных ядер имеет большое прикладное значение. Прохождение через вещество релятивистских многозарядных частиц практически не изучено. Без детального исследования процессов атомного столкновения релятивистских ядер трудно рассчитывать на прецизионные измерения явлений ядерных взаимодействий. Изучение прохождения многозарядных частиц через вещество представляет большой интерес с точки зрения проверки существующих представлений о составе и природе космического излучения, о радиационной безопасности космонавтов и космических аппаратов. (Как известно, релятивистские ядра в определенных условиях представляют в космосе наибольшую радиационную опасность).

Создание "Нуклотрона" существенно расширит как доступную область энергий релятивистских ядер, так и позволит достигнуть больших зарядностей. Для исследования космических лучей особенно

желательно было бы дойти до ускорения ядер железа, что невозможно на синхрофазотроне и, по-видимому, возможно для "Нуклотрона".

Основным мотивом для получения пучков релятивистских ядер в США была возможность исследования ряда медико-биологических проблем. Как было показано американскими физиками и биологами, пространственное распределение ионизации вдоль направления движения многозарядных ионов чрезвычайно благоприятно для решения целого ряда проблем. В настоящее время ими разработана обширная программа исследований от изучения радиационных воздействий на клетку, до облучения семенного зерна и лечения рака. Очевидно, что при формировании системы пучков "Нуклотрона" необходимо предусмотреть потребность в медико-биологических пучках как самостоятельную. Пучки "Нуклотрона" могут также иметь промышленные применения.

Наконец, помимо отмеченных выше уникальных качеств, "Нуклотрон" будет обладать всеми качествами современного протонного ускорителя на энергии 40–50 Гэв. Область энергий ниже 25 Гэв — область обильного рождения резонансов. Необходимо отметить, что сечения рождения резонансов падают, примерно, как квадрат энергии налетающей частицы и, следовательно, для этих исследований очень высокие энергии не нужны. Даже в области энергий до 10 Гэв можно предложить обширные программы исследований, которые заведомо не будут исчерпаны за ближайшие 5–7 лет и вряд ли потеряют свою исключительную актуальность. Увеличение диапазона энергий вторичных пучков частиц, имеющих в распоряжении физиков, базирующихся на ОИЯИ, до 100 Гэв и выше (на основе использования кумулятивного эффекта) позволит исследовать как резонансную область сечений,



так и предасимптотическую и асимптотическую. Существенно подчеркнуть, что уже при энергиях около 20 Гэв сечения проявляют автомодельные (самоподобные) свойства.

Таким образом, создание "Нуклотрона" фактически даст возможность перекрыть все наиболее интенсивно изучаемые области энергий. Переход же к "унитарным" энергиям (200-300 Гэв в системе центра масс), по-видимому, в настоящее время лежит далеко за пределами экономических возможностей ОИЯИ. Отметим некоторые из традиционных для ЛВЭ научных направлений в области физики элементарных частиц, которые заведомо найдут отражение в будущей проблематике исследований на "Нуклотроне".

(1) Исследование сечений бинарных реакций при предельно малых (включая случаи кулоновской интерпретации) и при больших (близких к  $180^\circ$ ) углах. Для проведения этих исследований в ЛВЭ разработаны, эксплуатируются и, несомненно, получат развитие газовые дифференциальные и пороговые черенковские счетчики оригинальных конструкций, искровые и стримерные камеры, магнитные спектрометры, искровые спектрометры с бесфильмовым съемом информации, установки с внутренними мишенями ускорителя и др. В этом классическом разделе физики сильных взаимодействий будет сделан существенный шаг в сторону прецизионных количественных измерений, увеличения исследуемых энергетических интервалов, изучения спиновых зависимостей, расширения набора частиц, включая столкновения ядро-ядро. Информация об этих реакциях всегда служила и будет служить очень критичной проверкой различных модельных подходов в теории сильных взаимодействий.

(2) Исследование многочастичных процессов на основе трековой методики (пропановая и водородная пузырьковые камеры, стримерные камеры). Многие из этих задач к моменту создания "Нуклотрона" будут исследованы лишь частично. Множественные же процессы при столкновении ядер высоких атомных номеров и высоких энергий можно будет изучать только на "Нуклотроне". К моменту создания "Нуклотрона" необходимо предусмотреть разработку более совершенного трекового прибора, специально приспособленного для исследования множественных процессов.

(3) Исследование реакций с участием гамма-квантов, в том числе регистрация некоторых чисто адронных реакций по продуктам распадов нестабильных нейтральных частиц ( $\pi^0, \eta, \rho^0, \omega^0$  и др.). Существует область явлений физики элементарных частиц - электромагнитные распады резонансов. Эта область дает необычно ценную информацию о связи электромагнитных и сильных взаимодействий. Несмотря на большое число запросов теоретиков, электромагнитные распады резонансов, за очень небольшим исключением, не изучены экспериментально. Даже такой давно известный распад, как распад нейтрального пиона на

два гамма-кванта, вызывает еще серьезные дискуссии; из двенадцати распадов типа векторный мезон-псевдоскалярный мезон + фотон изучены только два, а для остальных имеются лишь очень грубые оценки. В течение последних десяти лет опубликованы сотни работ, в которых показана удивительная критичность существующих теоретических моделей (модель составных частиц, алгебра токов, векторная доминантность, эффективные лагранжианы и др.) к вероятностям их распадов. Не подлежит сомнению, что основная масса электромагнитных распадов резонансов (а их можно указать сотни) за время до создания "Нуклотрона" не будет изучена.

Особое внимание будет уделяться исследованию реакций с векторными мезонами и их специфике взаимодействий с электромагнитным полем. В этой области у ЛВЭ имеется большой опыт работы и хороший задел методик.

Любой процесс распада с испусканием заряженных частиц сопровождается излучением фотонов, а в ряде случаев и электрон-позитронных пар. Особый интерес представляют процессы слабого взаимодействия, идущие с испусканием фотонов. Большинство таких процессов также не изучено. Создание установок ядерной электроники, рассчитанных на исследование корреляций фотонов и заряженных частиц, фактически только начинается. Со стороны теоретиков имеется целый ряд предложений по изучению электромагнитных характеристик нестабильных частиц на основе измерения переходов с испусканием фотонов и электрон-позитронных пар.

Продолжает оставаться актуальной проверка гипотезы о нарушении CP-инвариантности в электромагнитных взаимодействиях

адронов. Процессы, в которых одновременно проявляются как слабые, так и электромагнитные взаимодействия, представляют собой очень важную, но малоизученную область физики.

Приведенные выше направления, конечно, не исчерпывают будущей проблематики исследований на "Нуклотроне", они скорее являются иллюстрацией того, что одновременно с выходом в совершенно новую область исследований - в релятивистскую ядерную физику, с созданием "Нуклотрона" ОИЯИ получит вполне современную ускорительную базу в области высоких энергий. Эта база позволит полностью обеспечить потребности физиков, ориентированных на ОИЯИ, широким спектром пучков частиц. Следует также отметить, что специфика сверхпроводящего ускорителя обеспечивает очень хорошие пространственно-временные характеристики пучков. Последнее особенно касается такого параметра, как большая временная растяжка пучка, недостижимая для существующих ускорителей.

## II. СОБРАЖЕНИЯ ПО ОСНОВНЫМ УЗЛАМ "НУКЛОТРОНА"

### § I. О ПРИМЕНЕНИИ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МАГНИТОВ С ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ В КОЛЬЦЕВЫХ УСКОРИТЕЛЯХ

Во многих лабораториях, работающих в области физики высоких энергий, разрабатываются проекты сверхпроводящих ускорителей на высокие и сверхвысокие энергии. В СССР разработка сверхпроводящих малоапертурных (кибернетических) ускорителей /IO, II/ явилась продолжением работ по проектированию и экспериментальному исследованию малоапертурных

кибернетических ускорителей, с железным электромагнитом /12, 13, 14/.

В связи с большой дороговизной сверхпроводящих материалов применение вакуумной камеры с малой апертурой и, следовательно, необходимость автоматического регулирования смещений орбиты, оказались особенно важными для сверхпроводящих ускорителей на сверхвысокие энергии. Эти концепции используются в проектах всех сверхпроводящих ускорителей, разрабатываемых в СССР, США и Западной Европе.

В настоящее время ряд проектов новых ускорителей предусматривает применение сверхпроводящих магнитов.

В Англии рассмотрен вопрос о модернизации ускорителя "Нимрод" с переводом его на сверхпроводимость и увеличением энергии с 7 Гэв до 25-30 Гэв с последующим использованием его в качестве бустера для ускорителя на 150-200 Гэв /15/. Аналогичный проект имеется во Франции по реконструкции ускорителя "Сатурн" с увеличением энергии с 3 Гэв до 15 Гэв /16/. В настоящее время успешно работает Группа по разработке Европейского сверхпроводящего ускорителя на сверхвысокую энергию в ЦЕРНе, в которую вошли ученые Англии, Франции и ФРГ /17/. В США ученые Национальной ускорительной лаборатории в Батавии намерены поднять энергию существующего ускорителя (400 Гэв) с помощью применения сверхпроводящих магнитов до 1000 Гэв /18, 19/. Разработан проект сверхпроводящего ускорителя на энергию 100-150 Гэв /20/, а также проект накопительных колец /21/ в Брук-хейвенской лаборатории. Параметры некоторых проектируемых кольцевых сверхпроводящих ускорителей приведены в таблице I. Ожидается, что сверхпроводящие ускорители будут дешевле по капитальным затратам и потребуют меньших эксплуатационных расходов по сравнению с обычными ускорителями на те же энер-

ТАБЛИЦА I

ПАРАМЕТРЫ НЕКОТОРЫХ ПРОЕКТИРУЕМЫХ КОЛЬЦЕВЫХ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ УСКОРИТЕЛЕЙ /11, 15, 16, 17, 18, 19/

| Ускоритель                    | СССР                           | С Е Р И И I I                  |                               | Nimrod<br>Резерфорд-<br>ская лаборат.<br>(Англия) | NAL<br>Батавия<br>(США) | Saturne<br>Сакле<br>(Франция) |
|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|---|-------------------------|-------------------------------|
|                               |                                | 1-я стадия                     | 2-я стадия                    |   |                         |                               |
| Энергия ускорителя (Гэв)      | 2000                           | 500                            | 1000                          | 30  | 1000                    | 15                            |
| Энергия инжектора (Гэв)       | 70                             | 10                             | 10                            | $50 \cdot 10^{-3}$                                | $2000 \cdot 10^{-3}$    | $20 \cdot 10^{-3}$            |
| Поле дипольных магнитов (Г)   | 4,5                            | 4,5                            | 4,5                           | 6   | 4,5                     | 6                             |
| Апертура диполей (мм)         | 60                             | 100 - 110                      | 100 - 110                     | 80  | 50                      | 100                           |
| Цикл ускорителей (сек.)       | 100                            | II                             | 22                            | -   | 30                      | 2                             |
| Интенсивность                 | $4 \cdot 10^{14}$<br>прот/цикл | $9 \cdot 10^{11}$<br>прот/сек. | $4 \cdot 10^{11}$<br>прот/сек | $10^{13}$<br>прот/цикл                            | -                       | -                             |
| Мощность (кВт) рефрижераторов | 50<br>при 4,2 К                | 22-45<br>при 4 К               | 45-90<br>при 4 К              | -   | -                       | 1,8<br>при 4,2 К              |
| Радиус кольца ускорителя      | $1,9 \cdot 10^3$               | $1,1 \cdot 10^3$               | $1,1 \cdot 10^3$              | 28  | $10^3$                  | $22,6$                        |

гни и интенсивности. Возможность разработки сверхпроводящих импульсных ускорителей приобрела реальный характер, главным образом, благодаря крупным успехам последних лет в создании сверхпроводящих кабелей. В таких кабелях для уменьшения динамических потерь ниобий-титановые сверхпроводники протягиваются в медной матрице до нитей толщиной 2-10 мкм и закручиваются с шагом 2-5 мм. При больших скоростях изменения тока медная матрица содержит, кроме того, медно-никелевые перегородки (рис. 2). Отдельные жилы собираются в транспонированный плетеный или витой кабель. Такой кабель обычно формируется для придания ему прямоугольной либо плоской формы (рис. 3).

Пульсирующие сверхпроводящие магниты для синхротронов создаются в различных лабораториях мира с 1967 года. Наиболее продвинута эта работа в лабораториях, входящих в Группу по созданию Европейского сверхпроводящего синхротрона, а также в Брукгейвской и Лоуренсовской радиационной лаборатории (США). Так, значительным достижением Резерфордской лаборатории (Англия) явилось изготовление и успешное испытание в 1972 году двух сверхпроводящих диполей АС3 и АС4. Магнит АС4 /22/ с внутренним диаметром обмотки 90 мм и длиной 0,72 м при испытаниях достиг расчетного поля 4,5 Т, работая в импульсном режиме с длительностью цикла 4 сек. (при времени нарастания 2 сек.). Магнит генерирует поле с неоднородностью  $\sim 10^{-3}$ . Намечен ряд мер, которые позволят улучшить однородность поля при изготовлении следующих магнитов типа АС5, длина каждого из которых будет составлять 1,8 м.

Центр ядерных исследований в Сакле (Франция) сосредоточил усилия на создании магнитов с более высоким значением поля,

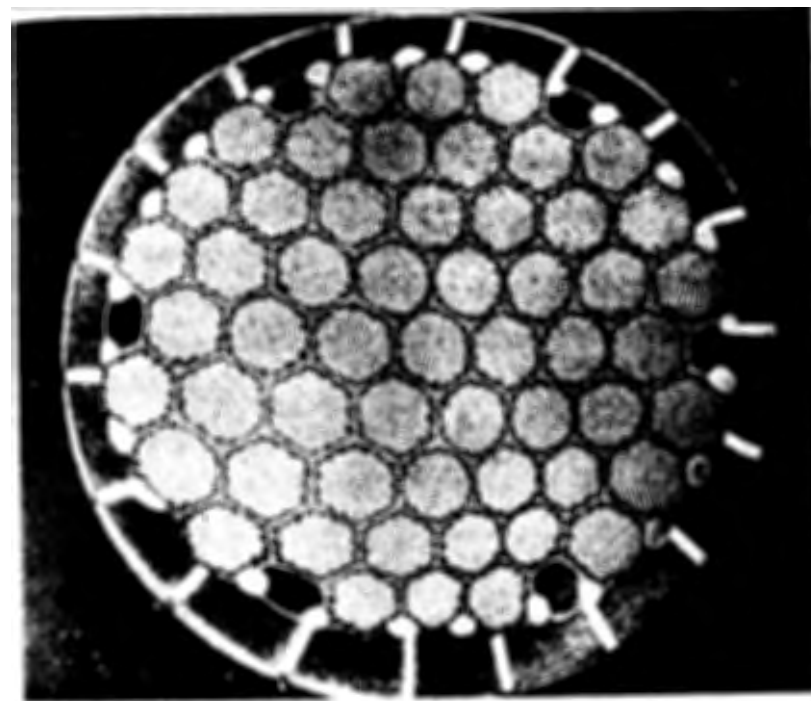


Рис.2. Сечение стренды (жилы) проводника с NbTi -нитеями. Диаметр стренды - 1 мм; число нитей - 13255; диаметр нитей - 5мкм; матрица - Cu и Cu Ni ; рабочий ток - 470 А при 5Т.



Рис. 3. Сверхпроводящая "коса" из NbTi ; число стренд-25; диаметр стренды - 0,3 мм; число нитей в стренде - 380; диаметр нитей - 10 мкм, матрица - Си , рабочий ток - 1400 А при 5Т.

достигающим 6Т, но для более длительного времени подъема поля (цикл 20-60 сек.) /17/.

Магниты, разрабатываемые Институтом экспериментальной ядерной физики в Карлсруе, отличаются большей длиной (до 2,3м) /17/. Значительное число сверхпроводящих магнитов с различными параметрами создано в США в Брукхейвенской лаборатории, в Батавии, в Лоуренсовской и Аргоннской лабораториях.

В Советском Союзе разработка сверхпроводящих магнитов с переменным полем на протяжении ряда лет ведется в Радиотехническом институте АН СССР, где в 1972 году был успешно испытан импульсный диполь на поле 4Т /23/. Диполь работал без деградации тока со скоростью роста поля до 0,4Т/сек. Ведется разработка сверхпроводящих магнитов для ускорителей в Научно-исследовательском институте электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова. Начаты работы по созданию сверхпроводящих отклоняющих магнитов в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ (Дубна).

Характеристики некоторых магнитов, созданных и проектируемых в последние годы, представлены в таблице II.

На рис. 4 изображен один из создаваемых в Карлсруе магнитов.

Таблица II

ИМПУЛЬСНЫЕ МАГНИТЫ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫЕ ДЛЯ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ  
СИНХРОТРОНОВ /23,31/

| Лаборатория,<br>страна | Внутренний<br>размер об-<br>мотки, см | Длина,<br>см | Поле,<br>Т | Запасен-<br>ная<br>энергия<br>К Дж | Железный<br>экран | Минималь-<br>ное время<br>на раст.<br>поля сек. | Дата<br>испыт.<br>год | Харак-<br>тер<br>поля | Примечание -   |
|------------------------|---------------------------------------|--------------|------------|------------------------------------|-------------------|---|-----------------------|-----------------------|--|
| I                      | 2                                     | 3            | 4          | 5                                  | 6                 | 7   | 8                     | 9                     | 10   |
| РТИ АН                 |                                       |              |            |                                    |                   |   |                       |                       |  |
| СССР                   | 7,8                                   | 65           | 4          | 50                                 | нет               | 10  | 1972                  | теплое                | СПД-3  |
| ENL                    | 5                                     | 35           | 4,1        | 6                                  | есть              | 50-100  | 1972                  | холод-<br>ное         | Испытаны 10<br>диполей с<br>разными про-<br>водниками<br>2 идентичных<br>магнита в<br>программе<br>"Изабелла"<br>Прототипы<br>"Изабеллы",<br>метал. про-<br>питка кабеля |
| США                    | 8                                     | 90           | (4,0)      | (38)                               | есть              | 50-100  | 1973                  | холод-<br>ное         |  |
|                        | 8                                     | 290          | (4,0)      | (~120)                             | есть              | 50-100  | (1974)                | теплое                |  |
| Карлсруэ,<br>ФРГ       | 4 x 8                                 | 40           | 4,0        | -                                  | есть              | 10-20   | 1973                  | холод-<br>ное         | Отогнутые кон-<br>цы, пропитка<br>припоем Jn Sn. D T<br>См 0 -распре-<br>деление тока,<br>пропитка при-<br>поем Jn Sn. D 2a  |
|                        | 8                                     | 140          | (4,5)      | (128)                              | есть              | 10-20   | 1973                  | -                     |  |

|                           | 2       | 3         | 4       | 5         | 6                             | 7    | 8               | 9                         | 10  |
|---------------------------|---------|-----------|---------|-----------|-------------------------------|------|-----------------|---------------------------|---|
|                           | 8       | (140-280) | (4,5)   | (150+300) | есть                          | 5-10 | (1974)          | теплое                    | Диполи Д2Б-Д3<br>в стадии проек-<br>тирования                   |
| США,<br>L R A             | 7,5     | 40        | 3,9     | 22        | есть                          | 0,5  | 1972            | холод-<br>ное             | 8 диполей ис-<br>пытаны при<br>последователь-<br>ном соединении |
|                           | 7,5     | 40        | (4,5)   | 29        | есть                          | 0,5  | 1973            | холод-<br>ное             | 2 идентичных<br>диполя для<br>испытания на<br>однородность      |
|                           | (10-14) | (100-200) | (4,5)   | (100)     | есть хо-<br>лодн. и<br>теплый | 0,5  | (1973-<br>1974) | теплое                    | В стадии про-<br>ектирования                                    |
| Батавия,<br>США,<br>N A L | 5       | 90        | 2,7     | 20        | нет                           | >30  | 1972-<br>1973   | холод-<br>ное             | Программа дуб-<br>лера  |
|                           | 3,8     | 30        | 3,0     | 6         | нет                           | >30  | 1972-<br>1973   | холод-<br>ное             |   |
|                           | 5,5     | 90        | (40-45) | (20-40)   | есть                          | ~30  | (1973)          | теплое<br>(холод-<br>ное) | 4 магнита в<br>группе   |
|                           | 5,5     | 600       | (4,5)   | (180)     | есть                          | ~30  | (1973)          | теплое<br>(холод-<br>ное) | 1 магнит в<br>группе  |

|                   | 2      | 3         | 4     | 5      | 6    | 7    | 8               | 9                         | 10                      |
|-------------------|--------|-----------|-------|--------|------|------|-----------------|---------------------------|-------------------------|
|                   | 5,5    | 600       | (4,5) | (180)  | есть | ~ 30 | (1974)          | теплое<br>(холод-<br>ное) | 10 магнитов в<br>группе |
| Англия,           | 10     | -         | 3,9   | 58     | -    | -    | -               | -                         | -                       |
| RHEL              | 8      | 40        | 4,5   | -      | нет  | I    | 1971-<br>1972   | холодное                  | АСЗ                     |
|                   | 9      | 50        | 5,0   | 82     | есть | I    | 1972            | холодное                  | АС4                     |
|                   | (9-10) | (100-200) | (4,5) | >150   | есть | I    | (1973-<br>1974) | теплое                    | АС5                     |
| Сакле,<br>Франция | 10     | 50        | (6,0) | (280)  | есть | 5-20 | 1973            | теплое                    | МОВУ                    |
|                   | II     | 150       | (5,0) | (~700) | есть | 5-20 | (1973-<br>1974) | теплое                    | АЛЕС                    |

\* ) Предполагаемые характеристики заключены в скобки.

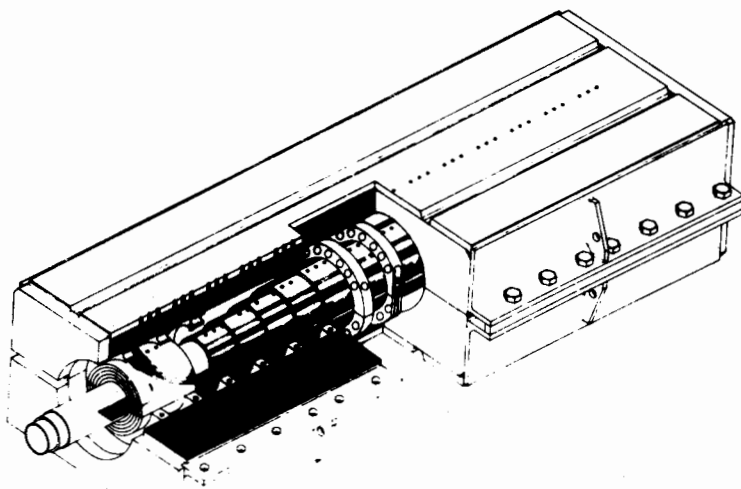


Рис. 4. Аксометрия дипольного сверхпроводящего магнита Д2а Института экспериментальной ядерной физики (Карлсруе, ФРГ). (Характеристики в таблице II).

## § 2. Основное сверхпроводящее кольцо ускорителя

Создание кабелей, содержащих большое число тонкожильных сверхпроводящих твистированных жил из сплава NbTi, позволило начать разработку сверхпроводящих магнитов, способных формировать изменяющееся во времени магнитное поле. С помощью такого рода кабелей удалось преодолеть трудности, связанные с тепловыми потерями в сверхпроводнике из-за работы на переменном токе при длительности цикла ускорителя, большей нескольких секунд.

Ниже будут сделаны оценки относительно требуемого количества сверхпроводящего материала, число магнитов и квадрупольных линз, которые показывают сравнительно скромный объем изготовления магнитной системы ускорителя с учетом даже необходимости изготовления криостатов, подводющих гелий трубопроводов и установки нескольких рефрижераторов.

Реализуемость сверхпроводящего ускорителя существенно зависит от необходимого для электромагнита количества сверхпроводника, определяемого длиной электромагнита и его поперечным сечением.

В 1961 году группа советских специалистов предложила для уменьшения апертуры вакуумной камеры и, следовательно, для уменьшения поперечного сечения магнита применять методы автоматического регулирования положения орбиты ускоряемых частиц путем измерения отклонений орбиты и коррекции параметров магнитной системы, определяющей бетатронное движение частиц. Эти кибернетические методы уменьшения поперечных размеров ускорителя были проверены в конце 60-х годов на специально созданной в Радиотехническом институте АН СССР модели киберне-

тического ускорителя и использованы в проекте кибернетического ускорителя на энергию 1000 Гэв и в предложениях по созданию сверхпроводящего кибернетического ускорителя на энергию в несколько тысяч Гэв.

Ускорительный комплекс "Нуклотрон" для ЛВЭ ОИЯИ, призванный заменить существующий синхрофазотрон на энергию 10 Гэв при максимальном использовании существующего оборудования, представляется целесообразным выполнить в виде основного сверхпроводящего кольца на энергии  $20 + 25$  Гэв на нуклон (около 45 Гэв при ускорении протонов), промежуточного кольца на энергию 0,75 Гэв на нуклон и существующего линейного ускорителя, приспособленного для ускорения ядер до энергии 10 Мэв на нуклон. Использование промежуточного кольца позволит улучшить параметры и уменьшить стоимость всего комплекса за счет ослабления требований к основному сверхпроводящему кольцу в связи с увеличением магнитного поля в момент инжекции. Кроме того, увеличение предела по объемному заряду при повышении энергии инжекции позволит уменьшить апертуру сверхпроводящего электромагнита при одновременном увеличении числа ускоряемых ядер. Возможен также вариант, при котором осуществляется непосредственная инжекция в основное кольцо ускорителя из линейного ускорителя на большую энергию ( $\sim 100$  Мэв на нуклон). Этот вариант требует, однако, осуществления специальных мер по снижению замороженных токов в сверхпроводящих магнитах, сильно влияющих при малых магнитных полях, а также реконструкции существующего линейного ускорителя.

Основное кольцо ускорителя представляет из себя жестко-фокусирующий сверхпроводящий ускоритель с системой автоматичес-



кого управления параметрами орбиты. Высокочастотная система и система инъекции должны обеспечивать возможность ускорения ядер и протонов. Здесь мы приведем только оценку параметров ускорителя и, в особенности, сверхпроводящего магнита, имея в виду проблему реализуемости ускорителя. Разумеется, точный, оптимизированный расчет ускорителя и его систем должен быть произведен позднее с учетом детальных условий организации экспериментов (расположение каналов, вывода пучка, детекторов и т.д.).

#### 1. Величина конечной напряженности поля в сверхпроводящем электромагните и энергия ускорителя

С ростом напряженности магнитного поля сверхпроводящего электромагнита (при фиксированной конечной энергии), увеличиваются затраты на электромагнит и на систему охлаждения электромагнита, но уменьшаются затраты на сооружение туннеля (в связи с уменьшением размеров туннеля или здания), на высокочастотную систему, на вакуумную систему и т.д. Оптимальная величина напряженности магнитного поля оказывается в районе 4Т. В том случае, однако, когда речь идет о сооружении сверхпроводящего ускорителя в уже имеющемся здании, оптимальная напряженность магнитного поля сдвигается в сторону больших напряженностей и ограничивается в настоящее время величиной 6Т, при которой конструктивные трудности, связанные с механическими усилиями в обмотке, еще преодолимы, а допустимая плотность тока в сверхпроводнике сравнительно высока.

Таким образом, длина сверхпроводящего магнита для конечной энергии (20 + 25 Гэв на нуклон) при максимальной напряженности поля в 6Т оказывается равной  $\sim 154$  м (радиус орбиты в магнитах

25 м). Так как имеющийся туннель позволяет иметь средний радиус ускорителя 39 м, то поворотные магниты должны занимать 63% от периметра. Остальная часть будет занята квадрупольными линзами фокусирующей пучок системы, ускоряющими элементами, устройствами наблюдения за пучком, корректирующими элементами, устройствами ввода и вывода, концевыми элементами обмоток магнитов, криостатов и т.д.

#### 2. Фокусирующая магнитная структура, величина смещений орбиты частиц от оси камеры и необходимая апертура вакуумной камеры

С точки зрения удобства размещения элементов систем ввода и вывода, а также с точки зрения упрощения конструкции электромагнита целесообразно принять магнитную структуру с разделенными функциями, в которой функции поворота частиц и их фокусировки выполняются соответственно дипольными магнитами с однородным полем и квадрупольными. Сверхпроводящий магнитный блок основного кольца ускорителя представлен на рис. 5.

Ниже в таблице III приведены основные параметры структуры.

ТАБЛИЦА Ш

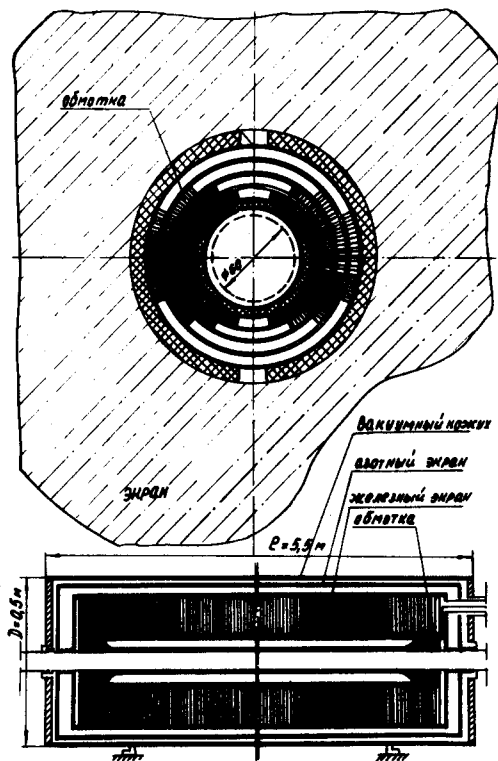


Рис.5. Сверхпроводящий магнитный блок основного кольца ускорителя.

| № пп | Параметр  | Обозначение | Величина      | Примечание                      |
|------|---|-------------|---------------|---------------------------------|
| 1    | 2   | 3           | 4             | 5                               |
| 1.   | Число периодов структуры  |             | 18            |                                 |
| 2.   | Число суперпериодов   |             | 6             |                                 |
| 3.   | Число бетатронных колебаний на оборот                                   | $\nu$       | 4,75          |                                 |
| 4.   | Фокусирующая структура  | ФДО         |               |                                 |
| 5.   | Число нормальных периодов в суперпериоде                                |             | 2 + I         | с выброшен. поворотным магнитом |
| 6.   | Число поворотных магнитов в суперпериоде                                |             | 5             |                                 |
| 7.   | Общее число поворотных магнитов   |             | 30            |                                 |
| 8.   | Общее число квадрупольных линз  |             | 36            |                                 |
| 9.   | Набег фазы на магнитном периоде   |             | 95°           |                                 |
| 10.  | Длина поворотного магнита   |             | 5,3 м         |                                 |
| 11.  | Длина квадрупольной линзы   |             | 0,5 м         |                                 |
| 12.  | Максимальная напряженность магнитного поля в зазоре поворотного магнита | $B_m$       | 6 Т           |                                 |
| 13.  | Напряженность магнитного поля при инжекции ( $T_i = 0,75$ Гэв/нук)      | $B_i$       | 0,3 Т         |                                 |
| 14.  | Средний радиус  |             | 39 м          |                                 |
| 15.  | Радиус орбиты поворотных магнитов                                       |             | 25 м          |                                 |
| 16.  | Энергия эжекции   | $T_e$       | 25 Гэв/нук.   |                                 |
| 17.  | Энергия инжекции  | $T_i$       | 0,75 Гэв/нук. |                                 |

| 1  | 2            | 3 | 4                  | 5 |
|--|--------------|---|--------------------|---|
| 18. Время инжекции   | $\Delta t_i$ |   | I + 3 сек.         |   |
| 19. Время ускорения  | $t_y$        |   | 5сек               |   |
| 20. Длительность спада напряжения магнитного поля                          |              |   | 5 сек              |   |
| 21. Длительность цикла соответственно при длительности плато 0 сек и 5 сек |              |   | I3 сек<br>и I8 сек |   |
| 22. Величина запасенной энергии в магните                                  |              |   | 60 МДж             |   |
| 23. Ток электромагнита   |              |   | 2,5ка              |   |
| 24. Напряжение на одном блоке во время ускорения                           |              |   | 300в               |   |
| 25. Пиковая мощность системы электропитания магнита                        | $P$          |   | 20Мвт.             |   |

Величины, определяющие апертуру магнита

|   |  |        |
|---|--|--------|
| 1. Амплитуда бетатронных колебаний при инжекции, соответствующая эмиттансу инжектируемого пучка 6,0 см.мрад |  | I,5    |
| 2. Величина (нескорректированная) смещения равновесной орбиты   |  | 0,3 см |
| 3. Амплитуда синхротронных колебаний  |  | 0,3 см |
| 4. Прирост энергии за оборот  |  | 7,3кэв |
| 5. Отклонения по импульсу из-за синхротронных колебаний   |  | 0,15%  |
| 6. Апертура, необходимая с учетом бетатронных и синхротронных колебаний пучка                               |  | 5 см   |
| 7. Полная апертура (с учетом вывода)  |  | 6 см   |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|
|---|---|---|---|---|

Ориентировочные величины, характеризующие сверхпроводящий магнит

|   |  |  |                        |
|---|--|--|------------------------|
| 1. Плотность тока в сверхпроводящем кабеле при $B = 6T$   |  |  | $10^5 \text{ а/см}^2$  |
| 2. Вес сверхпроводящего кабеля на I магнит при внутреннем радиусе обмотки магнита $r = 4,25 \text{ см}$ . Вес сверхпроводника на I магнит |  |  | $\sim 80 \text{ кг}$ . |
| 3. Вес сверхпроводящего кабеля на весь электромагнит  |  |  | $\sim 6 \text{ тн}$ .  |
| 4. Вес сверхпроводника на весь магнит   |  |  | $\sim 2 \text{ тн}$ .  |

На рис. 6 представлена структура суперпериода (6а-для основного кольца, 6б - для промежуточного). Магнитный цикл основного и промежуточного колец ускорителя представлен на рис.7.

### § 3. Инжектор

Инжектор ядер предполагается выполнить в виде линейного ускорителя с энергией пучка на выходе  $T_i = 10$  Мэв/нуклон. Для получения полностью ионизованных ядер будет использоваться электронно-лучевой источник /27/, спроектированный для ускорения ядер на синхрофазотроне ОИЯИ. Этот источник, который в настоящее время находится в стадии наладки, имеет следующие основные параметры:

- 1) отношение заряда к массе  $Z/A = 0,5$ ;
- 2) число ядер в цикле  $N_0 = 2 \cdot 10^{12}/Z$ ;
- 3) время вывода частиц из источника  $\Delta t_i = 10 + 40$  мксек.

Электронно-лучевой источник будет установлен на высоковольтном конце ускорительной трубки фаринжектора с ускоряющим потенциалом 570 кВ. Рассматривается также вариант ускорения в инжекторе не полностью ионизованных ядер с  $Z/A = 0,2 + 0,3$ , получаемых с помощью обычного плазменного источника, с последующей их обдиркой на выходе из инжектора до  $Z/A = 0,5$ . Не исключается возможность применения лазерного источника ядер /28/.

Резонатор линейного ускорителя возбуждается на волне  $E_{010}$ . На оси его расположен 84 трубки дрейфа. Длина резонатора 14,5 м, диаметр 1,4 м, добротность 50.000, резонансная частота 144 мгц, подводимая мощность  $2,5 + 3,5$  Мвт. Для создания поперечной устойчивости ускоряемого пучка предполагается в первых пяти трубках дрейфа осуществить комбинацию магнитной квадрупольной и сеточной фокусировки, в остальных - фокусировку магнитными квадруполями.

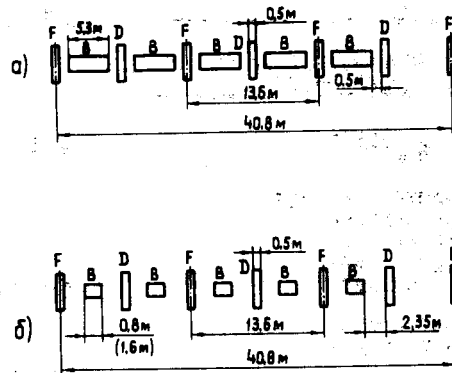


Рис. 6. Структура суперпериода магнитной системы основного и промежуточного колец ускорителя.

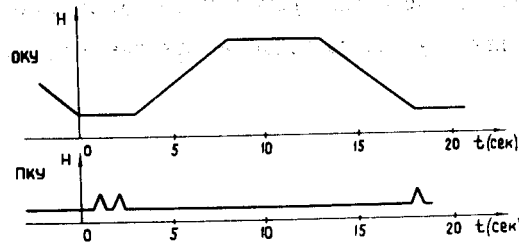


Рис. 7. Магнитный цикл основного и промежуточного колец ускорителя.

Основные параметры пучка инжектора:

1) выходная энергия  $T_i = 10$  Мэв/нуклон;

2) число инжектируемых ядер в цикле  $N = 10^{12}/Z$ ;

3) эмиттанс пучка  $E_i = 5,5$  см.мрад.;

4) Ширина энергетического спектра

$$\frac{\Delta T_i}{T_i} 100 = 0,3\%;$$

5) длительность импульса тока

$$\Delta t_i = 10 + 40 \text{ мксек.};$$

6) частота следования циклов

$$F_i = 0,1 + 2 \text{ гц.}$$

Выбор параметров инжектора определяется возможностью создания его на базе существующего ускорителя ЛУ-20 /29/, если использовать для этой цели имеющийся резонатор, систему высокочастотного питания, импульсный трансформатор и ускорительную трубку на 570 кв, систему транспортировки пучка и другие элементы комплекса ЛУ-20.

При ускорении протонов предполагается использовать имеющийся инжектор ЛУ-9М /30/, обеспечивающий на выходе пучок протонов с энергией 9,4 Мэв при токе  $15 + 20$  мА.

#### § 4. Промежуточное кольцо ускорителя

При реализации основной сверхпроводящей системы ускорителя целесообразно производить инжекцию в нее при сравнительно большой напряженности магнитного поля. Это позволяет снизить до необходимого уровня влияние остаточных полей, "замороженных" в сверхпроводнике, а также влияние объемного заряда, что весьма существенно при создании ускорительного комплекса

со значительной интенсивностью. Для решения этих проблем необходимо промежуточное кольцо ускорителя (ПКУ), оптимальное значение энергии которого лежит в пределах  $0,5 + 0,75$  Гэв/нуклон.

Целесообразно принять периметр ПКУ равным периметру основного кольца. При этом можно использовать готовое здание с имеющимися коммуникациями. Такое увеличение периметра приведет к существенному увеличению времени инжекции в ПКУ, а следовательно, повышению числа инжектируемых в него частиц. Кроме того, такое решение позволяет упростить ввод и вывод частиц из ПКУ.

Аксептанс основного кольца ускорителя, составляющий 6,6 см.мрад, определяет апертуру камеры ПКУ. Эмиттанс пучка после инжекции в ПКУ с учетом затухания в процессе ускорения, а также увеличения его эффективного значения при переводе из одного ускорителя в другой должен составлять не более 40 см.мрад (импульс частиц при ускорении в ПКУ изменяется в 11,6 раза). Это соответствует сечению пучка  $75 \times 50 \text{ мм}^2$ , что дает полную апертуру вакуумной камеры  $150 \times 100 \text{ мм}^2$ . В этом случае предельная интенсивность ядер с отношением заряда к массе  $Z/A = 1/2$  при радиусе ПКУ = 39м, энергии инжекции  $T_i = 10$  Мэв/нуклон, частоте бетатронных колебаний  $\nu = 4,75$  и допустимом изменении частоты  $\Delta \nu = 0,08$  составит  $N = 5 \cdot 10^{11}/Z$  ядер/цикл.

Накопление пучка ядер в основном кольце предполагается осуществить в продольном направлении. Тогда, учитывая адiabатическое затухание по фазам при ускорении в ПКУ, в рассматриваемом случае в основное кольцо можно инжектировать два сгустка. Таким образом, число частиц, ускоряемых в основном кольце, составит  $N = 10^{12}/Z$  ядер/цикл.

В дальнейшем могут быть рассмотрены два варианта исполнения магнита ПКУ: "теплый" и с использованием сверхпроводящих обмоток. Выбор оптимального варианта должен быть сделан с учетом всего комплекса требований к ПКУ и возможностей его скорейшей реализации.

При работе ПКУ с частотой 2 Гц (допустимая частота посылок инжектора) его интенсивность составит примерно  $10^{12}/\text{з}$  ядер/сек., из которых свыше 90% могут быть использованы для экспериментов на средних энергиях. Возможно также использовать ПКУ в качестве инжектора ядер в существующий синхрофазотрон. Предполагается осуществить 3-х + 4-х оборотную инжекцию в ПКУ, при этом время инжекции составит примерно 15 мксек.

Вопросы ввода и вывода в настоящее время разработаны достаточно полно. При выводе пучка из основного кольца ускорителя может быть использован опыт создания на синхрофазотроне ЛВЭ высокоэффективных резонансных выводных систем. Для вывода пучка из промежуточного кольца целесообразно также применить системы, аналогичные применяемым на Серпуховском ускорителе.

Магнитная структура ПКУ аналогична структуре основного кольца (с разделенными функциями), однако поворотными магнитами предполагается занять всего лишь примерно 20% периметра кольца, что позволяет поднять напряженность магнитного поля при инжекции до 0,86 кгс. Ориентировочные параметры ПКУ приведены в таблице IV.

ТАБЛИЦА IV

Ориентировочные параметры  
промежуточного кольца ускорителя

| № п/п | Параметр   | Обозначения | Величина | Примечание                          |
|-------|--|-------------|----------|-------------------------------------|
| 1     | 2  | 3           | 4        | 5                                   |
| 1.    | Число периодов фокусирующей структуры                            |             | 18       |                                     |
| 2.    | Число суперпериодов  |             | 6        |                                     |
| 3.    | Структура фокусирующей системы                                   | ФОДО        |          |                                     |
| 4.    | Частота бетатронных колебаний                                    | ✓           | 4,75     |                                     |
| 5.    | Число периодов в суперпериоде                                    |             | 2 + 1    | с выброшенным поворотным магнитом   |
| 6.    | Число поворотных магнитов в суперпериоде                         |             | 5        |                                     |
| 7.    | Число квадруполь в суперпериоде                                  |             | 6        |                                     |
| 8.    | Общее число поворотных магнитов                                  |             | 30       |                                     |
| 9.    | Общее число квадруполь   |             | 36       |                                     |
| 10.   | Максимальная напряженность магнитного поля в поворотных магнитах | $B_m$       | 1 Т      | 2Т для сверхпроводящего варианта    |
| 11.   | Напряженность магнитного поля при инжекции                       | $B_i$       | 0,086Т   |                                     |
| 12.   | Длина поворотного магнита  |             | 1,6 м    | 0,8 м для сверхпроводящего варианта |
| 13.   | Длина квадрупольной линзы  |             | 0,5 м    |                                     |

| 1   | 2   | 3            | 4   | 5 |
|-----|---|--------------|---|---|
| 14. | Амплитуда бетатронных колебаний, соответствующая эмиттансу 40 см. мрад. |              | 3,75 см                                       |   |
| 15. | Амплитуда синхротронных колебаний                                       |              | 2 см  |   |
| 16. | Длительность цикла ускорения  | $t_u$        | 0,5сек.                                       |   |
| 17. | Апертура вакуумной камеры   | $a \times b$ | $15 \times 10 \text{ см}^2$                   |   |
| 18. | Давление в вакуумной камере   |              | $10^{-7} \text{ тор}$ , $10^{-8} \text{ тор}$ |   |
| 19. | Время инжекции  | $\Delta t_i$ | 15 мксек                                      |   |
| 20. | Предельная интенсивность  |              | $10^{12} / z$<br>ядер в сек.                  |   |

#### § 5. Криогенные системы

Современные сверхпроводники (СП) для получения высоких плотностей тока нуждаются в термостатировании при температуре кипения жидкого гелия. Теплопритоки на уровень температур жидкого гелия обычно разделяют на следующие три вида:

- динамические тепловыделения в проводнике, в железном экране и в оболочках криостата;
- статический теплоприток из окружающей среды через теплоизоляцию и мосты в криостатах и трубопроводах;
- теплоприток по тоководам.

Первые два вида теплопритоков оценивались расчётно и экспериментально. Для условий работы нуклотрона наиболее подходят средние данные по ускорителю /17,24/ - около 13вт/м

для апертуры 100 мм и поля 4,5 Т. Надо отметить, что приводимые в разных публикациях данные имеют разброс в 2-3 раза от 10 до 26 вт/м применительно к нашим условиям. При суммарной длине СП магнитов обоих колец ускорителя около 230 м (здесь рассматривается сверхпроводящий вариант ПКУ) теплопритоки в магнитах приблизительно равны 3000 вт. Число тоководов определяется выбранной системой питания и эвакуации энергии из магнитов. Для того чтобы предотвратить серьёзную аварию при переходах в нормальное состояние одного из магнитов (недопустимо высокое напряжение и повышение температуры), а также для скорейшего восстановления рабочего режима, кольцо ускорителя следует разбить на ряд секций, каждая из которых имеет самостоятельную систему электропитания и защиты и автономную систему охлаждения. Целесообразно промежуточное и основное кольца ускорителя разбить на 6 секций, соответствующих 6 суперпериодам при полном рабочем токе в обмотке 2,5 кА и удельном теплоотводе по охлаждаемым тоководам 1 вт/кА. Общий теплоприток по тоководам составит не более 60 вт. Тоководы охлаждаются испаряющимся гелием. Поэтому теплоприток по ним соответствует ожигательному режиму работы рефрижератора /26/, холодопроизводительность при котором в 4-5 раз ниже, чем холодопроизводительность в рефрижераторном режиме. Таким образом, теплоприток по тоководу требует 60 x 5 = 300 вт холодопроизводительности в рефрижераторном режиме.

Так как теплоприток по тоководам относительно мал, можно считать, что суммарная необходимая холодопроизводительность рефрижераторных установок составит около 3 квт. Учитывая необходимость резервирования и потребность в увеличенной холодо-

производительности в пусковой период, удобнее всего иметь 3 установки - 2 работающие, 1 резервную, мощностью 1,5 - 2 квт каждая.

Время запуска резервного рефрижератора составит 5-7 часов. На этот период надо прекратить ускорение и поддерживать магниты в холодном состоянии либо за счет работы одного из двух работавших ожигителей, либо за счет питания ускорителя из емкости жидким гелием. Таким образом, в состав криогенного оборудования следует включить 2 танка для жидкого гелия по 2,5 м<sup>3</sup> емкостью каждый и 1 шаровую емкость для сбора газообразного гелия объемом 600 м<sup>3</sup> на давление 12 атм.

Существует несколько способов охлаждения сверхпроводящих магнитов: а) жидким гелием под сверхкритическим давлением, б) кипящим жидким гелием, поступающим в таком виде из рефрижератора, в) двухфазным гелием, который получают дросселированием в криостат холодного газа, г) принудительным продавливанием двухфазного гелия через обмотку магнита.

Последние два способа представляются нам наиболее целесообразными, так как они обеспечивают хорошее охлаждение катушек кипящим при постоянной температуре жидким гелием и вместе с тем упрощают раздачу жидкого гелия на большие расстояния.

Ускорители будут обслуживаться двумя холодными трубопроводами для подвода сжатого гелия к криостатам и отвода холодного пара в рефрижератор. При разработке рефрижераторной системы следует изучить возможность использования эжекторов для дросселирования гелия с целью откачки ими паров гелия из криостата и снижения температуры ванны.

Рефрижераторная установка с целью экономии эксплуатационных расходов должна включать азотно-холодильный цикл или детандер, работающий на уровне температуры жидкого азота. Больших усилий потребует герметизация гелиевых систем.

#### § 6. Система питания сверхпроводящих электромагнитов

Ориентируясь на современный уровень развития силовой полупроводниковой техники, с учётом возможных аварийных режимов в отдельных сверхпроводящих элементах ускорительного кольца, а также из расчёта допустимого рабочего напряжения межвитковой и корпусной изоляции обмоток возбуждения сверхпроводящих блоков электромагнита ускорителя были рассмотрены несколько вариантов системы электропитания ускорительного кольца. Наиболее предпочтительным вариантом оказалась схема питания, состоящая из восемнадцати управляемых полупроводниковых преобразователей (по числу нормальных периодов ускорительного кольца), выполненных на стандартном оборудовании.

Основные параметры преобразователя:

|                         |   |  |
|-------------------------|---|--|
| мощность                | - | 1500 квт.                              |
| напряжения питания      | - | 6000 в                                 |
| выпрямленное напряжение | - | 600 в                                  |
| выпрямленный ток        | - | 2500 а                                 |
| схема                   | - | 12-фазная с уравнительными реакторами. |



В выбранном варианте все полупроводниковые преобразователи включаются между обмотками возбуждения смежных сверхпроводящих блоков, относящихся к разным нормальным периодам ускорителя, и образуют с блоками замкнутую в кольцо электрическую цепь.

Для защиты сверхпроводящих блоков при аварийном выходе из сверхпроводящего состояния необходимо шунтировать короткозамыкателем соответствующую принятому делению часть блоков ускорительного кольца (нормальный период) и с помощью тиристорного выключателя ввести в цепь обмоток закороченных блоков активное сопротивление, на котором и будет выделяться запасенная в них энергия. Полупроводниковые преобразователи должны быть расположены в непосредственной близости от ускорительного кольца в корпусе № I.

Так как запасаемая энергия в сверхпроводящем электромагните ускорителя составляет величину порядка 60 Мдж, то во избежание раскочки сети электроснабжения, общей для всех физических установок института, целесообразно применение в системе питания электромагнита ускорителя буферных электромашинных агрегатов: асинхронный двигатель - маховик - синхронный генератор. В качестве таких устройств можно использовать два электромашинных агрегата из существующей системы питания синхрофазотрона на 10 Гэв. Генераторы агрегатов должны быть включены на параллельную работу и питать сборные секции шин, с которых запитываются через разделительные трансформаторы все полупроводниковые преобразовательные установки системы питания.

Потребляемая мощность рассмотренных систем питания составит величину порядка 1200 квт.

#### § 7. Высокочастотная система и аппаратура диагностики пучка

Высокочастотное оборудование каждого кольца ускорителя предлагается состоящим из двухрезонаторных ускоряющих станций, установленных по периметру колец. Резонаторы заполнены ферритовыми кольцами, магнитная проницаемость которых изменяется подмагничивающим током.

Высокочастотное напряжение от выходных усилителей к резонаторам подается по коаксиальным кабелям, выходные каскады устанавливаются в помещении без радиационно опасных условий. Промежуточные каскады в/ч системы возбуждаются от задающего генератора, частота которого меняется по определенному закону. Мощность ускоряющих станций ПКУ и ОКУ порядка 30-50 квт. Из существующего оборудования в/ч системы синхрофазотрона можно использовать мощные высоковольтные выпрямители.

Оборудование для диагностики циркулирующих пучков должно состоять из аппаратуры:

- а) измерения орбит циркулирующего пучка в камере в вертикальной и горизонтальной плоскостях;
  - б) измерения профиля циркулирующих пучков в камерах ускорителей;
  - в) измерения интенсивности циркулирующих пучков.
- В системах диагностики параметров выводимых пучков следует измерять:
- а) интенсивность пучков;

б) положение пучков и их размеры.

Для измерения параметров пучков могут быть использованы прозрачные датчики электромагнитного типа (для измерения интенсивности и положения пучков), сканирующие датчики, камеры вторичной эмиссии и проволочные ионизационные камеры, опыт использования которых накоплен на существующем синхрофазотроне. Для качественной оценки размеров и положения пучков предполагается использовать флуоресцирующие экраны и промышленные телевизионные установки. Данные от всех измерительных систем и датчиков вводятся в ЭВМ с целью получения информации для контроля параметров и управления работой "Ну-клотрона."

#### § 8. Система управления параметрами ускорительного комплекса

Информационная система, предназначенная для сбора данных о параметрах пучков, будет содержать примерно 1200 датчиков. Получаемая информация будет обрабатываться:

а) при помощи непосредственных индикаторов (цифровые вольтметры, показывающие табло, осциллографический контроль);

б) при помощи ЭВМ с представлением изображений контролируемых функций на дисплеях и возможностью автоматической коррекции их;

в) с помощью оперативной многоканальной телевизионной системы.

Структура информационной системы предусматривает преобразование информационных массивов как непосредственно в местах сбора информации, так и передачу данных к ЭВМ и обратно к системам регулирования.

В результате осуществления информационной системы ускорительного комплекса будут решены задачи:

1. Контроль режимов работы ускорителей.
2. Коррекция характеристик пучков.
3. Коррекция параметров магнитного поля.

Предполагается осуществить:

1. Режим "советчика".
2. Режим автоматического управления ускорителями по информации о пучках ускоренных частиц.
3. Режим наблюдения различных стадий ускорения.

Предварительная оценка структуры систем диагностики пучка приведена в таблице У.

ТАБЛИЦА У

#### Основные системы диагностики пучка в нуклотроне

##### А. Инжектор и участок ввода

| № п/п | Наименование и основное назначение датчика                                | Кол-во | Возможность связи с ЭВМ | Возможность замыкания обр.связи (коррекция) |
|-------|---|--------|-------------------------|---|
| 1     | 2   | 3      | 4                       | 5   |
| I.    | Широкополосные тр-ры тока для измерения величины, формы и положения пучка | 8      | Выборочная связь        | Необходима                                  |

| I  | 2 | 3 | 4                  | 5        |
|--|---|---|--------------------|----------|
| 2. Измеритель эмиттанса. Оперативное измерение угловых характеристик пучка |   | I | Использов. дисплея | Не нужно |
| 3. Профилометр   |   | I | — " —              | Возможна |
| 4. Устройство для измерения спектра пучка                                  |   | I | Связь необходима   | Не нужна |
| 5. Многоканальная телевизионная установка                                  |   | I | Не нужна           | Не нужна |

#### Б. Промежуточный и основной ускорители

| I  | 2 | 3  | 4                     | 5          |
|--|---|----|-----------------------|------------|
| 6. Широкополосные тр-ры тока и индукционные электроды для измерения интенсивности пучка              |   | 4  | Необходима            | Возможна   |
| 7. Система регистрации орбит пучков в двух плоскостях  |   | 6Q | Необходима            | Необходима |
| 8. Профилометр   |   | 2  | Использование дисплея | Возможна   |
| 9. Системы диагностики когерентных бетатронных колебаний   |   | 2  | Необходима            | Необходима |
| 10. Многоканальная телевизионная установка   |   | 2  | Не нужна              | Не нужна   |
| 11. Аппаратура предварительной обработки информации о пучках для связи с ЭВМ и мониторами II корпуса |   | I  | Необходима            | Необходима |

Датчики разбиваются на 3 группы: датчики инжектора, датчики основного ускорителя и датчики систем вывода. В каждой группе различают датчики интенсивности, орбиты, контроля сверхпроводящих магнитов, частоты, напряжений питания и токов. Каждая группа датчиков обслуживается измерительными панелями, содержащимися в крейтах КАМАК, связанных с ЭВМ ЕС1010. Таким образом, могут быть использованы 3 малые ЭВМ типа ЕС1010В и 24 крейта КАМАК. С малых ЭВМ информация поступает на ЭВМ типа ЕС1050, установленную на главном пульте управления ускорителем.

Ускоритель также будет оснащен системой управления, содержащей примерно 500 исполнительных устройств. Функция управления поступает с главной ЭВМ в виде сигналов управления через местные малые ЭВМ и крейты КАМАК на исполнительные устройства.

При создании системы контроля и управления ускорительным комплексом целесообразно использовать разработки по автоматизации существующего синхрофазотрона, которые в настоящее время находятся в стадии реализации.

§ 9. Некоторые предварительные соображения по строительным работам и биологической защите сверхпроводящего ускорителя

"Нуклотрон" предполагается разместить в подвальном помещении корпуса № I вокруг фундамента действующего синхрофазотрона. После выполнения некоторых работ, связанных с переносом и частичной ликвидацией кабельных трасс, воздухопроводов и других коммуникаций вокруг фундамента синхрофазотрона образуется кольцевой туннель высотой приблизительно 3м и шириной 3м. Поперечное сечение "Нуклотрона" не будет превосходить  $0,8 \times 1,5 \text{ м}^2$ . Если учесть установку рам, раскладку необходимых коммуникаций и других систем, то размеры кольцевого туннеля вполне достаточны для размещения в нем "Нуклотрона".

В пользу высказанного предложения по размещению "Нуклотрона" могут быть использованы следующие соображения:

1. Используется готовое помещение с развитым инженерным обеспечением (энергоснабжение, водоснабжение, вентиляция и крановое хозяйство).

2. Потребуется минимум затрат для сооружения биологической защиты.

Перечень строительных-монтажных работ по "Нуклотрону", примерно, следующий:

а) демонтажные работы в туннеле и работы по переносу некоторых коммуникаций;

б) сооружение небольшого туннеля (10-15 метров) для обеспечения вывода пучка в экспериментальный корпус.

в) Монтаж кольца "Нуклотрона" с криогенными системами и другими коммуникациями.

г) Сооружение биологической защиты.

Весь цикл изготовления узлов и деталей "Нуклотрона" должен занять не более 3-4 лет. Далее синхрофазотрон останавливается для выполнения комплекса строительных-монтажных работ. На выполнение этих работ потребуется ориентировочно I год.

Ввиду того, что узлы и детали "Нуклотрона" будут иметь сравнительно небольшой вес и габариты и будут однотипны, то здесь возможно широко использовать поточный монтаж по шаблону.

Биологическую защиту потребуется дополнительно соорудить только в виде перекрытия туннеля. Внутренняя боковая сторона туннеля защищена фундаментом синхрофазотрона, а наружная - фундаментом корпуса и естественным грузом. Для укладки защитных железобетонных блоков в качестве опор может быть использован фундамент синхрофазотрона и фундамент корпуса, а в качестве подъемных средств - существующее крановое хозяйство.

В обсуждении материалов принимали участие: А.И.Дзергач, Р.А.Мещеров, В.С.Рыбалко, Г.А.Филиппов, Л.И.Гребень.

ЛИТЕРАТУРА

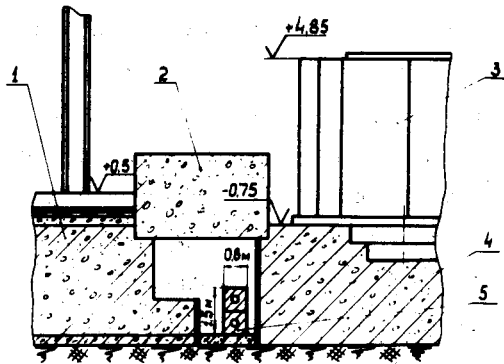


Рис.8. Вариант расположения "Нуклотрона" в подвале корпуса I:

- I - фундамент корпуса № I,
- 2 - планируемая бетонная защита,
- 3 - магнит синхрофазотрона,
- 4 - фундамент синхрофазотрона,
- 5 - "Нуклотрон"

1. Б.В.Василишин, И.Б.Иссинский, Е.М.Кулакова. ОИЯИ, Р9-6972. Дубна, 1973 г.
2. Б.В.Василишин, В.И.Волков, Л.П.Зиновьев, И.Б.Иссинский, С.В.Каленов, С.А.Новиков, Б.Д.Омельченко, Н.И.Павлов, В.Ф.Сиколенко. ОИЯИ, Р9-6973, Дубна, 1973г.
3. Д.Д.Безногих, Л.П.Зиновьев, Г.С.Казанский, А.И.Михайлов, В.И.Мороз, Н.И.Павлов. ОИЯИ, Р9-4214, Дубна, 1968г., ПТЗ № 4, 1969 г., стр. 202.
4. А.М.Балдин, Д.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 г.
5. А.М.Балдин. ОИЯИ, Р-7-5808, Дубна, 1971г. Труды Международной конференции по физике тяжелых ионов, Дубна, февраль, 1971 г. ОИЯИ Д7-5769, Дубна (1971), стр. 607 .
6. А.М.Балдин. Сборник "Краткие сообщения по физике" № I, Академия наук СССР, 1971 г.
7. А.М.Балдин, Н.Гиордэнеску, В.Н.Зубарев, А.Д.Кириллов, В.А.Кузнецов, Н.С.Мороз, В.Б.Родоманов, В.Н.Рамзин, В.А.Свиридов, В.С.Ставинский, М.И.Яцута. ОИЯИ; Р1-5819, Дубна, 1971г.
8. A.M.Baldin, N.G.Ghiordanescu, A.D.Kirillov, V.A.Kuznetsov, N.S.Moroz, V.B.Rodomanov, V.N.Ramzhin, V.S.Stavinsky, V.A.Sviridov, M.I.Yatsuta, V.N.Zubarev. Proc. Rochester Meeting APS/DPF, New York, 1971, p.131.
9. A.M.Baldin, S.B.Gerasimov, N.Ghiordanescu, I.K.Ivanov, A.D.Kirillov, U.A.Kuznersov, N.S.Moroz, V.D.Radomanov, V.N.Ramzhin, V.S.Stavinsky, M.I.Yatsuta, V.N.Zubarev. Proc. XVI Intern.Conf. on High

10. Минц А.Л., Васильев А.А., Бурштейн Э.Л., Миронов Е.С.  
Труды II-го Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, М., Наука, 1972, т. I, стр. 13.
11. Адо Д.М., Васильев А.А. и др. Аннотации докладов, представленных на III-е Всесоюзное совещание по ускорителям заряженных частиц. Москва, 1972 г., стр. 83.
12. Бурштейн Э.Л., Васильев А.А., Минц А.Л.  
Труды Международной конференции по ускорителям, Дубна, 1963, Москва, Атомиздат, 1964, стр. 67.
13. Васильев А.А., Дзержач А.И., Зельдович А.Г., Мещеров Р.А., Миронов Е.С. Труды VII Международной конференции по ускорителям заряженных частиц высоких энергий, Ереван, 1969 г., АН АССР, 1970 г., т. II, стр. 656.
14. Минц А.Л., Васильев А.А., Бурштейн Э.Л.  
Труды VII Международной конференции по ускорителям заряженных частиц высоких энергий. Ереван, 1969 г., АН АССР, 1970 г. т. I, стр. 60.
15. P.F.Smith. Proc. of the 1968 Summer Study on Superconducting Devices and Accelerators. BNL, Upton, New York, 1969, part III, p.967.
16. G.Bronca, R.Levy-Mandel, G.Neyret and J.Parain. Part. Accelerators, I, p. 187, 1970.
17. GESSS-I. Towards a European Superconducting Synchrotron.  
A report of the work of the GESSS collaboration. May, 1972.
18. R.R.Wilson. Physics Today (May 1971), p.19.
19. R.A.Carrigan. FN 233 (NAL), July 1971.
20. A.Van. Steenbergen . Proc. 8th Intern.Conf. on H.E.Acc. CERN (1971).

21. J.P.Blewett. Proceedings of the 8th International Conference on High Energy Accelerators, CERN, 1971, p.501.
22. CERN Courier, N 10, vol.I2, Oct. 1972.
23. Alexeev V.P., Greben L.J., Mironov E.S., Vasiliev A.A.  
Development and testing of proton synchrotron magnet prototypes. Radiotechnical Inst. of the USSR Academy of Sciences, Moscow, 1972, NTD - 721 A.
24. Н.Д.Вест. Труды II Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. М., Наука, 1972 г., т. I, 239.
25. P.F.Smith. Proc. 8th Intern.Conf. on H.E.Acc., CERN (1971)
26. А.Г.Зельдович, Д.А.Шашов. ОИЯИ, Р8-3206, Дубна, 1967 г.
27. Е.Д.Донец, В.И.Илющенко, В.А.Альперт. ОИЯИ, Р7-4469, Дубна, 1969 г.
28. Д.А.Быковский и др. ЖТФ, т. XI вып. 12, 1970 г.
29. Д.Д.Безногих. ОИЯИ, 9-6848 (автореферат диссертации), Дубна, 1972 г.
30. Д.Д.Безногих, Л.П.Зиновьев. ОИЯИ, Р9-5610, Дубна, 1971 г.
31. W.S.Gilbert. Summary of International Progress on Superconducting magnets. Rep. LBL - 1703, 1973.

Рукопись поступила в издательский отдел  
8 мая 1973 года.