

A 16

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ АН СССР

Препринт. 033

СИЛЬНОТОЧНЫЕ ИМПУЛЬСНЫЕ УСКОРИТЕЛИ СО СПИРАЛЬНЫМ  
НАКОПЛЕНИЕМ ЭЛЕКТРОНОВ.

Е.А.Абрамян, И.Е.Бендер, Л.Н.Бондаренко, Г.И.Будкер,  
Г.Б.Глаголев, А.Х.Кадымов, И.Н.Мешков, А.А.Наумов,  
В.Е.Пальчиков, В.С.Панасюк, С.Г.Попов, И.Я.Протопопов,  
Д.И.Родионов, И.М.Самойлов, А.Н.Скирицкий, Л.И.Юдин.

Гор. Новосибирск  
1964 г.

Работы по созданию кольцевых сильноточных электронных ускорителей начаты нами в 1954 году в целях изучения возможности образования релятивистского стабилизированного пучка.

В лабораториях Института экспериментально исследуются четыре метода получения больших кольцевых токов релятивистских электронов.

1. Спиральный метод накопления электронов в установках бетатронного типа с последующим бетатронным или синхротронным ускорением /I/.

2. Получение предельных электронных токов посредством инжекции электронов из сильноточного линейного ускорителя в кольцевую камеру с большой апертурой с последующим синхротронным ускорением.

3. Накопление электронов на дорожках с постоянным магнитным полем посредством многократной инжекции электронов из другого, менее сильноточного, ускорителя. Этот метод используется для накопления электронов и позитронов в опытах со встречными пучками и подробно изложен в докладе, прочитанном Г.И.Будкером.

4. Получение больших электронных токов посредством ускорения электронов кольцевой плазмы.

В настоящем докладе рассматриваются первые два метода.

### I. СИЛЬНОТОЧНЫЕ ИМПУЛЬСНЫЕ УСКОРИТЕЛИ СО СПИРАЛЬНЫМ НАКОПЛЕНИЕМ ЭЛЕКТРОНОВ.

#### I. Импульсный безжелезный бетатрон с предварительным накоплением заряда (установка Б-2).

Для получения больших электронных токов нами в 1955 году была создана установка Б-2, представляющая собой безжелезный бетатрон со спиральным накоплением электронов, инжектируемых электронной пушкой, расположенной на внутренней обечайке камеры. Принцип действия установки и основные параметры изложены в работе /I/ и будут кратко повторены при описании импульсного синхротрона Б-2С. Отметим лишь, что предельный об"емный заряд

в установках такого типа определяется соотношением:

$$Q_{\text{пред}} = \frac{(n - 0,25) \beta^2 \gamma^3}{2(2-n)} \frac{mc^2}{e} \left( \frac{Z_u}{Z_k} \right)^{2-n} \mathcal{C} h \quad (I)$$

где  $h$  - высота пучка;  $Z_u$  - радиус инжекции;  $Z_k$  - конечный радиус спирально накопленных электронов;  $\beta$ ,  $\gamma$  - релятивистские факторы инжектируемых электронов;  $\mathcal{C}$  - коэффициент, учитывающий форму пучка, лежащий в интервале между 1 и 2,  $n$  - показатель спада магнитного поля.

Установка Б-2 рассчитана на получение циркулирующих токов релятивистских электронов порядка 100А. Первоначально на установке Б-2 при пониженной энергии инжекции был получен кольцевой ток порядка 10А /1/.

В дальнейшем, в 1957 г. путем повышения энергии инжекции до величины порядка 60 кв удалось довести ток на внутреннем радиусе ( $Z_k = 14,0$  см) до 75А при значении  $Z_u = 47$  см, что дает хорошее согласие с расчетом.

Эти результаты были использованы при разработке описываемых далее ускорителей Б-2С и Б-3.

## 2. Сильноточный импульсный синхротрон Б-2С.

В связи с положительными результатами работ по накоплению больших электронных токов в импульсном бетатроне Б-2 в 1956 году в Институте были начаты работы по созданию установки ВЭП-1 с встречными электронными пучками с энергией 100 - 130 МэВ.

При однооборотном выпуске электронов из циклического ускорителя и однооборотном захвате в накопительные кольца синхротрон обладает рядом преимуществ перед линейным ускорителем, главное из которых заключается в том, что пучок, выпущенный из синхротрона, имеет малый разброс по энергиям и малый фазовый об"ем, при этом в накопитель может быть захвачена большая часть электронов, ускоренных в синхротроне.

Для накопительных колец ВЭП-1 пучок, выпущенный из ускорителя-инектора, должен обладать следующими параметрами: энергия 50 - 130 МэВ;

число электронов в импульсе - не менее  $10^9$  при частоте повторений один раз в 10 сек; длительность импульса порядка  $10^{-8}$  сек; фазовый об"ем по вертикали и горизонтали не хуже  $3 \cdot 10^{-2}$  см радиан; разброс энергий в пучке не более  $\pm 3 \cdot 10^{-3}$ .

Для получения пучка электронов с указанными параметрами решено было создать на базе бетатрона Б-2 сильноточный импульсный синхротрон Б-2С на энергию 100 Мэв <sup>х)</sup> со спиральным накоплением электронов.

При реконструкции установки Б-2 были внесены следующие изменения: существенно усилены конструктивные элементы обмоток, создающих магнитное поле в камере; разработан разрезной резонатор, позволяющий вести спиральное накопление электронов; в целях лучшего использования конденсаторной батареи и осуществления коррекции магнитного поля усложнена система коммутации обмоток; для управления положением пучка введены обмотки, создающие гармоники в азимутальном распределении ведущего магнитного поля; введен импульсный дефлектор и экранированный канал для выпуска электронов.

Остальные элементы бетатрона Б-2: система разрезных экранов, магнитопровод, создающий вихревое электрическое поле, обечайки камеры, вакуумная система и т.п. остались практически без изменений. Кроме того, при налаживании синхротрона Б-2С широко использовалась методика и аппаратура, применявшаяся при наладке экспериментального бетатрона Б-2. В результате с минимальными затратами нам удалось создать сильноточный импульсный синхротрон для инжекции электронов в накопительные кольца.

Схематический разрез установки и последовательность процессов в цикле ускорения поясняются рисунками I и 2. Инжекция электронов осуществляется из пушки, расположенной на внутренней обечайке, в момент, соответствующий максимальному значению ведущего поля, созданного разрядом специальной конденсаторной батареи на витки электромагнита.

---

х) Повышение энергии электронов до 130 Мэв предполагается получить на накопительных кольцах.

Инжектируемые электроны ускоряются вихревым электрическим полем и движутся по спирали. После того, как электроны заполнят всю камеру, включается конденсаторная батарея бетатронного поля и начинается бетатронное ускорение накопленных электронов. При этом электроны асимптотически стягиваются к равновесной бетатронной орбите, положение которой выбирается на среднем радиусе камеры. Соотношение периодов вихревого и ведущего магнитного поля выбрано таким, что после ускорения электронов до энергии порядка 2 Мэв радиус равновесной орбиты начинает расти, электроны вводятся внутрь ускоряющего резонатора и захватываются в синхротронный режим на радиус равновесной орбиты  $R_c = 412$  мм (частота в.ч. 116 МГц), после чего на наружную часть витков электромагнита включается синхротронная конденсаторная батарея. В конце ускорения, для облегчения условий выпуска, равновесная орбита специальными витками сдвигается в сторону выпускного канала. Однооборотный выпуск осуществляется подачей на дефлектор импульса напряжения с временем нарастания  $10^{-9}$  сек и амплитудой до 100 кв (мощность в импульсе до  $10^9$  вт).

В настоящее время на синхротроне Б-2С получена энергия 80 Мэв, которая в случае необходимости может быть доведена до 100 Мэв. Основные режимы установки и характеристики пучка обследованы при энергии инъекции 20 Кэв и конечной энергии 40 Мэв, на которой проведены первые опыты по накоплению электронов на одну дорожку. При этом в ускорителе получен кольцевой ток около  $0,5$  А ( $3 \cdot 10^{10}$  электронов в импульсе) и выпущенный пучок имеет следующие параметры:

число электронов в импульсе в среднем  $1 \cdot 10^{10}$  ;

разброс энергий  $\frac{\Delta E}{E} = \pm 2 \cdot 10^{-3}$  ;

фазовый объем радиальный  $10 \cdot 10^{-3}$  см.рад ;

при радиальном размере  $\pm 0,5$  см ;

фазовый объем вертикальный  $6 \cdot 10^{-3}$  см.рад ;

при вертикальном размере  $\pm 0,3$  см ;

длительность электронного импульса 3 - 4 нсек ;

частота повторений 1 раз в 20 сек.

### 3. Импульсный сильноточный бетатрон со спиральным накоплением (установка Б-3).

На основании результатов, полученных на установке Б-2, нами была создана импульсная бетатронная установка Б-3 со спиральным накоплением электронов, рассчитанная на получение токов выше 100А при энергии порядка 50 МэВ.

Для получения больших циркулирующих токов согласно (I) важно иметь максимальную энергию инъекции и возможно большее отношение  $\frac{Z_k}{Z_u}$ . Максимальный радиус области ускорения  $- Z_k$  ограничен размерами и весом установки, минимальный - размерами сердечника. В отличие от бетатрона Б-2, на установке Б-3 сердечник в целях повышения накопленного тока служит для создания вихревого электрического поля только на время накопления и начального периода стягивания. В дальнейшем для создания бетатронного отношения 1:2 используются специальные обмотки, уложенные в пазах магнитных полюсов ("пазовые" обмотки, см.рис.3), которые создают добавочный поток в центральной области, когда электроны в процессе стягивания уйдут на большие радиусы,

В результате этого оказалось возможным уменьшить  $Z_u$ , несмотря на значительное увеличение конечной энергии электронного пучка по сравнению с бетатроном Б-2.

Применение "пазовых" витков обусловило выбор железной системы полюсов и магнитопроводов. Полюса магнита (рис.3) состоят из шихтованных по радиусу пакетов трансформаторной стали, двенадцать замыкающих ярем расположены равномерно по окружности полюсов.

Вакуумная камера образована двумя крышками из оргстекла радиусом 100 см, притянутыми к полюсам болтами, и двумя обечайками, внутренней и наружной. Сердечник с экранами и частью полюсов представляет отдельную конструкцию. Были разработаны два варианта центральной части установки. Первый вариант рассчитан на использование внутренней электронной пушки

с напряжением до 100 кв, при радиусе инжекции -  $Z_1 = 5,5$  см. Второй вариант предусматривал значительное повышение энергии инжекции за счет использования высоковольтного инжектора, расположенного снаружи.

Система питания обмоток сердечника, камеры и "пазовых" витков обеспечивает независимую регулировку момента включения и величины тока в каждой обмотке. Один из возможных режимов установки Б-3 показан на рис. 4:

а) распределение магнитного поля по радиусу в различные моменты времени; здесь  $Z_1$  - радиус инжекции,  $Z_2$  - радиус, на котором магнитное поле первой "пазовой" обмотки уже практически не искажает ведущее поле,  $Z_3$  то же, что и  $Z_2$ , но для второй "пазовой" обмотки; пунктиром показано ведущее магнитное поле без включения "пазовых" обмоток;  $t_1 \div t_5$  - соответствуют аналогичным моментам времени на рис. б) и в);

б) изменение во времени магнитных потоков:  $\Phi_1$  - магнитный поток сердечника,  $\Phi_2$  - магнитный поток первой "пазовой" обмотки,  $\Phi_3$  - магнитный поток второй "пазовой" обмотки,  $\Phi_4$  - магнитный поток ведущего поля камеры,  $U_{imp}$  - импульс напряжения инжекции;

в) движение электронов по радиусу во время накопления и стягивания. В общем случае равновесный радиус  $Z_p$  может меняться во время стягивания заранее заданным образом.

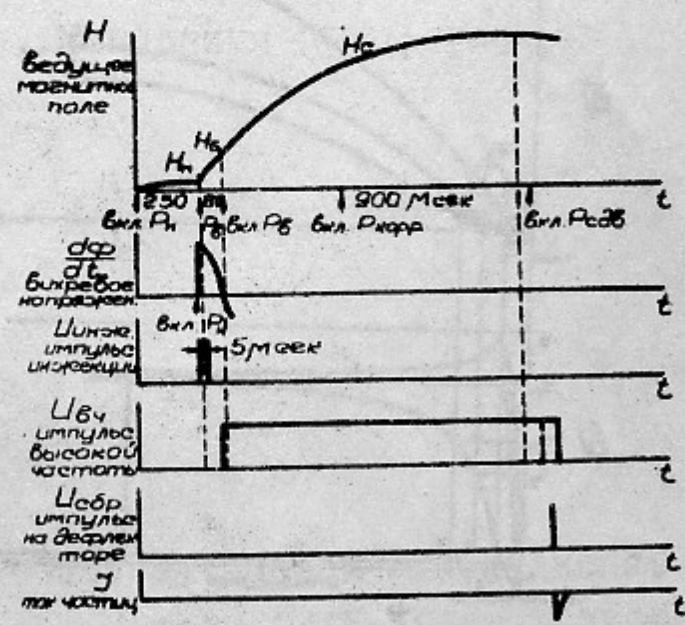
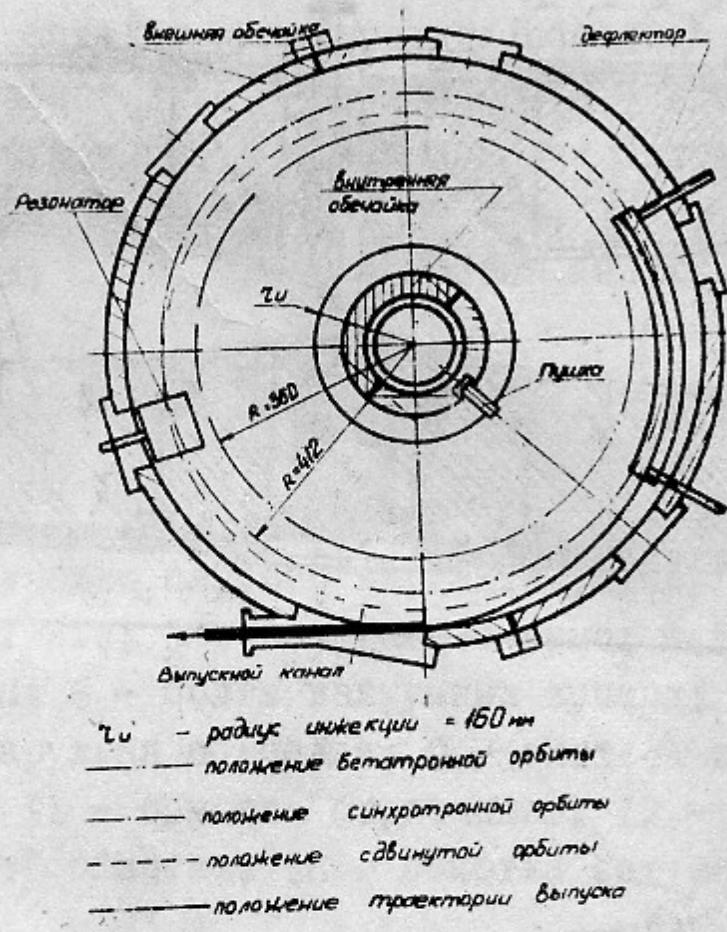
В Москве к 1961 году элементы первого варианта установки были отлажены. При энергии инжекции 50 кв достигнут циркулирующий электронный ток около 15А на радиус 80 см ( $1,5 \cdot 10^{12}$  электронов) при энергии 35 Мэв. Исследования возможности накопления больших токов с первым вариантом центральной части установки не проводились в связи с тем, что, стремясь предельно уменьшить начальный радиус, мы не смогли столь тщательно, как в установке Б-2, заэкранировать камеру от рассеянных магнитных полей, создающих ускоряющее поле, и это сильно затруднило процесс накопления электронов.

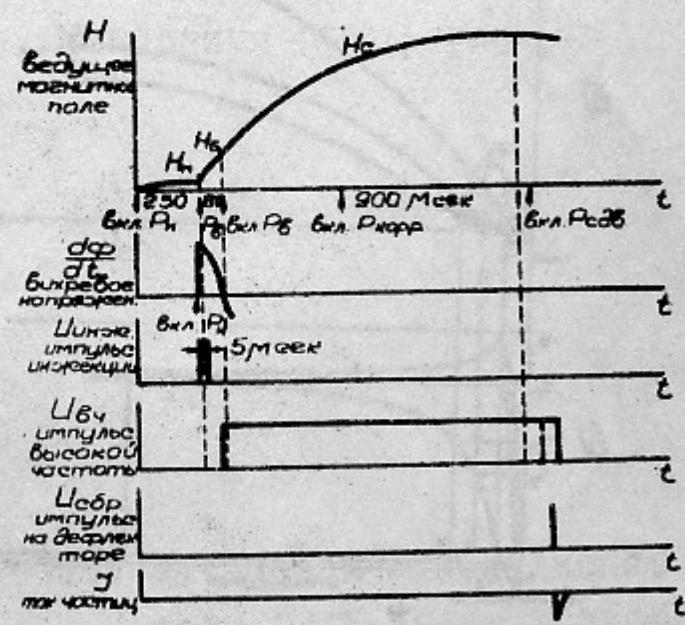
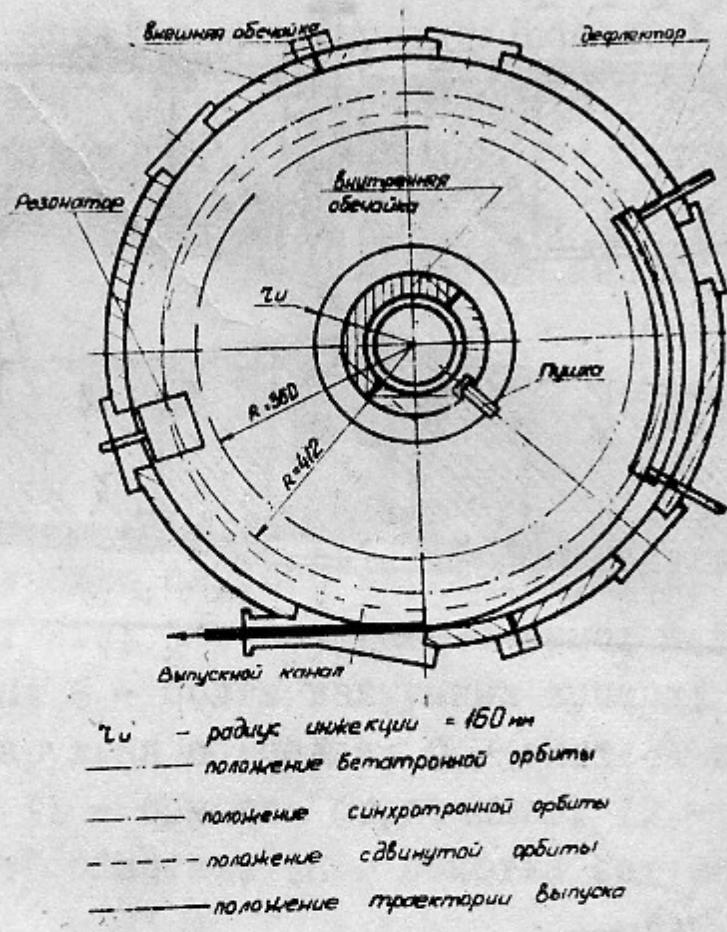
При перебазировании установки из Москвы в Новосибирск было решено, с целью дальнейшего повышения тока, осуществить второй вариант централь-

ной части установки, использовав в качестве инжектора ускорительную трубку с генератором импульсного напряжения по схеме Маркса и улучшить экранирование камеры ускорителя от магнитных полей сердечника за счет полного разделения магнитных потоков сердечника и ведущего поля камеры. Для этой цели были использованы экраны, аналогичные экранам установки Б-2, обеспечивающие вывод магнитного потока сердечника за пределы полюсов установки.

Одновременно с переделкой системы экранирования был произведен ряд дополнительных технических усовершенствований установки Б-3.

В настоящее время установка монтируется в г. Новосибирске. Согласно соотношению (I), при энергии инжекции 500 Кэв можно получить на радиусе 80 см циркулирующий ток около  $10^3$  ампер с энергией около 40 Мэв, но в этой установке возможно уменьшение величины предельного тока вследствие отражений в полюсах.





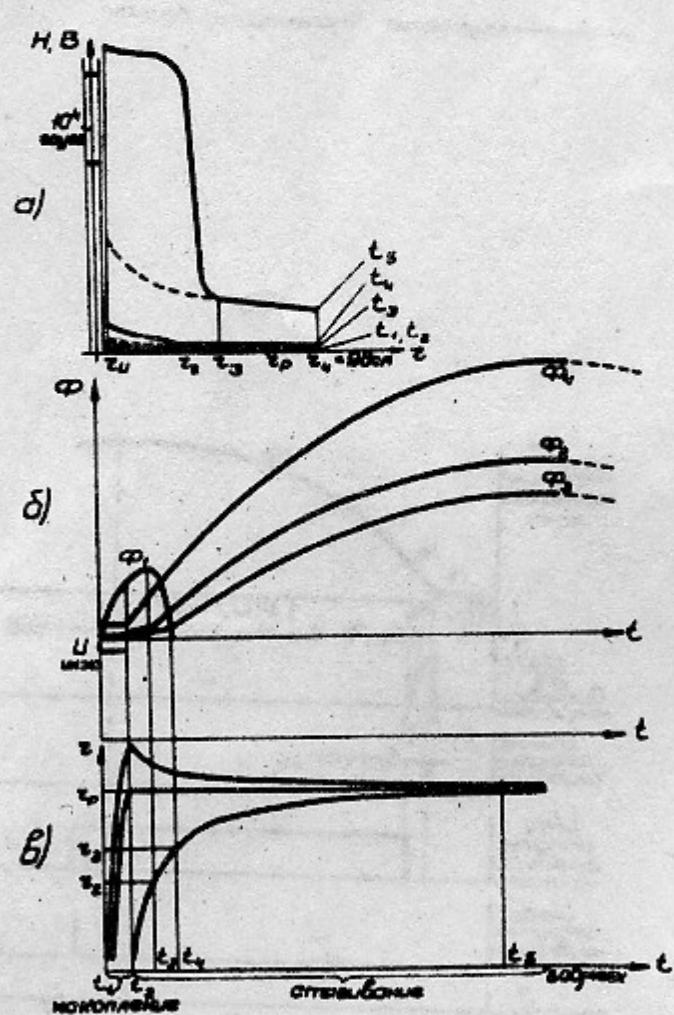
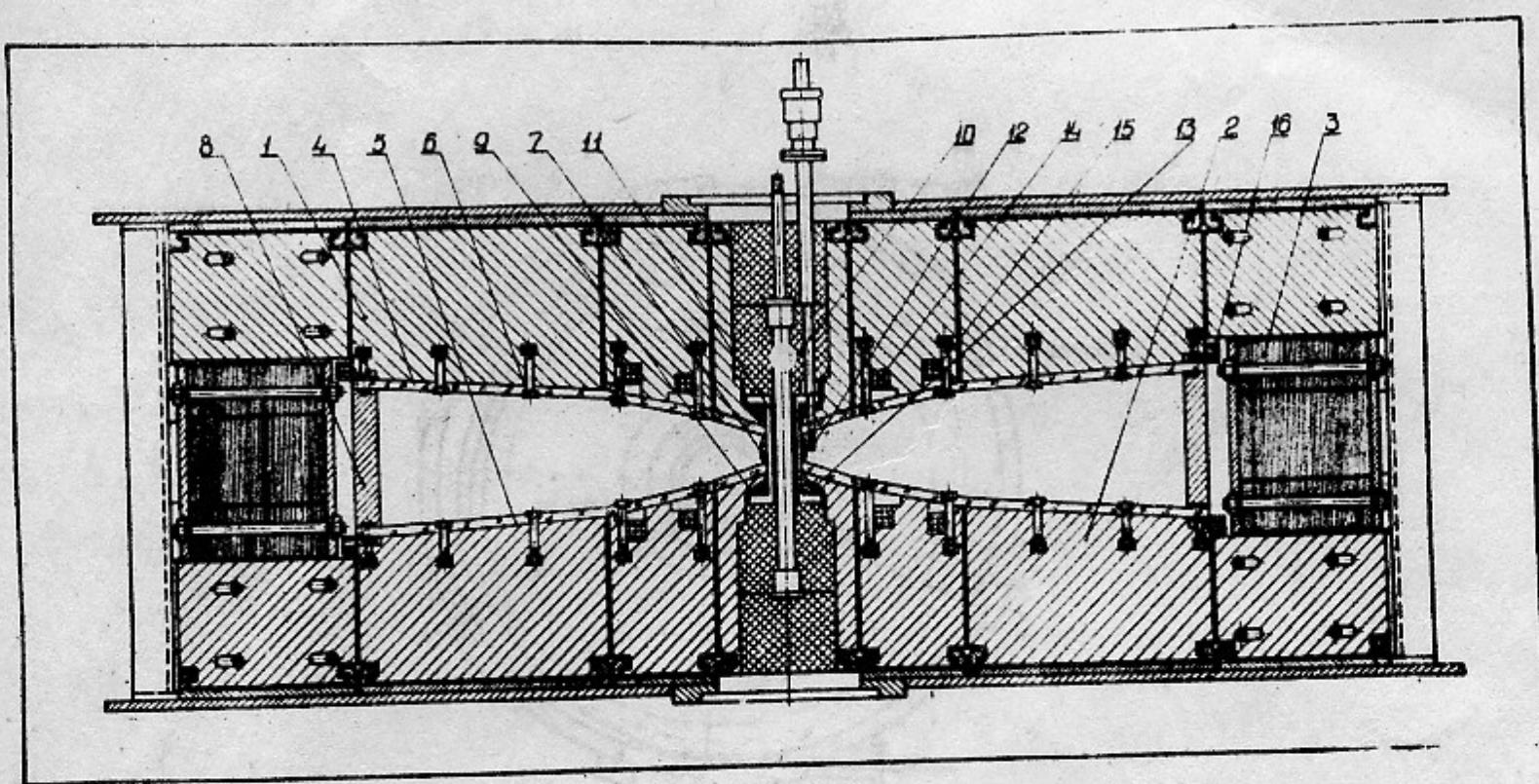


Рис.1. - Упрощенное сечение ускорительной камеры синхротрона Б-2С.  
1 - внешняя обечайка; 2 - внутренняя обечайка; 3 - инжектор  
"пушка"; 4 - резонатор; 5 - дефлектор; 6 - выпускной канал;  
— радиус инжекции; — положение бетатронной орбиты;  
— положение синхротронной орбиты; — положение  
сдвинутой орбиты; траектория выпуска.

Рис.2. - Схемы последовательности процессов в цикле ускорения установки Б-2С.

Рис.3. - Схематическое сечение первого варианта установки Б-3.  
1,2 - полюса магнита; 3 - замыкающее ярмо; 4,5 - крышки  
вакуумной камеры; 6 - болты вакуумных крышок; 7 - внутренняя  
обечайка; 8 - наружная обечайка; 9 - система экранов;  
I0 - сердечник; II - обмотка сердечника; I2 - инжектор;  
I4,I5 - "пазовые" обмотки; I6 - обмотка ведущего поля.

Рис.4. - Режим работы установки Б-3 (пояснения в тексте).

#### Литература

1. Г.И.Будкер, А.А.Наумов. Симпозиум ЦЕРН, 1956.

Ответственный за выпуск Ю.И.Родионов  
Подписано к печати 9/IV-1964г. № МН00563  
формат бумаги 270 x 190, тираж 200  
Заказ № 033 бесплатно

Отпечатано на ротапринте в Институте  
ядерной физики СО АН СССР.