

КИБЕРНЕТИЧЕСКИЙ УСКОРИТЕЛЬ НА 1000 ГЭВ. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ РАЗРАБОТОК

А. Л. МИНЦ, А. А. ВАСИЛЬЕВ, Э. Л. БУРШТЕЙН

Радиотехнический институт АН СССР, Москва

Докладчик А. Л. Минц

Мне представляется существенным преимуществом выступления перед столь квалифицированной аудиторией отсутствие необходимости обоснования важности дальнейшего продвижения в область сверхвысоких энергий. Это было очень убедительно показано на совещаниях весьма компетентных ученых Советского Союза, США и Западной Европы. Более того, хотя сейчас и не все можно предвидеть из того, что будет открыто при энергиях 200, 300, 400 и 1000 Гэв, уже намечены большие и достаточно ясные программы экспериментальных исследований, которые базируются как на продолжении проводимых в настоящее время работ, так и на научной экстраполяции и на прогнозе, если не будущих результатов, то хотя бы направлений будущих исследований.

В 1961 г., когда шла реализация проекта 70 Гэв-ного протонного синхротрона для Серпухова, группа советских ученых приступила к поискам способа создания ускорителя протонов существенно больших энергий^{1,2}.

В 1963 г. на Международной конференции по ускорителям в Дубне было сделано сообщение о разработке протонного ускорителя на 1000 Гэв, который мы назвали кибернетическим³. Одновременно в Дубне были доложены какой, представлялась структура этого ускорителя, основные параметры его модели, теоретические основы дальнейшей разработки 1000 Гэв-ного ускорителя и т. д. ⁴⁻¹². На ряде последующих международных и национальных конференций были сделаны сообщения о работах Радиотехнического института Академии наук СССР, посвященных разработке этой большой проблемы¹³⁻²⁵.

Кроме настоящего обобщающего доклада некоторые работы будут представлены и на этой конференции.

Два тома, выпущенные Радиотехническим институтом и посвященные эскизному проекту этого ускорителя и последующей программе экспериментальных исследований на этой установке, переведены на ан-

глийский язык Комиссией по атомной энергии США. Все это свидетельствует об известном интересе к этому проекту. Организационный Комитет конференции предложил выступить с настоящим докладом наряду с сообщениями о сооружении ускорителей на 200—400 Гэв в Батавии (Иллинойс, США) и на 300 Гэв в Западной Европе под эгидой ЦЕРН^a.

Естественно возникает вопрос, будут ли выделены необходимые средства для реализации этого крупнейшего проекта, не следует ли подумать о сооружении 1000 Гэв-ного ускорителя на международной основе? Мне представляется весьма желательным проведение предварительного обмена мнениями по этому вопросу здесь, в Ереване, между учеными различных стран, либо на специальном совещании, либо в кулуарах нашей Международной конференции.

Оставив в стороне этот финансовый и организационно-политический обмен мнениями, разрешите перейти к научной и технической стороне моего доклада.

При разработке проекта 1000 Гэв-ного ускорителя глубоко принципиальным является выбор его системы. Это особенно существенно потому, что за 20 лет успешного применения протонных синхротронов сначала со слабой, а затем и с сильной фокусировкой, появлялись и появляются новые предложения, которые на первый взгляд представляются более экономичными, чем ставшая классической система кольцевого протонного синхротрона с неподвижной мишенью.

В течение последних лет в некоторых институтах в СССР, США и Европы проведен ряд теоретических и экспериментальных исследований систем со встречными пучками заряженных частиц. Столкновение протонов, имеющих энергию всего около 25 Гэв, во встречных пучках соответствует получению протонов, обладающих энергией выше 1000 Гэв. Однако далеко не вся программа экспериментальных исследований может быть проведена на встречных пучках. Интенсивные пучки вторичных короткоживущих частиц — антипротонов, мезонов, гиперонов, а также нейтральных частиц, обладающих высокими энергиями, могут быть получены только в ускорителях, где протоны бомбардируют неподвижные мишени.

С другой стороны, применение встречных пучков целесообразно для расширения некоторых возможностей существующих и проектируемых ускорителей на сверхвысокие энергии. В частности, сооружение накопительных колец предусмотрено в проекте Радиотехнического института.

За последние годы существенное продвижение и усовершенствование получили так называемые методы коллективного ускорения, предложенные В. И. Векслером и продолженные В. П. Саранцевым в СССР^{26..7}. Разработке этих методов посвящено большое количество работ, проводимых в различных странах²⁸. На пути разработки та-

* Доклад Дж. Адамса не был представлен на конференцию.—Прим. ред.

ких ускорителей имеется не мало принципиальных и технических трудностей, как в осуществлении ускорения, так и в эффективном использовании таких ускорителей для физических экспериментов. Я не буду приводить дополнительных аргументов в пользу существования протонных синхротронов с неподвижными мишениями, установок со встречными пучками и ускорителей, в которых применяются коллективные методы ускорения. Я хотел бы только подчеркнуть тот факт, что хотя эти новые методы ускорения изучаются и частично реализуются,— ни один проект ускорителя классического типа, ни на 200—400 Гэв, ни на 300 Гэв не отвергнут.

Также поступили и мы продолжая разработку, усовершенствование, моделирование и проектирование нашей 1000 Гэв-ной машины. Наши усилия направлены на повышение эффективности, снижение затрат на сооружение, облегчение жестких допусков для параметров магнитного поля. Одновременно мы стали беспокоиться о далеком будущем этой машины и принимаем меры, чтобы ее проект допустил впоследствии повышение энергии ускоренных частиц до 4000—5000 Гэв.

Мы уже указывали в предыдущих работах, что при разработке проекта 1000 Гэв-ного ускорителя мы приняли систему с линейным ускорителем-инжектором на 0,8 Гэв и бустером на 18 Гэв. Далее, после проведения исследований ряда магнитных блоков, мы пришли к выводу о возможности поднять напряженность поля в зазоре электромагнита до 16 килоэрстед. Это позволило уменьшить радиус кривизны орбиты до 2080 м, а следовательно довести ее длину с 20,0 км до 17,0 км.

Так как сооружение ускорителя на энергию 1000 Гэв является весьма дорогостоящим мероприятием, то, подобно тому, как это предполагается делать при сооружении ускорителя под Чикаго, мы также предусматриваем несколько этапов в сооружении ускорителя: первый этап — достижение (при увеличении времени, отводимого для ускорения, до 2,5 сек) 500 Гэв и последующий этап—1000 Гэв при времени ускорения 1 сек.

Предполагается, что на первом этапе предыдущие каскады ускорителя будут также работать в облегченном режиме — кольцевой бустер будет работать до энергии лишь 6 Гэв, а в линейном ускорителе будет использоваться лишь первая его часть—до 200 Мэв.

Значительный экспериментальный опыт, накопленный на модели ускорителя с малой апертурой вакуумной камеры ($22 \times 16 \text{ мм}^2$) убедил нас в том, что при коррекции магнитного поля по данным электронно-вычислительной машины удается иметь малые смещения пучка от оси камеры. В результате для 1000 Гэв-ной машины выбрана камера эллиптического сечения с радиальной протяженностью 66 мм при высоте 40 мм.

Прирост энергии частиц за оборот в главном (большом) кольце ускорителя принят равным 56 Мэв. Переход к энергии инъекции в главное кольцо в 18 Гэв позволяет иметь очень скромное значение модуляции частоты ускоряющего напряжения $\Delta f/f = 0,12\%$. Длительность цик-

ла ускорения—1 сек при 20 циклах ускорения в минуту. Суммарная в. ч. мощность, потребляемая ускоряющей системой, ~23 Мвт.

Как известно, в кибернетическом ускорителе предусмотрено устройство системы автоматического регулирования положения орбиты. Эта система призвана осуществлять автоматическую коррекцию магнитного поля ускорителя для обеспечения надежного прохождения пучка частиц вблизи оси вакуумной камеры. Принцип действия системы заключается в обработке сигналов датчиков поперечных координат пучка и в использовании полученной информации о состоянии магнитного поля для его коррекции.

В кибернетическом ускорителе существенную роль играет выбор метода компенсации искажений конфигурации магнитного поля. Для этой цели предусматривается система корректирующих магнитных линз, расположенных в промежутках между блоками основного электромагнита.

Регулирование смещений орбиты предполагается производить в два этапа: поперечные отклонения пучка частиц **в период инжекции** и поперечные отклонения мгновенной равновесной орбиты **в течение периода ускорения**.

Система автоматического регулирования положения орбиты содержит 264 датчика отклонения пучка (конденсаторного типа) и 528 корректирующих устройств с усилителями, питающими их обмотки. Специальное вычислительное устройство определяет необходимые величины токов в обмотках корректирующих линз по данным сигналов, вырабатываемых датчиками отклонения пучка.

Для регулирования частоты бетатронных колебаний ускоряемых частиц при помощи специального возбудителя создаются бетатронные колебания. На расстоянии от возбудителя, равном целому числу полуволн бетатронных колебаний плюс одна четверть длины волны, устанавливаются сигнальные электроды, напряжение на которых пропорционально смещению центра тяжести сгустка. Из напряжения, возникающего на сигнальных электродах, выделяется некоторая спектральная составляющая. Частота этой составляющей сравнивается с величиной, принятой по расчетам. Сигнал рассогласования управляет током в магнитных линзах, корректирующих градиент управляющего магнитного поля ускорителя. Возмущающее действие, которое возбуждает бетатронные колебания центра тяжести сгустка, должно быть таким, чтобы, с одной стороны, эти колебания существовали в моменты измерения частоты в течение всего времени ускорения и, с другой стороны, чтобы поперечные размеры пучка к концу цикла ускорения существенно не увеличивались.

Предусмотрены и другие системы автоматического регулирования, поддерживающие резонанс между ускоряющим в. ч. электрическим полем и частотой обращения частиц и обеспечивающие формирование нужного числа пучков вторичных частиц.

На модели ускорителя сопоставлялись результаты многочисленных теоретических исследований и расчетов с данными эксперимента.

Остановимся более подробно на описании модели кибернетического ускорителя и результатах, полученных во время экспериментов (рис. 1 и 2).

Кольцевой магнит модели состоит из 100 магнитных блоков, образующих сильнофокусирующую систему типа ФОДО. Блоки расположены поочередно внутри и вне орбиты. В магнитной структуре ускорителя 10 суперпериодов, в каждый из которых входит пять магнитных периодов (фокусирующий магнит, промежуток, дефокусирующий магнит, промежуток). Полярные башмаки имеют весьма крутой профиль с показателем спада магнитного поля $n = -\frac{r}{B} \frac{dB}{dr} = 191$. Поперечная фокусирующая сила магнитной системы характеризуется числом бетатронных колебаний за оборот $Q = 6,25$. Для ускорителя с диаметром электромагнита, равным 17 м, это соответствует очень большой фокусирующей силе. Благодаря этому при весьма скромной энергии инжекции в один Мэв максимальный размер пучка в вакуумной камере менее 8 мм (без учета синхротронных колебаний). Размеры сечения вакуумной камеры лишь немного больше апертуры, занимаемой свободными бетатронными и синхротронными колебаниями.

Из-за малых поперечных размеров вакуумной камеры откачка ее до необходимого рабочего давления в $5 \cdot 10^{-7}$ мм рт. ст. производится при помощи вакуумной системы, состоящей из кольцевой трубы, имеющей сечение, во много раз превышающее сечение вакуумной камеры. Эта труба (коллектор) подсоединенена в 20 равноотстоящих точках к камере. Она выполнена из нержавеющей стали и откачивается пятью титановыми насосами. Все уплотнения между элементами вакуумной камеры выполнены из индия.

Электромагнит имеет несколько больший зазор (24 мм на оси камеры), чем это необходимо для размещения вакуумной камеры и допускает использование корректирующих полюсных обмоток. Наличие, наряду с 40 корректирующими линзами, расположенными между магнитными блоками, корректирующих полюсных обмоток позволяет проводить большой комплекс исследований движения частиц в магнитном поле с различной зависимостью напряженности магнитного поля от радиуса. Корректирующие полюсные обмотки и корректирующие линзы питаются системой, состоящей из 28 реверсивных тиристорных усилителей и 88 реверсивных транзисторных усилителей. Входы усилителей могут соединяться с многоканальным функциональным генератором, на вход которого от интегратора подводится напряжение, пропорциональное напряженности магнитного поля, или с аналоговыми выходами управляющей электронно-вычислительной машины типа «Днепр-1».

Для того чтобы в процессе эксперимента вводить в магнитную систему контролируемые возмущения и изучать их влияние на поведение пучка, блоки электромагнита были выполнены с возможностью большей

точностью. Для получения жестких геометрических допусков при изготавлении пластин сердечника блоков электромагнита применялась последовательная штамповка тремя штампами (последний штамп прецизионный твердосплавный). Кроме того, применялись контролируемая прецизионная термообработка и перемешивание пластин, общее число которых достигало 120 тыс. На каждый из 100 блоков составлялся индивидуальный магнитный паспорт, данные которого вводились в электронно-вычислительную машину М-20; по результатам расчета этой машины блоки расставлялись по периметру ускорителя оптимальным образом. По измерениям отклонения пучка было найдено, что эквивалентная геометрическая погрешность, включая и разброс магнитных характеристик железа, соответствовала 30 мк. Все магнитные измерения производились при помощи специально разработанных прецизионных полуавтоматических магнитометров, в которых сравнивались напряженность и градиент магнитного поля в измеряемом блоке с этими же величинами в блоке, принятом за эталон.

В модели ускорителя предусмотрены 2 режима инжекции:

а) протоны инжектируются при постоянном магнитном поле в кольцевом магните; возрастание магнитного поля начинается после процесса циркуляции частиц в вакуумной камере в течение нескольких сотен микросекунд. Этот режим характерен для каскадного протонного синхротрона при постоянном магнитном поле с накоплением частиц, ускоренных в течение ряда последовательных циклов предыдущим каскадом ускорителя;

б) протоны инжектируются при растущем магнитном поле, как это делается в 76 Гэв-ной машине в Серпухове. Инжекция частиц в модели производится от электростатического генератора Ван-де-Граафа. При помощи специально принятых мер удается обеспечить постоянство энергии инжектируемых сгустков частиц с точностью 0,1%.

В модели ускорителя установлены 15 в.ч. ускоряющих станций, частота напряжения которых в 5 раз больше частоты обращения частиц. Это соответствует диапазону частот $1,25 \div 15,0$ Мгц.

Подавление когерентных синхротронных колебаний производится обычными методами с использованием данных о радиальном положении пучка и датчика фазы пучка относительно фазы в.ч. ускоряющего напряжения. В качестве датчиков смещения пучка от оси камеры применены электростатические электроды, расположенные в 20 точках по периметру ускорителя.

Наведенные на электростатические пластины сигналы усиливаются широкополосными электронными усилителями и после детектирования превращаются в сигналы, величины и знаки которых характеризуют величины и знаки смещения пучка от оси камеры в 20 точках. Путем обработки выходных сигналов получают информацию о возмущениях, приведших к этому сдвигу орбиты.

Можно разложить измеренное возмущение орбиты по системе ортогональных функций, характеризующих данную магнитную структуру,

и осуществлять регулирование так, чтобы амплитуды наиболее опасных компонент были существенно уменьшены. Для случая, когда период бетатронных колебаний много больше периода магнитной структуры ускорителя, система ортогональных функций близка к тригонометрической системе, в которой наиболее существенны гармоники, близкие к частоте бетатронных колебаний Q . При инжекции пучка в ускоритель с малоапертурной вакуумной камерой может оказаться, что пучок до попадания на стенку камеры пройдет лишь часть периметра ускорителя. В этом случае не будет получена необходимая для указанного метода информация о поведении по всему периметру ускорителя. Поэтому в качестве системы регулирования положения пучка при отработке «первого оборота» следует применить систему регулирования по участкам.

При данном методе измеряется отклонение пучка от оси камеры в конце каждого из многих участков, на которые разбита магнитная структура ускорителя, и это отклонение сводится при помощи корректирующего магнита к нулю. Сигналом для усилителя, регулирующего ток в обмотке корректирующего магнита, является усиленный сигнал от датчика положения. Сводя к нулю отклонения пучка от оси вакуумной камеры в последовательно расположенных по периметру ускорителя точках, можно осуществить проводку пучка через всю камеру ускорителя. Вычисления показывают, что число таких участков регулирования может быть не очень велико. Так для ускорителя на 1000 Гэв с периметром равным 17 км при возможных погрешностях в магнитном поле требуется всего 250 участков.

В модели кибернетического ускорителя периметр кольцевого магнита разбит на 20 участков. Таким образом в пределах каждого периода бетатронных колебаний орбита частиц корректируется примерно в трех точках.

Из всего комплекса экспериментов на модели кибернетического ускорителя наибольший интерес представляют те, которые должны проверить правильность расчетов основных параметров ускорителя и возможность ускорения протонов в малоапертурной вакуумной камере. Не менее важны также эксперименты по проверке работоспособности реальной системы автоматического регулирования совместно с пучком протонов.

Как показали проведенные эксперименты, параметры фокусирующей системы обеспечивают такую фокусировку пучка от инжектора (при токе 1 ма), что весь пучок, инжектированный в ускоритель, совершает первый оборот без потерь. Для проводки пучка использовались датчики положения и интенсивности, расположенные вдоль ионопровода и кольца ускорителя. Включение системы автоматического регулирования по участкам на «первом обороте» привело после преодоления трудностей (связанных с помехами от прямого попадания пучка на электроды датчиков) приблизительно к пятикратному уменьшению первоначального отклонения пучка от оси камеры.

Первоначальные отклонения пучка от оси вакуумной камеры, обусловленные неточностью расстановки магнитных блоков и нейдеальностью их магнитных характеристик, достигали 3—4 мм. Включение системы регулирования «по участкам» сокращало эти отклонения до величины меньшей 1 мм. Для получения значительно большего первоначального отклонения напряженность магнитного поля в одном из магнитных блоков была снижена приблизительно на 10% путем замыкания части обмотки. Включение системы регулирования позволило автоматически выправить также и это возмущение. Величина подавления отклонений определялась выбранным коэффициентом усиления в замкнутом кольце регулирования.

На модели кибернетического ускорителя в настоящее время осуществлено ускорение протонов до энергии 700 Мэв, т. е. до энергии, которая могла быть еще получена без системы коррекции насыщения электромагнита. Инжекция протонов производилась при постоянном магнитном поле; после циркуляции в течение нескольких сотен микросекунд начинался рост магнитного поля.

Значительный интерес представляет факт ускорения протонов в ускорителе с электромагнитом, имеющим сравнительно большую нелинейность магнитного поля, характерную для электромагнита с высоким градиентом.

На модели кибернетического ускорителя предполагается дополнительно осуществить широкую программу исследований. Однако, уже проведенные эксперименты подтвердили возможность ускорения пучков протонов в ускорителях с малоапertureными камерами, а также реализуемость работы систем автоматического регулирования параметров, определяющих бетатронные колебания, по данным о положении пучка частиц в ускорителе (рис. 3).

Вопросам регулирования положения пучка частиц в модели ускорителя на 1 Гэв при помощи управляющей вычислительной машины типа «Днепр» будет посвящен на настоящей конференции отдельный доклад группы сотрудников Радиотехнического института АН СССР, возглавляемой А. А. Васильевым. Поэтому мы ограничимся лишь замечанием, что эти исследования привели к вполне удовлетворительным результатам при очень скромных параметрах ЭВМ «Днепр». Эта машина имеет среднее быстродействие всего 8—10 тысяч операций в секунду и емкость оперативного запоминающего устройства до 4096 слов.

Основные параметры большого кибернетического ускорителя, соответствующие трем этапам, приведены в следующей таблице:

Таблица 1

	Параметры ускорителя	I этап	II этап	III этап
1	Энергия эжекции (Гэв)	500	1000	4000—5000
2	Интенсивность (прот/сек)	$2 \cdot 10^{12}$	$3 \cdot 10^{13}$	10^{13}
3	Диаметр (м)	5435	5435	5435
4	Максимальное магнитное поле (кгс)	8	16	60—80
5	Апертура	$40 \times 66 \text{ мм}^2$	$40 \times 66 \text{ мм}^2$	$\varnothing 66 \text{ мм}$
6	Вес электромагнита (т)	18000	18000	60 тн сверхпр.
7	Частота повторений (имп/мин)	10	20	5
8	Прирост энергии за оборот (Мэв)	12	56	60
9	Энергия инжекции в главном кольце (Гэв)	6	18	18
10	Число бетатронных колебаний	34,25	34,25	34,25
11	Число сигнальных электродов	264	264	264
12	Число корректирующих магнитных линз	528	528	528
13	Частота ускоряющего напряжения (Мгц)	~ 120	~ 120	~ 120

Очевидно, в первую очередь надо будет сосредоточить усилия на создании сильнофокусирующего электромагнита с железным сердечником с максимальной напряженностью магнитного поля в 16 килоэрстед. Однако, все проектирование должно вестись так, чтобы впоследствии, когда возможности нашей криогенной техники существенно возрастают, можно было бы, после соответствующей подготовки, к которой мы уже приступили, магнитные блоки обычного типа заменить на сверхпроводящие устройства, которые позволили бы в той же вакуумной камере получить максимальные напряженности магнитного поля до 60—80 килоэрстед и, таким образом, получить пучки ускоренных частиц с энергией до 4000—5000 Гэв.

Естественно, что наличие криогенных установок сделает целесообразным рассмотрение вопроса и о снижении в.ч. потерь в ускоряющих станциях.

Собственно говоря, еще до начала реализации «железного» варианта электромагнита надо сделать проекты трех этапов сооружения ускорителя на 500 Гэв, 1000 Гэв и 4000—5000 Гэв для того, чтобы впоследствии переход к большому ускорителю потребовал минимум времени и затрат.

В заключение разрешите познакомить Вас с несколькими рисунками, дающими представление о проекте кибернетического протонного синхротрона на 1000 Гэв (рис. 4, 5, 6). Изучение этого вопроса с технико-экономической стороны привело нас к выводу, что наиболее целесообразным будет размещение главного кольца в подземном туннеле, выполненным по методам, разработанным и реализованным при строительстве Московского метрополитена глубокого заложения. Имеется в виду использовать проходческие «щиты» с кольцевыми железобетонными элементами, являющимися стенками цилиндрической части туннеля. Примерная стоимость погонного километра туннеля составляет около 1 млн. рублей.

Если будут приняты соответствующие решения, то, я полагаю, что

ускоритель на 1000 Гэв мог бы быть реализован к концу семидесятых годов, а на 5000 Гэв -- примерно десятью годами позже.

От всей души желаю всем присутствующим на этой конференции быть либо участниками, либо свидетелями этих событий.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Бурштейн Э. Л., Васильев А. А., Минц А. Л., Петухов В. А., Рубчинский С. М., Докл. АН СССР, 141, 590 (1961).
2. Бурштейн Э. Л., Васильев А. А., Минц А. Л., Петухов В. А., Рубчинский С. М., Атомная энергия, 12, 111 (1962).
3. Бурштейн Э. Л., Васильев А. А., Минц А. Л., Межд. конф. по ускорителям, Дубна 1963, М. 1964, стр. 67.
4. Водопьянов Ф. А., Межд. конф., по ускорителям. Дубна 1963, М. 1964, стр. 213.
5. Бацких Г. И., Васильев А. А., Дзержач А. И., Минц А. Л., Сосенский Н. Л. Межд. конф. по ускорителям, Дубна 1963, М. 1964, стр. 217.
6. Бурштейн Э. Л., Межд. конф. по ускорителям, Дубна, 1963, М. 1964, стр. 860.
7. Васильев А. А. Межд. конф. по ускорителям. Дубна 1963, М. 1964, стр. 865.
8. Бурштейн Э. Л., Межд. конф. по ускорителям, Дубна 1963, М. 1964, стр. 863.
9. Дзержач А. И. и Карпов В. А., Межд. конф. по ускорителям, Дубна 1963, М. 1964, стр. 867.
10. Васильев А. А., Межд. конф. по ускорителям, Дубна 1963, М. 1964, стр. 871.
11. Дзержач А. И., Сосенский Н. Л., Межд. конф. по ускорителям, Дубна, 1963, М. 1964, стр. 874.
12. Сосенский Н. Л., Межд. конф. по ускорителям, Дубна 1963, М. 1964, стр. 878.
13. Burshtein E. L., Vasiliev A. A., Dzergach A. I., V Int. Conf. on High Energy Accelerators, Frascati 1965, p. 34.
14. Vasiliev A. A., IEEE Trans., NS-14 (3), 1186 (1967).
15. Mints A. L., Vasiliev A. A., Burshtein E. L., Proc. Sixth Int. Conf. on High Energy Accelerators, Cambridge 1967, p. 4.
16. Mints A. L., Vasiliev A. A., Dzergach A. I., Sosensky N. L., Batskikh G. I., Proc. Sixth Int. Conf. on High Energy Accelerators, Cambridge 1967, p. 352.
17. Vasiliev A. A., Sosenky N. L., Dzergach A. I., Mironov E. S., Proc. Sixth Int. Conf. on High Energy Accelerators, Cambridge 1967, p. A-100.
18. Vodopianov F. A., Gütner B. M., Elian V. V., Kalinin A. A., Litvinov V. N., Proc. Sixth Int. Conf. on High Energy Accelerators, Cambridge 1967, p. A-115.
19. Бурштейн Э. Л., Васильев А. А., «Тенденции развития протонных ускорителей на сверхвысокие энергии», Труды Всесоюзн. совещан. по ускорителям, , 1968 г., М., ВИНИТИ, 1969 (в печати).
20. Антонов Ю. Н., Васильев А. А., Курочкин В. А., Урлин Б. М., «Ускоряющая система кибернетического ускорителя протонов на энергию 1000 Гэв», Труды Всесоюзн. совещ. по ускорителям 1968 г., М., ВИНИТИ, 1969 (в печати).
21. Водопьянов Ф. А., Гутнер Б. М., Душин Ю. Ф., Литвинов В. Н., «Система генерирования ускоряющего поля бустера кибернетического ускорителя на энергию 1000 Гэв», Труды Всесоюзн. совещ. по ускорителям 1968 г., М., ВИНИТИ, 1969 (в печати).
22. Васильев А. А., Андрющенко-Луценко Н. И., Владимиров В. В., Латышев Г. А., Мещеров Р. А., «Электромагнит модели кибернетического ускорителя», Труды Всесоюзн. совещ., по ускорителям 1968 г., М., ВИНИТИ, 1969 (в печати).
23. Васильев А. А., Бацких Г. И., Кленов Г. И., «Электростатический инжектор малоапертурного ускорителя», Труды Всесоюзн. Совещ. по ускорителям 1968 г., М., ВИНИТИ, 1969 (в печати).
24. Васильев А. А., Дзержач А. И., Скепский Г. П., Алешин В. Ф., «Измерение маг-

- нитных полей с большим градиентом», Труды Всесоюзн. совещ. по ускорителям 1968 г., М., ВИНИТИ, 1969 (в печати).
25. Андрющенко-Луценко Н. И., Васильев А. А., Дзергач А. И., Кузьмин В. Ф., Рубчинский С. М., Соловьев Г. И., «Вопросы применения цифровых вычислительных машин для управления режимами ускорителей», Труды Всесоюзн. совещ. по ускорителям 1968 г., М., ВИНИТИ, 1969 (в печати).
 26. Векслер В. И. Атомная энергия, № 5 (1957).
 27. Veksler V. I., Sarantsev V. P., et al., Proc. Sixth Int. Conf. on High Energy Accelerators, Cambridge 1967, p. 289.
 28. Symposium on Electron Ring Accelerators, LRL, Berkeley, California 1968.

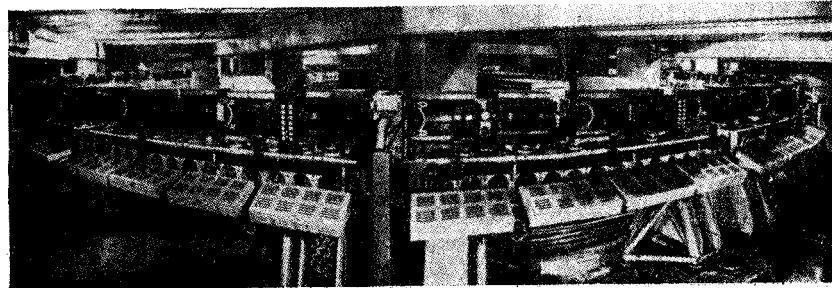


Рис. 1. Общий вид модели кибернетического ускорителя.

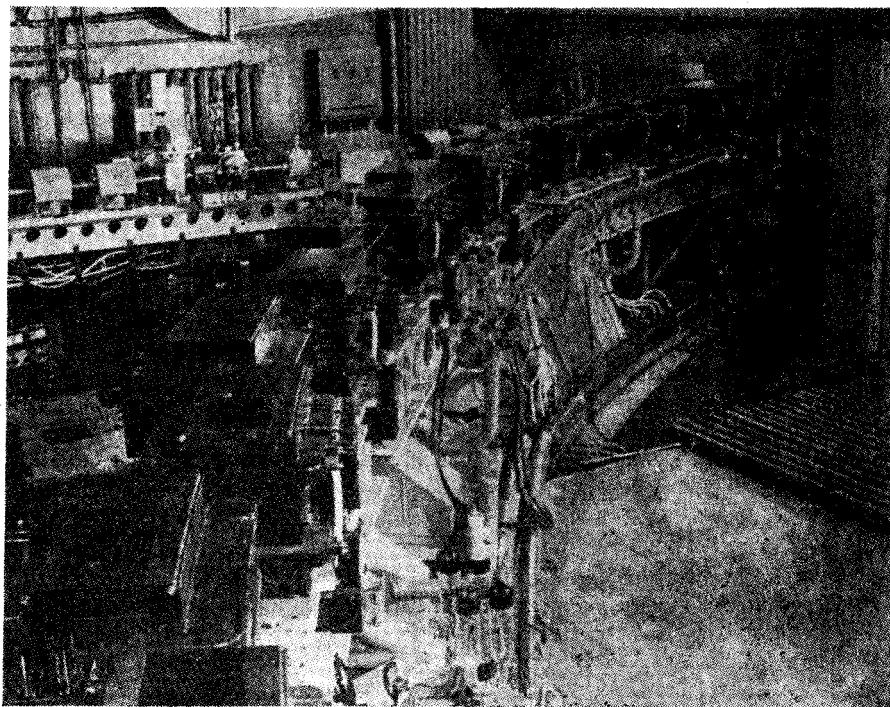


Рис. 2. Вид участка модели кибернетического ускорителя.

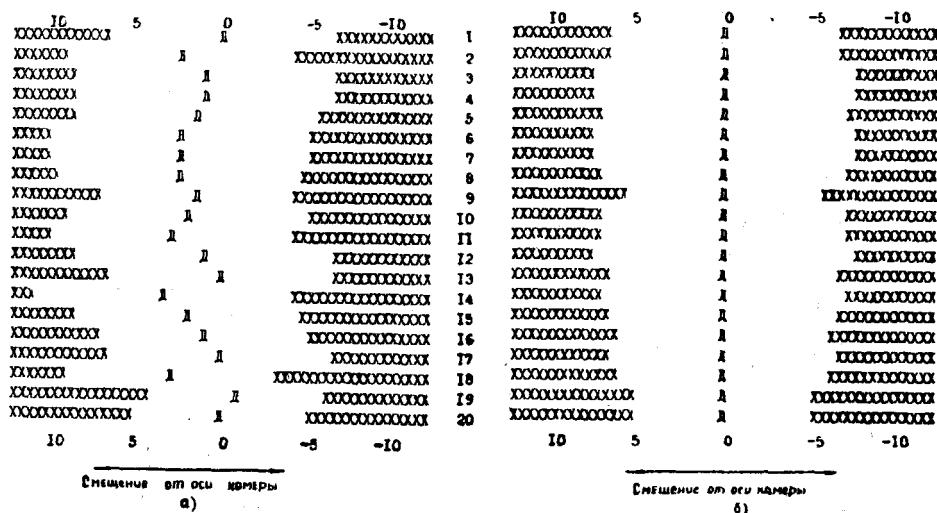


Рис. 3. Область (по радиусу), в которой может перемещаться пучек (не заштрихована), до (а) и после (б) регулирования. Пучек смещается по обе стороны от оси камеры до достижения границ (пропадание пучка). Буквой Д обозначена точка посередине между границами.

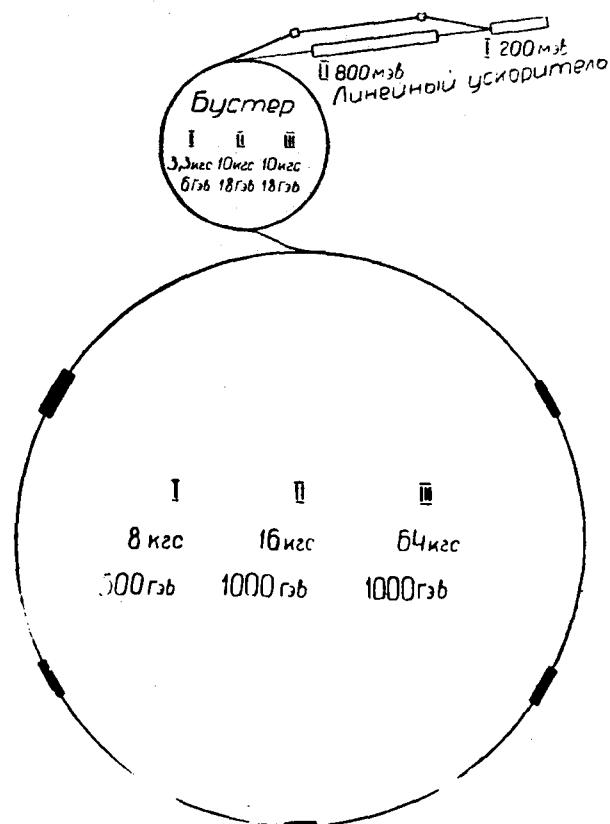


Рис. 4. Схема трех этапов проектирования ускорителя.

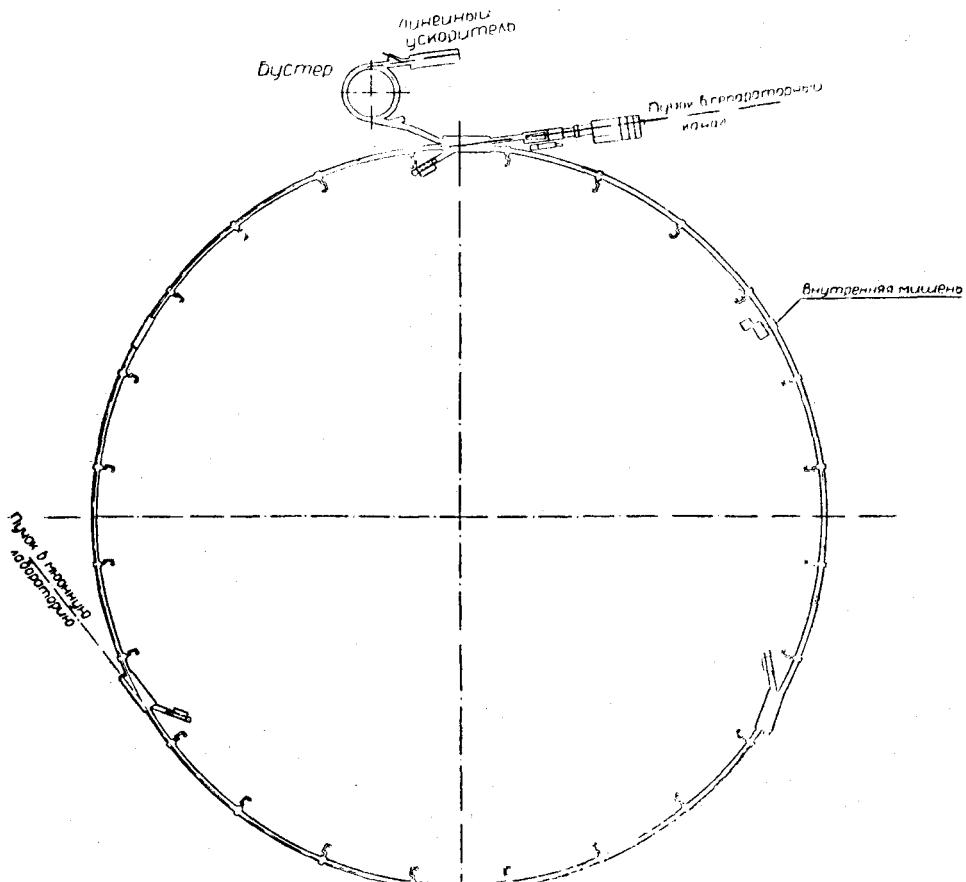


Рис. 5. План кибернетического ускорителя.

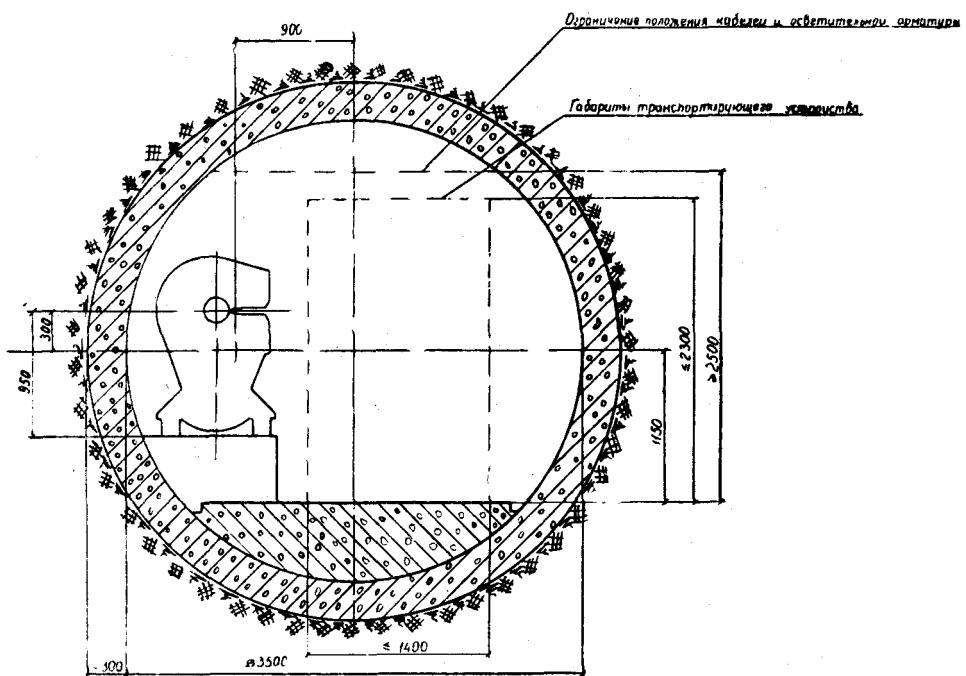


Рис. 6. Сечение тоннеля большого кольца,