

индекс 3624

Редактор Л.П.Мукаян
Тех.редактор А.С.Абрамян

Заказ 344

ВФ-03415

Тираж 299

Подписано к печати 13/IX-78г. Формат издания 60x84/16

3,5 уч.изд.л. Ц. 25 к.

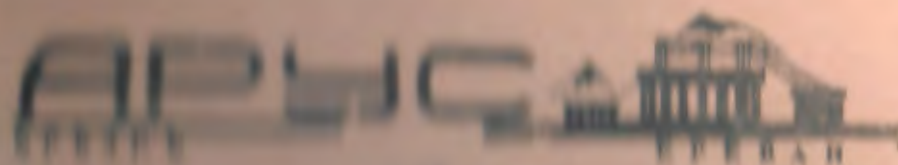
Издано Отделом научно-технической информации
Ереванского физического института, Ереван-36, пер.Маркяна 2

ԵՐԵՎԱՆԻ ԶՐԶՐԿՏՅՐ ԲՆՈՒՐՅՈՒՄ
ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ВФ-03415-78

Ա.Ս.ՄԱՏՐՈՍ, Վ.Ս.ՎԱՐՈՅՈՒՄ, Կ.Ս.ՎԱՐՈՅՈՒՄ,
Դ.Ն.ՎՈՏԱՅԱՆ, Ա.Ս.ՎՈՇՈՒՄ, Դ.Վ.ՄԱՐՏԻՐՈՍԻ,
Ս.Ա.ՄԱՐՏԻՐՈՍԻ, Դ.Դ.ՕՂԱՅԱՆ, Լ.Լ.ՅՈՒՆԻ,
Օ.Ա.ԱՐԱՅԱՆ

СПЕЦИАЛЬНО ПОДГОТОВЛЕННЫЙ НАКОПИТЕЛЬ ЭЛЕКТРОНОВ НА ЭНЕРГИЮ
2,5 ГЭВ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ПУЧКОВ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
ЕРЕВАНСКОГО ФИЗИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА



О Г Л А В Л Е Н И Е

Введение	3
Обоснование проектных параметров	6
Магнитная система накопителя	10
Система питания электромагнита накопителя	12
Вакуумная система	13
Ускоряющая и в.ч.система.....	16
Система и линии инжекции в накопитель	19
Бустерный синхротрон.....	22
Основные задачи систем коррекции, контроля и управления накопительным комплексом	25
Расположение и привязка накопительного комплекса	
ЕРСИНЭ относительно существующего ускорителя на 6 Гэв. 27	
Таблицы	30
Рисунки	

© Ереванский физический институт, 1978

В В Е Д Е Н И Е

С 1975 года в Ереванском физическом институте изучается проблема создания специализированного источника синхротронного излучения (СИ) — накопителя электронов, генерирующего излучение с критической длиной волны в спектре $2 + 2,5 \text{ \AA}$. Такой источник позволит развивать экспериментальные исследования в основных фундаментальных и прикладных направлениях дисциплин, изучающих надядерное строение материи с использованием электромагнитного излучения в широком интервале длин волн.

Возникновение проблемы создания специализированного источника СИ стимулировалось тем, что на каналах синхротронного излучения действующего в ЕФИ самого крупного в СССР кольцевого ускорителя электронов уже с 1971 года проводятся экспериментальные исследования. Первые обнадеживающие эксперименты [1,2,3] с использованием пучков СИ ускорителя ЕФИ позволили одновременно критически оценить возможности ускорителей, работающих с относительно малой интенсивностью, большим сопровождающим фоном в канале синхротронного излучения, при больших значениях вибраций аппаратуры, создаваемой системой питания электромагнита ускорителя переменным током, специфической временной структурой излучения и, наконец, симбиотическим характером использования ускорителя.

Процесс осознания потенциальной ограниченности существующих пучков синхротронного излучения ускорителей электронов был ускорен вступлением в строй крупных электрон-позитронных накопителей, предназначенных для исследований в области физики высоких энергий таких, как ВЭПП-3 и ВЭПП-2М в ИЯФ СО АН СССР в Новосибирске [4,5], DORIS, в Гамбурге, (ФРГ) [6], SPEAR

в Стенфорде (США) [7], в Орсе (Франция) [8].

Уже первые эксперименты, проведенные на пучках СИ накопителей показали, что они свободны от ряда перечисленных выше недостатков, а время экспозиции примерно на полтора-два порядка меньше, чем на пучках ускорителей. Это позволило значительно расширить круг задач, которые потенциально можно решить с использованием пучков СИ.

Ряд обзоров работ, выполненных в различных центрах, и разработанные программы исследований [9-14], охватывающие все основные научные направления, показали перспективность следующего этапа - создание специализированных источников синхротронного излучения, физическая программа которых полностью подчинена экспериментам с использованием синхротронного излучения. Проекты таких источников разрабатываются и начали уже осуществляться в Англии (SRs, Даресберийская лаборатория [15]), NSLS в США (Брукхавенская национальная лаборатория [16]), INS-SOR в Японии (Национальная лаборатория по физике высоких энергий в г. Цукуба, близ Токко [17]). Есть данные о намерениях создать подобные специализированные источники в ряде европейских центров, и в частности в Восточном Берлине и в Амстердаме (Нидерланды) [14]. Специализированный источник СИ планируется построить и в ВНР [18].

Вероятно очевидно, что снабжение научных центров СССР источниками СИ является первоочередной задачей настоящего времени. Эти источники должны быть сравнительно равномерно распределены по основным научным и промышленным регионам СССР в целях повышения научной активности и развития потенциальных возможностей организации, заинтересованных, как в научных, так и на-

родно-хозяйственных применениях пучков СИ.

С этой точки зрения региональный специализированный накопитель, который предполагается построить в Ереване, позволит обеспечить пучками СИ научные и промышленные учреждения, научно-производственные объединения и ВУЗ-ы республик Закавказья, южных областей РСФСР, Украины.

Создание специализированного накопителя на базе ЕФИ обосновано следующими соображениями. Во-первых, в ЕФИ имеется уже готовый инжектор-синхротрон на энергию 5-6 ГэВ. Здесь сосредоточен опыт создания, запуска и длительной эксплуатации большой группой подготовленных специалистов крупнейшего в СССР ускорителя электронов. Во-вторых, в ЕФИ уже сформировались научные группы, которые развернули самостоятельно и в сотрудничестве с другими организациями и университетами страны программу исследований на пучках синхротронного излучения в основных научных направлениях (физика твердого тела, кристаллография, биология и др.). Опыт работы и экспериментальное оборудование, которые будут накоплены и созданы этими группами к моменту запуска специализированного источника, значительно повысит эффективность его использования, как внутренними, так и внешними группами. В третьих, в ЕФИ существуют и расширяются производственные мощности, позволяющие осуществить разработку и изготовление опытных образцов оборудования, которые в дальнейшем могут быть в необходимом количестве выполнены на других предприятиях.

Для краткости проект условно назван ЕРСИНЭ, т.е. Ереванский специализированный источник синхротронного излучения - накопитель электронов.

ОБОСНОВАНИЕ ПРОЕКТНЫХ ПАРАМЕТРОВ

Проектные параметры специализированного накопителя определяются и оптимизируются на основании выбора значения критической длины волны λ_c в спектре СИ, интенсивности потока фотонов N_γ ($\Delta\lambda/\lambda = 10^{-3}$, $\Delta\theta = 10^{-3}$ рад.сек $^{-1}$), и требуемого минимального числа выводов синхротронного излучения (каналов излучения). Эти параметры пучков определяют предельную энергию накопленных частиц E_0 при выбранном радиусе закругления траектории в магнитном поле ρ , величину накопленного тока I_0 и соответственно необходимую мощность высокочастотных генераторов, питающих ускоряющую систему. Выбор радиуса закругления и среднего радиуса R кольцевого электромагнита определяют также и число полноценных стандартных каналов излучения, формируемых в заворачивающих магнитах, которые должны обеспечить выполнение основной части программы экспериментальных исследований. Вместе с тем должно быть определено и число каналов излучения, снабженных специальными устройствами генерации излучения - омдупляторным или виглер-магнитами [19], с помощью которых спектр излучения смещается в область более коротких длин волн.

ЕРСИНУ, ввиду универсального состава планируемых потребностей, должен обеспечить проведение исследований во всех известных на сегодняшний день основных направлениях научного и технического применения пучков СИ. Эти направления, требуемый интервал длин волн, $\lambda_{max} - \lambda_{min}$, и число работ вышедших во всем мире в настоящее время по каждому из направлений представлены в таблице 1. Таблица составлена на основании обработки литературных источников [20 + 21]. Приведенные данные определяют наиболее интересную и используемую в настоящее время

часть спектра СИ. Можно полагать, что эти пропорции сохранятся и в ближайшие 5-10 лет, что позволит оценить перспективность развития соответствующих методик и аппаратуры на специализированном накопителе.

Принципиально спектр излучения в области коротких волн, должен простираться до $\lambda_{min} \approx 0,1 \text{ \AA}$, что позволит перекрыть К-линии поглощения всего доуранового ряда элементов периодической системы. Однако, потребность в той или иной области спектра не одинакова. Действительно, для EXAFS, одной из наиболее перспективных методик, нуждающейся в коротковолновой части (см. таблицу 1), наиболее интересными элементами для решения, например, проблемы функции металлосодержащих белков являются Fe, S, Ca, Cu [30,31]. Спектры Ti, Si, Zn, Ag, - необходимы при исследованиях свойств аморфных тел и в частности оптико-механических и термо-электрических свойств стекол. Вещества Cz, Al, Cu, Rh, Co, Mo, Ni, W, Mn, Ti, - очень важны при исследовании с помощью EXAFS реакции катализа, изучении динамики каталитического процесса, включая биологические катализаторы - ферменты. Из всех перечисленных элементов только Ti, W и Au имеют К-край поглощения $\lambda_{K\alpha} < 0,2 \text{ \AA}$. Выбор значения λ_{min} в области $0,2 + 0,3 \text{ \AA}$ позволит также перекрыть К-линии поглощения большей части элементов типа редких земель, представляющих большой интерес для целого ряда задач химии, биологии, космической геологии и т.д. Коротковолновая часть спектра необходима и для методики фотоэлектронной спектроскопии, в которой часть потенциально решаемых проблем исследований на пучках СИ с заданным значением λ_c также определяется отношением числа элементов, энергия К-края поглощения которых

ниже энергии фотонов с $\lambda = \lambda_{min}$, к общему числу элементов доуранового ряда периодической таблицы. Если выбрать

$\lambda_{min} = 0,27 \text{ \AA}$, то потенциально, число задач сосредоточенных в области $0,1 \div 0,27 \text{ \AA}$, составит приблизительно 10% от общего числа исследований, проводимых на пучках СИ. С этой точки зрения число каналов, снабженных специальными виглер-магнитами, обеспечивающих $\lambda_{min} = 0,1 \text{ \AA}$, должно быть также порядка 10% от общего числа каналов излучения. Если считать $\lambda_{min} = 0,12 \lambda_c$ ($\lambda_{min} = 0,27 \text{ \AA}$), на которой интенсивность \sim в 10^3 меньше, чем в максимуме спектра излучения, то $\lambda_c = 2,3 \text{ \AA}$.

Интенсивность потока фотонов в стандартном канале излучения определяется сечением исследуемых процессов, чувствительностью регистрирующей методики и требуемым временем экспозиции. Для большинства задач, использующих известные методы регистрации с помощью ионизационных камер, фотозумльсий или фотоэлектронных умножителей для времен экспозиции $\Delta T_{эксп} = 1 \div 10$ сек требуется $1 \div 2 \cdot 10^{13}$ фотонов сек^{-1} , град^{-1} и $\Delta\lambda/\lambda = 10^{-3}$.

Спектральные кривые в этих интервалах для стандартного канала излучения (а) и для канала, снабженного виглер-магнитом с напряженностью поля, равной 5 Т (б), показаны на рис.1.

При оценке минимального числа портов излучения используется существующий опыт загрузки каналов синхротронного излучения ведущих центров, таких как SPEAR, Стенфорд (США) и DESY, Гамбург (ФРГ). Согласно опубликованным данным [12] на пучках накопителя SPEAR выполняется $\sim 60-65$ работ в год, или 30 работ/год-канал. Эта цифра стабильно повторяется в течение последних лет и, по-видимому, близка к максимуму. Возможное увеличение накопленного тока после перехода SPEAR на много-

банчевый режим работы, по-видимому, не приведет к значительному увеличению числа работ, так как одновременно будут расти требования к повышению точности полученных результатов, что и будет скомпенсировано повышением силы тока. Мы ожидаем, что число исследовательских групп, территориально тяготеющих к источнику СИ в Ереване в ближайшие 10-15 лет составит 100 \div 120. Каждая группа по-видимому будет в состоянии выполнить в среднем 4 \div 5 работ/год. Тогда полное число работ в год составит 400 \div 600. Отсюда, проектируемое число каналов должно быть

15 \div 20. Однако в конструкции вакуумной камеры и здания накопителя, должны быть заложены возможности увеличения числа портов в 1,5 \div 2 раза, поскольку это, помимо всего прочего, означает возможность повышения коэффициента использования накопителя в такое же число раз.

Одновременно, исходя из предыдущего анализа, число каналов, снабженных виглер-магнитами должно быть 2 \div 3. Динамика роста числа исследовательских групп, использующих пучки СИ в США примерно такая же. В течение 10 лет от 1976г. по 1986 г. в США это число должно возрасти примерно в 5 раз и составит ~ 700 групп [12].

Значение энергии накопленных частиц и напряженности управляющего поля, обеспечивающие требуемое λ_c , определяются из ряда конструктивных и экономических соображений, основными из которых являются оптимизация капитальных затрат при строительстве и создании накопителя и минимизация энергопотребления в процессе эксплуатации машины. С этих точек зрения напряженность магнитного поля в заворачивающих магнитах выбрана равной 1,3 Т и радиус закругления 6,4 м. Энергия электронов

на орбите, соответствующая этим параметрам, равна 2,5 Гэв.

МАГНИТНАЯ СИСТЕМА НАКОПИТЕЛЯ

Выбор структуры магнитной системы и жесткости фокусировки (значения частот бетатронных колебаний ν_z и ν_x) основан на достижении максимальной плотности фотонов при транспортировке пучка СИ на расстояние ℓ от места возникновения излучения до входной щели шириной $2h$ экспериментальной установки, располагаемой на некотором конечном расстоянии от накопителя. Эта величина ξ является функцией ϵ_{x0} и ϵ'_{x0} параметров нормального распределения накопленных электронов на фазовой плоскости в заданном сечении кольца S_0 , которые в свою очередь зависят от значений $\beta(s)$ - функций и ее производной в точке S_0 и экстремальных значений β_{max} , β'_{max} .

Результаты расчета ϵ_{x0} , ϵ'_{x0} и ξ в интервале частот ν_z , ν_x от 4,2 до 6,2 для $\ell = 10$ м и $2h = 1$ мм приведены в таблице II. Здесь S_1 и S_2 означают соответственно координаты середин заворачивающих блоков, следующих за F и D линзами. Из таблицы видно, что величина ξ имеет максимум при ν_z и ν_x , равных соответственно 5,2 и 5,15. Оптимальное число периодов градиента, которое обеспечивает полученные значения ν_z и ν_x есть 16. При этом набег фазы на период градиента $\mu = 117^\circ$.

Структура периода градиента выбрана соответственно формуле: $F\hat{O}D\hat{B}O$, где \hat{O} - означает короткий свободный промежуток. Расположение элементов на одном периоде градиента, расстояние между ними, а так же продольные и поперечные размеры элементов показаны на рис.2. На этом же рисунке показаны амплитудные функции накопителя: $\beta_z(s)$, $\beta_x(s)$, $\eta(s)$.

Размер большого свободного промежутка равный 3 м выбран из следующих условий. Во-первых, он должен обеспечить возможность установки устройств ввода и посадки частиц на орбиту накопителя при энергии, равной 2,5 Гэв из существующего синхротрона ЕФИ и при более низкой энергии от бустерного синхротрона. Во-вторых, должна быть обеспечена установка ускоряющих резонаторов и при этом в канал синхротронного излучения должно быть выведено излучение с дуги, имеющей размер $\sim 1,5^\circ$.

Малый промежуток, равный 60 см обеспечивает только вывод пучка СИ примерно с такой же длины дуги в магнитном поле. Выбранные размеры свободных промежутков являются предельно возможными значениями, которые удовлетворяют перечисленным требованиям без введения специальных свободных промежутков.

Поперечные размеры рабочей области магнитного поля в заворачивающих магнитах, в квадрупольных и шестиполюсных линзах выбраны из условия достижения времени жизни пучка, ограниченной квантовыми флуктуациями излучения, равной 10^4 часов. Заворачивающие магнитные блоки имеют размер сечения 40×140 мм². Магнитные блоки изготавливаются из листов стали марки "сталь-10" вырезанные в форме буквы "С" без полюсных наконечников. Полюсные наконечники с приклеенными на них обмотками устанавливаются и укрепляются в зазоре основного магнитопровода. Обмотки имеют 2×12 витков.

Радиус вписанной окружности в квадрупольных линзах, равен 45 мм. Значения градиентов в F и D линзах при длине вдоль оптической оси 36 см равны соответственно 11,155 Т/м и 11,5 Т/м. Отношение полуширины апертуры линзы к ее длине, равное 8 обеспечивает хорошую близость расчетного значения силы

линзы к реальному. Линза изготавливается из четырех квадрантов, которые стягиваются с помощью двух колец методом горячей прес-совой посадки. Каждая обмотка квадрупольной линзы содержит 6 витков. Угол отреза гиперболических профилей θ (см. рис. 3а) равен 27° , что обеспечивает минимальные значения мультипольных составляющих [32]. Конструкция квадрупольной линзы показана на рис. 3б.

Для компенсации отрицательной хроматичности $\xi_{x,y} = \frac{\Delta v_{x,y}}{\Delta P/P_0}$, равной для ЕРСИНЭ соответственно $\xi_x = -8,033$ и $\xi_y = -8,25$, перед каждой квадрупольной линзой установлена шестипольсная линза. Форма полюсных наконечников линзы выбрана цилиндрической с углом среза $\theta = 18,6^\circ$ (см. рис. 4а), что устраняет наиболее опасную октупольную составляющую. Радиус вписанной окружности в шестипольсную линзу $r_0 = 56$ мм.

Требуемые значения квадратичной нелинейности в линзах B_F'' и B_D'' равны соответственно: $3I$ т.м⁻² и II т.м⁻² при длине линзы вдоль оптической оси, равной 10 см. Необходимое число ампер-витков на каждом полюсе равно для S_D и S_F соответственно $2,2 \cdot 10^3$ а.в. и $0,78 \cdot 10^3$ а.в. Конструкция шестипольсной линзы показана на рис. 4б.

Общий вид стандартной секции магнитной системы, представляющий собой половину периода градиента или $1/32$ всей магнитной системы показан на рис. 5а, б. Поворотный магнит и линзы собраны на специальном вращающемся приспособлении, позволяющем осуществлять все перемещения и повороты, необходимые для юстировки и пространственной фиксации элементов магнитной системы.

СИСТЕМА ПИТАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГИТА НАКОПИТЕЛЯ

Система питания электромагнита накопителя должна обеспе-

чить максимальную величину тока в обмотках заворачивающих блоков ~ 2200 А и в квадрупольных линзах ~ 2000 А. Стабильность тока должна быть не хуже 10^{-4} . Источник питания должен быть регулируемым и управляемым со стороны ЭВМ. Всем этим требованиям удовлетворяет стандартный источник питания ИСТР-2500, имеющий мощность, равную 100 кВт (2500 А, 40 в), специально разработанный для питания электрофизических установок.

Необходимая мощность для питания одного заворачивающего магнита, равна 17 кВт, квадрупольной линзы 5 кВт и секступоль $\sim 0,5$ кВт. Полная мощность питания составляет 720 кВт. Падающие напряжения при рабочем токе на одном магнитном блоке равно 6,5 в, на квадрупольной линзе 2 в и на шестипольсной линзе -1,5 в. По этой причине для питания заворачивающих магнитов требуется 8 источников типа ИСТР-2500, что обеспечивает равномерное распределение точек включения в электромагните накопителя.

Фокусирующие и дефокусирующие линзы включены последовательно и запитываются отдельными источниками типа ИСТР-2500. Питание шестипольсных линз осуществляется от двух отдельных источников с $I = 50$ А и $U = 30$ в. Полная схема питания электромагнита показана на рис. 6.

ВАКУУМНАЯ СИСТЕМА

Вакуумная система ЕРСИНЭ должна обеспечить остаточное давление, равное 10^{-9} мм.рт.ст. при ускоренном токе, равном 0,8 А. При этом время жизни пучка в камере с поперечными размерами, приведенными выше, составит 10 ч.

Конфигурация вакуумной камеры выбрана из условия отсутствия облучения стенок камеры находящейся в зазоре заворачи-

вающего блока. При этом конструкция камеры и системы откачки упрощаются тем, что исключаются встроенные насосы распределенной откачки [33]. Чертеж участка вакуумной камеры, соответствующий длине периода градиента магнитной системы т.е. I/16 вакуумной камеры накопителя показан на рис.7. Излучение, генерируемое в заворачивающем магните выводится частично в канал излучения (угловая ширина пучка $\Delta\psi$ равно $2,9^\circ$ в канале, следующем за B_F блоком и $5,24^\circ$ за B_D) и на поглотитель излучения, установленный на передней стенке вакуумной камеры. Поглотитель изготовлен из меди и имеет принудительное водяное охлаждение, которое должно отвести тепло при линейной плотности потока энергии, равной 200 вт/см. Для уменьшения плотности падающего излучения на поглотитель, последний установлен в камере под углом 30° относительно передней стенки (см.рис.7). Это позволит уменьшить линейную плотность падающего излучения с 350 вт/см до 175 вт/см при максимально накопленном токе.

Под поглотителем установлен сверх высоко - вакуумный (СВВ) агрегат, состоящий из магниторазрядного насоса НМД-0,25, дублированный распылительным ионно-гетерным насосом с общей скоростью откачки, равной 600 л/сек. В конце каждого канала излучения установлен СВВ шибер, конструкция которого близка к описанной в [34] и поглотитель, рассчитанный на отвод энергии излучения выводимый в канал, линейная плотность которого так же не выше 200 вт/см. Такой поглотитель устанавливается в конце канала, когда канал СИ не имеет потребителя. Вблизи этого поглотителя так же устанавливается СВВ агрегат указанного выше типа и мощности. Участок вакуумной камеры, проходящий через линзы имеет специальную трубку охлаждения с теплоотводом порядка 20 вт/см.

На больших свободных промежутках камеры созданы вакуумные расширения для установки ускоряющих резонаторов. Объем резонаторов порядка $0,6 \text{ м}^3$ также откачивается СВВ агрегатом мощностью 600 л/сек.

Поперечное сечение вакуумной камеры в характерных точках показано на рис.7. Камера изготавливается из листов нержавеющей стали марки Х18Н9Т (немагнитная $\mu = 1 + 1,02$) толщиной 5 мм. Швы камеры варятся аргоно-дуговым методом. Участки вакуумной камеры собираются с помощью болтовых соединений на металлическом уплотнении.

Система откачки состоит из четырех форвакуумных насосов типа ВН-6Г с производительностью 150 л/сек, 16 турбомолекулярных насосов типа ТМН - 200 со скоростью откачки, равной 250 л/сек и 112 СВВ агрегатов со скоростью откачки 600 л/сек.

Для достижения остаточного давления 10^{-9} мм рт.ст. все элементы камеры должны быть прогреты до температуры 400°C в течении 40 часов [35]. С этой целью конструкция вакуумной камеры предусматривает возможность вакуумного отсечения секций, проходящих в зазорах заворачивающих магнитов, их откреплении и установка в специальной печи. Для этого указанные участки камеры снабжены с двух концов прогреваемыми прямопролетными шиберами типа КШ-120.

Участок камеры, проходящий через линзы, установленные в малом прямолинейном промежутке прогревается на месте после сборки всей камеры. Для прогрева на месте участки, проходящие через линзы, и большие прямолинейные участки с расширением для резонаторов обматываются специальным прогревателем. Вакуумная камера укрепляется и встируется с помощью секций установленных в магнитных линзах.

УСКОРЯЮЩАЯ И В.Ч.СИСТЕМА

Выбор параметров ускоряющей в.ч. системы накопителя, таких как частота ускоряющего напряжения, конструкция генераторов и тип используемой лампы оконечного каскада усилителя мощности во многом будут определены позднее, при решении вопросов замены существующей в.ч. системы ускорителя на новую. Такая привязка, по крайней мере, по частоте необходима, так как существующий ускоритель предполагается использовать в качестве инжектора первой очереди для проектируемого накопительного комплекса. Как известно, [36], частота ускоряющего поля синхротрона должна быть повышена в три с лишним раза и находиться в интервале 400-500 мГц. Для проекта ЕРСИНЭ предварительно выбрана частота ускоряющего поля, равная ~ 466 мГц, что соответствует кратности $q = 185$.

Мощность ускоряющих генераторов определяется потерями энергии пучком на синхротронное излучение, и равна ~ 400 квт, при накопленном токе 0,75 А и потерями в цепях сложения и деления мощности усилительных каскадов, потерями в системе транспортировки мощности от мостов сложения и деления к резонаторам, а также потерями, возникающими в стенках самих резонаторов. Потеря энергии частицей за один оборот ~ 540 кэв. Выбранное значение равновесной фазы, равное $\psi_s = 20^\circ$ позволит иметь время жизни, ограниченной квантовой раскачкой продольных и энергетических колебаний, равное 100 часам.

Суммарная амплитуда напряжений на всех резонаторах при этом должна равняться $V = 1,53$ Мв. Если установить на кольцо 4 резонатора, то мощность потерь в них при $R_{\text{ш}} = 6 \cdot 10^6$ ом

составит 50 квт. Потери в системах сложения, деления и транспортировки составят обычно 25-30% от всей генерированной мощности. Отсюда полная мощность в.ч. генераторов должна быть равной ~ 650 квт. Эта цифра может быть существенно уменьшена до значения 430 квт, если на кольце установить 10 резонаторов непосредственно нагружающих оконечные каскады усилителей.

Недостатком такой системы является, то, что сильно растет объем вакуумной камеры накопителя и большое число свободных промежутков оказываются занятыми. С другой стороны возможность наращивания числа ускоряющих станций и генераторов позволяет планомерно наращивать накопленный ток и повышение интенсивности генерированных пучков СИ. Предполагается, что в ближайшие годы будут доступны лампы в требуемом диапазоне длин волн, позволяющие получать на нагрузке мощность, равную 50 квт. При отсутствии таких ламп каскады усиления мощности будут осуществлены на лампе типа ГИ-51 А, выходной мощностью 20 квт в непрерывном режиме. В этом случае накопитель сможет работать только при половинном токе $\sim 0,3$ А.

В настоящем проекте принят второй вариант структуры в.ч. питания.

Ускоряющий резонатор имеет цилиндрическую форму без трубок дрейфа с длиной $0,44 \lambda$ в котором возбуждается волна типа E_{010} . Резонатор устанавливается в расширении вакуумной камеры в большом свободном промежутке. Структурная функциональная схема в.ч. системы и эскиз ускоряющего резонатора показаны соответственно на рис. 8 и 9. Каждый резонатор имеет свой канал усиления мощности с системой автоподстройки частоты резонатора,

регулировкой в.ч. мощности, устройствами защиты и блокировки.

Система фазовой автоподстройки устанавливает и поддерживает необходимые фазовые соотношения для ускоряющих напряжений и вырабатывает опорные синхронизирующие в.ч. сигналы. Взаимодействие отдельных узлов функциональной схемы следующее. С задающего генератора (2) в.ч. сигнал через предварительный усилитель (3) поступает на предоконечный усилитель (4). Усиленный сигнал поступает на делитель мощности (8), где делится на равные части. Делитель мощности представляет собой четверть-волновый резонатор. Ферритовый клапан (5) служит для развязки в.ч. мощности, с делителя через аттенуатор (10) и управляемый фазовращатель (12) поступает на оконечный каскад усиления мощности (14). Резонатор (17) развязан от оконечного каскада ферритовым клапаном (циркулятор). Мощность, поступающая в резонатор регулируется модулятором (15). Сигнал модулятора воздействует на усилитель (14). Модулятор работает в режимах АРУ по току возбуждения, или по напряжению резонатора.

Автоподстройка частоты осуществляется с помощью частотомера (7) или датчика положения механизма перестройки резонатора. Сигнал с частотомера или датчика управляет сервоприводом (13). Разностный сигнал с датчика тока пучка (18) и опорного генератора управляет предварительным усилителем (3).

В систему фазовой автоподстройки входят управляемый фазовращатель (12), фазовый детектор (11), линия опорной фазы (6) и фазометр (9). Разностный сигнал линии опорной фазы и фазометра с фазового детектора управляет фазовращателем (12).

Во время работы в.ч. система может управляться как оператором так и от ЭВМ. Основная задача управления со стороны ЭВМ заклю-

чается в поддержании основных параметров функциональных узлов с заданной точностью около их расчетных значений.

СИСТЕМА И ЛИНИИ ИНЖЕКЦИИ В НАКОПИТЕЛЬ

Система инжекции должна быть осуществлена в две очереди. Первая очередь инжекции осуществляется из существующего электронного синхротрона ЕФИ при рабочей энергии частиц, равной 2,5 ГэВ. Вывод пучков электронов из ускорителя осуществляется с помощью системы однооборотного вывода состоящего из ферритового кикер-магнита длиной 0,5 м с максимальным полем, равным ~ 250 э, устанавливаемого в прямолинейном плюс-плюс промежутке между 24 и 25 магнитными блоками и отклоняющего септум магнита, имеющего так же длину 0,5 м. Поле в септум магните равно 1,6 Тл., что позволяет отклонить пучок на угол 0,1 рад и вывести его по пучкопроводу в тракт инжекции. Схема тракта инжекции показана на рис.10. Время нарастания переднего фронта импульса тока в кикере равно 250 нсек, что обеспечивает выброс 60% всех частиц, ускоряемых на орбите. Длительность импульса тока отклоняющего септум магнита равна 10^{-4} сек, что позволяет получить указанное поле с достаточно облегченным тепловым режимом. Ввод пучка в накопитель осуществляется в большом свободном промежутке между 32 и 1 блоками. Система ввода частиц осуществляется с помощью трех импульсных септум магнитов длиной 0,75 м каждая и полем, равным 1 Тл. Толщина "ножа" ближайшего к орбите септума равна 2 мм. Посадка частиц на орбиту осуществляется с помощью трех кикер-магнитов установленных в 15, 16 и 1 больших промежутках для создания компенсированного "бампа". Аксептанс накопителя в месте ввода

частиц и его смещенное положение в момент захвата инжектируемого пучка показаны на рис.11. Величина смещения равновесной орбиты в месте ввода, равна 18 мм. Поле в кикер-магнитах, создающих компенсированный "бамп" имеет следующие значения

$N_{K1}=295,8$ э, $N_{K2}=353,7$ э, $N_{K3}=334,3$ э. Форма "бампа" представлена на рис.12. Как видно из рис.11 согласованный эмитанс инжектированного пучка не должен превышать 10×2 мм·мрад. Для вписания эмитанса выведенного пучка в требуемую область акцептанса на тракте ввода устанавливается триплет квадрупольных линз, системы параллельного переноса оси пучка и коррекции угла вывода. Одновременно на тракте ввода предусмотрен коллиматор, поперечные размеры которого выбраны таким образом, чтобы линейная транспортировка окна не превышала области на смещенном акцептансе, куда должны быть введены частицы. Это сделано с целью уменьшения радиационного жесткого фона в помещениях накопительного комплекса. После коллиматора на трассе пучка устанавливается заворачивающий магнит, а жесткое тормозное излучение от краев коллиматора поглощается в специальном поглотителе (см.рис.10).

Время радиационного затухания радиальных колебаний при энергии 2,5 ГэВ для ЕРСИНЭ равно $\sim 4 \cdot 10^{-3}$ сек. Это позволяет осуществить инъекцию с частотой работы ускорителя, равной 50 гц. При ускоряемом токе, равном 5 мА ($\sim 2,5 \cdot 10^{10}$ частиц в импульсе и наличии на орбите 337 бунчей) в накопителе в одном акте инъекции в каждую сепаратрису будет инжектировано $\sim 8 \cdot 10^8$ частиц. Эмитанс пучка инжектированный из ускорителя имеет примерно значение $5 \cdot 0,5$ мм·мрад, а согласованный эмитанс 5×1 мм·мрад. С учетом аббераций можно считать, что

бунчи ускорителя могут быть полностью вписаны в сепаратрисы накопителя и тогда для набора $2 \cdot 10^{12}$ частиц потребуется при кратности 185 всего 150 актов инъекций т.е. ~ 3 сек. Это очень важный режим работы накопителя, так как путем частых доинжекций можно значительно застабилизировать интенсивность потока фотонов в пучках синхротронного излучения.

Вторая очередь инъекции, которую необходимо предусмотреть в случае длительных остановок ускорителя электронов на 6 ГэВ на профилактику и по другим причинам, должна осуществляться от специального бустерного синхротрона на энергию 700 МэВ. Эта энергия выбрана из условия времени жизни пучка, ограниченной эффектом Тушека, равной ~ 10 часам. Кроме того время радиационного затухания пучка, инжектированного в накопитель, должно быть достаточно малым, чтобы набрать требуемый ток в течение разумного времени. При энергии частиц, равной 700 МэВ время радиационного затухания равно 670 мсек. Тракт инъекции от бустерного синхротрона по схеме не отличается от описанного выше. Отклоняющие магниты для юстировки оси пучка имеют размер 0,5 м вдоль пучка, ширину дорожки 100 мм и требуют $H = 800$ э для энергии 2,5 ГэВ и 220 э для энергии 700 МэВ. Триплет линз с максимальным значением градиента $G_1 = 300$ э·см $^{-1}$, $G_2 = 560$ э·см $^{-1}$ и $G_3 = 300$ э·см $^{-1}$ располагается на расстоянии 12,2 м от точки ввода по тракту от бустера и 22 м по тракту от действующего синхротрона. Система ввода и посадки частиц на орбиту (септум магнита) устанавливаются в специальном вакуумном баке, давление в котором близко к 10^{-9} . Тракты инъекции снабжены вакуумными редукторами, позволяющими повысить равномерное давление от 10^{-9} до 10^{-6} мм рт.ст.

БУСТЕРНЫЙ СИНХРОТРОН

Основное назначение бустерного синхротрона является ускорение электронов до энергии инжекции и ЕРСИНЭ, равной 700 Мэв при токе $\sim 0,1$ А, что позволит набрать требуемый ток в кольце накопителя, равный 0,75 А, в течение нескольких секунд. Возможность ускорения больших токов (0,1 + 0,25 А) связана с тем, что инжекция в бустер должна производиться от проектируемого нового инжектора синхротрона на 6 Гэв, с энергией 120 Мэв и током 1 А при длительности импульса, равной 10 мсек. Обычно, время в течение которого накопитель заполняется частицами и выходит на режим вывода пучков на экспериментальные установки определяется скоростью подъема поля от H_{min} до H_{max} . Это время для ЕРСИНЭ выбрано в интервале 5 + 10 мин. Однако есть смысл использовать бустер так же и в качестве источника вакуумного ультрафиолета. Действительно, в режиме многоцикло-вой инжекции (в системе с разделенными функциями этот режим работы не представляет трудностей) можно набрать ток ~ 1 А, что позволит получить поток фотонов с критической длиной волны ~ 50 Å, равной $N_{\gamma} = 5 \cdot 10^{12}$ фотон.сек⁻¹мрад⁻¹ $\Delta\lambda/\lambda = 10^{-3}$. Этот достаточно интенсивный источник ВУФ может быть использован наряду с пучками ЕРСИНЭ. Кроме того, электроны с энергией до 700 Мэв представляют большой интерес для ядерной физики умеренных энергий, радиационной физики твердого тела, материаловедения и т.д.. При энергии 700 Мэв значение магнитного поля на орбите равно 8000 Э. Однако магнитная система должна позволять повысить напряженность поля до 1 + 1,2 Т, при которой энергия электронов достигает значения ~ 1 Гэв.

из приведенных выше соображений частота циклов ускорения должна быть выбрана максимальной. Исходя из ряда технических соображений эта максимальная частота равна ~ 10 гц. Вывод пучка из синхротрона в канал инжекции ЕРСИНЭ должен осуществляться с помощью создания быстрых возмущений магнитного поля на орбите, нарастающего за время $\Delta t < T_{обор}$. Это осуществляется с помощью кикер-магнита длиной 0,5 м и полем ~ 200 э. Время нарастания импульса тока в обмотках кикера не должно превышать 0,6 $T_{обор}$.

Отношение средних радиусов накопителя и бустера равно трем. Время радиационного затухания радиальных колебаний в ЕРСИНЭ при энергии 700 Мэв, равно 670 мсек. При частоте циклов ускорения, равной 10 гц и выводе из бустера $\sim 0,5$ числа бунчей (эта величина ограничивается для выбранной схемы эжекции временем нарастания тока в кикер-магнитах) все сепаратрисы накопителя получат первую порцию частиц в течение ~ 1 сек. Полностью все сепаратрисы будут заполнены в течение 3 + 4 сек.

Магнитная система бустера представляет собой структуру типа FBOBBO с разделенными функциями. Радиус закругления в магнитах равен 2,92 м и средний радиус 6,314 м.

Длина свободных промежутков $l_0 = 2$ м и $l\delta = 0,56$ м позволяет осуществить ввод и вывод частиц, а также создать ~ 8 каналов пучков СИ. Значение частот бетатронных колебаний выбрано из условия получения радиального фазового эллипса эжектированного пучка близкого к аксептансу накопителя, что позволит улучшить условия инжекции, уменьшить потери частиц при инжекции и соответственно улучшить фоновые условия работ в накопительном комплексе. С этой точки зрения число периодов

градиента магнитной структуры выбрано равным 6, а частоты горизонтальных и вертикальных колебаний соответственно $\nu_x=2,2$ и $\nu_z=2,15$ (набег фазы, соответственно $\mu_x=132^\circ$ и $\mu_z=129^\circ$). Схематически период градиента и амплитудные функции машины $\beta_x(s)$, $\beta_z(s)$ и $\eta(s)$ показаны на рис.13.

Поперечные размеры элементов магнитной системы определены из условия, что отношение горизонтальной полуапертуры \mathcal{C}_2 к $A/2$ при 700 Мэв было бы ~ 5 . Значение $\mathcal{C}_2=7,8$ мм, что и определяет $A/2=40$ мм. В проекте значение $A=100$ мм и радиус вписанной в квадрупольные линзы окружности, равен 50 мм. Время радиационного затухания пучка, τ_q , при котором пучок электронов приобретает размер $\mathcal{C}_2=7,8$ мм, равно $4,6 \cdot 10^{-2}$ сек. По этой причине система питания должна обеспечивать плоскую вершину поля, по крайней мере, равную 50 мсек. Если частота повторения циклов равна 10 гц, то время ускорения должно быть 40 мсек. Основные параметры бустерного синхротрона приведены в таблице IV.

Для ускорения частиц используется один резонатор, конструктивно не отличающийся от резонаторов, установленных на накопительном кольце. Энергия, теряемая частицей за один оборот, равна 7,3 кэв при $E=700$ Мэв. Мощность ускоряющего генератора равна 0,3 квт при ускоряемом токе, равном 0,12 А.

Магнитопровод заворачивающих и фокусирующих блоков изготавливается из листов трансформаторной стали толщиной 0,5 мм.

Конструкция обмоток магнитных блоков и система питания должны быть выполнены для введения системы самобалансировки [37], позволяющей получать высокопрецизионное управляющее поле на орбите. Кроме того, система самобалансировки позволяет в ши-

роких пределах изменять форму кривой нарастания поля в ускорителе. Это облегчает решение вопросов создания как плоской вершины поля, так и управления скоростью нарастания поля в момент инжекции.

Вакуумная камера ускорителя должна обеспечить остаточное давление $P_{ост} \leq 10^{-7}$ мм рт.ст. С этой целью камера, в местах, проходящих в переменном во времени магнитном поле, должна быть изготовлена либо из керамики, либо из специальных стекол с повышенными термо-механическими свойствами.

ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ СИСТЕМ КОРРЕКЦИИ, КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ НАКОПИТЕЛЬНЫМ КОМПЛЕКСОМ

Для осуществления коррекции основных параметров управляющего магнитного поля все элементы магнитной системы (заворачивающие магниты и квадрупольные линзы) как накопителя, так и бустерного синхротрона и трактов инжекции снабжаются корректирующими обмотками, сечение которых составляет $\sim 5\%$ от сечения основной обмотки. Устройствами коррекции параметров обладают ускоряющая и в.ч. системы.

Система управления и коррекции подразделяется на четыре автономные подсистемы, объединение элементов которых в структурные группы, определяет уровень автоматизации процессов контроля и управления сложным комплексом электрофизического оборудования и исследовательских установок, использующих пучки накопителя. Эти подсистемы следующие:

1. Элементы введения корректирующих антивозмущений.
2. Устройства измерения или определения текущего значения управляемого параметра.

3. Устройства первичной обработки сигналов от датчиков, позволяющих ввести информацию в ЭВМ и устройства связи ЭВМ с системами коррекции.

4. Управляющая ЭВМ.

Управление ускорительно-накопительным комплексом ЕРСИНЭ должно осуществляться без стандартных пультов управления. Все операции включения агрегатов, настройки систем и выведения накопителя осуществляются с помощью ЭВМ.

Основными задачами систем коррекции и управления является проведение необходимого числа измерений в единицу времени основных параметров магнитной, ускоряющей, вакуумной систем, систем силового и в.ч. питания, устройств обеспечивающих заданный тепловой режим с целью достижения максимальной эффективности использования пучкового времени для осуществления физической программы исследований.

Следующей задачей систем управления является обеспечение работы в линии всех экспериментальных установок, расположенных в лабораторных отсеках комплекса. Управление этими установками, набор необходимого числа экспериментальных данных, определение завершения этапов исследований и перестройка параметров установок осуществляется с помощью ЭВМ по разработанным программам.

В настоящее время во многих центрах накоплен значительный опыт в создании систем автоматической коррекции и управления большими комплексами электрофизических и экспериментальных установок и, в частности, в ИЯФ СО АН СССР [38,39]. Этот опыт будет тщательно проанализирован, на основе которого будет выбрана конкретная структурная схема, тип управляющей ЭВМ, конструкция датчиков, объем внешних устройств и необходимое программное

обеспечение.

РАСПОЛОЖЕНИЕ И ПРИВЯЗКА НАКОПИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ЕРСИНЭ ОТНОСИТЕЛЬНО СУЩЕСТВУЮ- ЩЕГО УСКОРИТЕЛЯ НА 6 ГЭВ

Схема расположения технологического оборудования накопительного комплекса относительно существующего ускорителя показана на рис.14. Здесь же показана и высотная привязка здания накопителя.

Накопитель ЕРСИНЭ располагается в здании с размерами ~ 67 x 74 м, собранном из трех типовых пролетов, имеющих размеры 18 м (центральный пролет) и 24 м (два боковых). Накопительное кольцо ЕРСИНЭ расположено симметрично в основном помещении на специальном фундаменте, собранном на сваях, вбитых в базальтовый пласт, и развязанном от остальных окружающих конструкций здания. Центральная часть кольцевой арены утоплена относительно орбиты накопителя на 5 м. В этом помещении будут установлены основные устройства в.ч. и силового питания накопителя, система откачки, водоохлаждения, исполнительные блоки и механизмы системы авторегулирования. В центре здания имеется углубление, сообщающееся с помощью тоннеля с площадкой в районе восточного павильона ускорителя. Это необходимо для занесения технологического оборудования в здание накопителя. Центральную часть здания обслуживает мостовой кран с длиной пролета 18 м и грузоподъемностью 25 т.

Накопитель имеет защитную стену, собранную из блоков тяжелого бетона, установленную до уровня II этажа здания. Толщина этой стенки, согласно проведенным исследованиям, [40,41], долж-

на быть ~ 85 см. Однако в конструкции систем защиты должны быть предусмотрены возможности установки дополнительных пластин из свинца.

Лабораторные отсеки здания разделены по высоте на 3 этажа. Имеется также и цокольное помещение, в котором будет располагаться часть экспериментальных установок с отклонением пучков вниз. На I этапе будут расположены установки, работающие в области жесткого и мягкого рентгена. На II этаже и в центральном отсеке-установки, использующие диапазоны ВУФ, видимой части спектра и инфракрасного излучения. Третий этаж здания полностью отводится под лабораторные помещения, в которых сосредоточено основное оборудование обработки и подготовки препаратов, сборки и наладки с оборудования для следующих этапов экспериментального исследования, пульта связи с ЭВМ и дисплеи. На двух этажах центрального пролета располагаются ЭВМ контроля и управления комплексом, а также демонстрационные залы для просмотра filmовой информации.

Бустерный синхротрон установлен в северо-западном отростке здания вблизи от проектируемого нового инжектора. С целью уменьшения радиационного фона в основных экспериментальных помещениях комплекса, бустер располагается на уровне цокольного этажа здания. На рис.14 показаны каналы транспортировки пучков от инжекторов к кольцу ЕРСИНЭ. Все каналы транспортировки имеют радиационную защиту с толщиной стенки ~ 1 м.

В помещении комплекса ЕРСИНЭ должно быть предусмотрено термостатирование и кондиционирование воздуха с точностью не хуже $\pm 2^\circ\text{C}$, что необходимо как для работы самого накопителя, так и экспериментальных установок на пучках.

Лабораторные отсеки не разграничиваются стенами. Предполагается часть стен, примыкающих к накопителю, сделать передвижными, что позволит оперативно изменять конфигурацию и площадь отсеков в зависимости от требований конкретных экспериментов.

В заключение авторы приносят глубокую благодарность специалистам ЕФИ и в особенности Э.М.Лазиеву, М.Т.Шахназаряну, которые своими советами и обсуждениями помогли разработке физических и инженерных задач, связанных с проектированием накопителя. Особую благодарность авторы выражают профессору А.А.Васильеву, В.В.Макарову-Землянскому за ряд очень полезных обсуждений и замечаний.

Авторы также выражают глубокую признательность академику А.Н.Скринскому и сотрудникам ИЯФ СО АН СССР А.А.Лифшицу, Э.М.Трахтенбергу, В.В.Анашину, М.М.Карлинеру, В.И.Нифонтову, А.С.Калинину и другим за весьма полезные советы, имевшие подчас решающее значение при выборе отдельных конструкторских решений.

Таблица I.

Метод исследования	Используемый диапазон длин волн $\lambda_{min} \div \lambda_{max}$	Число публикаций по всем центрам с 1966-1977 гг. в мире
Рентгеновская спектроскопия <i>EXAFS</i>	$0,1 \text{ \AA} + 30 \text{ \AA}$	101
Рассеяние от кристаллов и биологических объектов	$0,3 \text{ \AA} + 30 \text{ \AA}$	100
Неупругое рассеяние	$0,1 \text{ \AA} + 50 \text{ \AA}$	1
Фотоэлектронная спектроскопия	$0,1 \text{ \AA} + 1000 \text{ \AA}$	115
Флуоресценция	$0,5 \text{ \AA} + 100 \text{ \AA}$	21
Атомное и молекулярное поглощение	$0,5 \text{ \AA} + 500 \text{ \AA}$	124

Таблица II

ν_1, ν_2	σ_x (μm)		σ'_x (μm)		β_{max}		$\frac{\beta_s}{\beta'_s}$		α	ξ	
	S_1	S_2	S_1	S_2	β_{min}	S_1	S_2	S_1		S_2	
4,2	1,965	1,316	0,682	0,511	$\frac{11,565}{2,305}$	$\frac{6,644}{4,131}$	$\frac{2,837}{0,918}$	0,0545	0,14	0,19	
4,1	1,629	0,974	0,639	0,485	$\frac{12,774}{1,787}$	$\frac{6,781}{4,928}$	$\frac{2,220}{0,941}$	0,0431	0,15	0,202	
4,8	1,489	0,818	0,622	0,479	$\frac{13,883}{1,518}$	$\frac{7,059}{5,552}$	$\frac{1,890}{0,955}$	0,0378	0,156	0,206	
5,2	1,36	0,641	0,609	0,488	$\frac{16,126}{1,177}$	$\frac{7,829}{6,687}$	$\frac{1,455}{0,953}$	0,0315	0,16	0,203	
4,85	1,418	0,588	0,666	0,479	$\frac{19,747}{0,928}$	$\frac{9,158}{8,438}$	$\frac{1,248}{1,159}$	0,0296	0,147	0,183	
6,18											
6,15											

Таблица III

Таблица основных параметров накопителя
"ЕРСИНЭ"

Параметр	Обозначение	Величина
Энергия	E_0	2,5 ГэВ
Ток	I_0	0,75 А
Характеристическая длина волны	λc	2,3 Å
Число фотонов	N_γ	$4 \cdot 10^{13}$ (при $\lambda = 2 \lambda c$)
	$\Delta\lambda/\lambda = 10^{-3} \text{ рад.}^{-1} \text{ сек}^{-1}$	$1 \cdot 10^{13}$ (при $\lambda = 0,42 \lambda c$)
Тип магнитной системы		F B \bar{O} D B \bar{O}
Напряженность магнитного поля	H_0	1,3 т
Радиус закругления	ρ_0	6,41 м
Средний радиус	R	18,946 м
Длина орбиты	L_0	119,04 м
Число периодов градиента	M	16
Градиент	G_F, G_D	11,15 т/м ; 11,5 т/м
Число бетатронных колебаний	ν_x, ν_z	5,2 ; 5,15
β_z -функция	β_z	$\beta_{max} = 13,88 \text{ м}$ $\beta_{min} = 1,51 \text{ м}$
η -функция	η	$\eta_{max} = 1,28 \text{ м}$ $\eta_{min} = 0,513 \text{ м}$
Коэффициент пространственного уплотнения орбиты	α	0,038
Хроматичность	ψ	- 2,68
Максимальный горизонтальный размер пучка	$\sigma_{x \max}$	2 мм
Вертикальный размер	$\sigma_{z \max}$	0,15 мм

Параметр	Обозначение	Величина
Длина бунча	σ_s	4,58 см
Энергетический разброс		$2 \cdot 10^{-3}$ ГэВ
Равновесная фаза	φ_s	20°
Число резонаторов		4
Амплитуда ускоряющего поля	V_0	1,55 МВ
Частота ускоряющего поля	f в.ч.	466,1 МГц
Кратность радиочастоты	q	185
Заполнение каждой сепаратрисы при токе $I = 1000 \text{ мА}$	ΔI	5,5 мА
Частота синхротронных колебаний	Ω	0,401 МГц
Энергия излученная за один оборот	U_0	$5,37 \cdot 10^{-4}$ ГэВ
Мощность в.ч. генераторов при токе $I = 0,75 \text{ А}$	P в.ч.	400 кВт
Время жизни из-за эффекта Тушчека	τ_T	$5,7 \cdot 10^4$ час при $E=2,5 \text{ ГэВ}$ 9,1 час при $E=0,7 \text{ ГэВ}$
Время жизни пучка	τ поля.	10 часов
Частота обращения	f обр.	2,52 МГц
Период обращения	T обр.	$0,397 \cdot 10^{-6}$ сек.
Длина заворачивающего магнитного блока	$l_{\text{в.}}$	1,26 м

Параметр	Обозначение	Величина
Длина квадруполей	$l_{кв}$	0,36 м
Длина большого свободного промежутка	l_0	3 м
Длина малого свободного промежутка	$l_δ$	0,6 м
Апертура заворачивающего блока		140 x 40 мм ²
Радиус вписанной окружности квадруполя	$r_{впис}$	25 мм
Давление остаточного газа при жизни пучка 10 час.	$P_{ост}$	$1,9 \cdot 10^{-9}$ торр
Энергия инъекции от существующего ускорителя	$E_{инж}$	2,5 ГэВ
от бустерного синхротрона	$E_{инж. буст}$	0,7 ГэВ
Минимальное время накопления	$\tau_{нак}$	5 мин.
Инжектор бустера - линейный ускоритель		
Энергия инъекции	$E_{инж}$	120 МэВ
Ток и инъекция	$I_{инж}$	1 А
Длительность импульса инжектора	$\tau_{инж}$	10 мкс

Таблица основных параметров бустерного синхротрона

Параметр	Обозначение	Величина
Максимальная энергия частиц	E_0	700 МэВ
Ускоренный ток	I_0	0,12 а
Частота циклов ускорения	f_a	10 гц
Число электронов ускоренные за один цикл	N_e	$6 \cdot 10^{10}$
Радиус закругления в магнитах	ρ_s	2,9187 м
Средний радиус кольца	R	6,314483 м
Частота обращения частиц по орбите	$f_{обр.}$	7,56 Мгц
Число бетатронных колебаний за один оборот		
а. горизонтальных	ν_x	2,2
б. вертикальных	ν_z	2,15
Тип магнитной структуры		разделенные функции F B D D B O
Число периодов градиента	M	6
Длина большого свободного промежутка	l_0	2 м
Длина малого свободного промежутка	$l_δ$	0,56 м

Параметр	Обозначение	Величина
Набег фазы за период		
а. горизонтальных	M_z	132°
б. вертикальных	M_z	129°
Максимальное значение		
β - функции		
а. горизонтальной	$\beta_{z \max}$	$11,32 \text{ м}$
б. вертикальной	$\beta_{z \max}$	$14,41 \text{ м}$
Минимальное значение		
β - функции		
а. горизонтальной	$\beta_{z \min}$	$1,02 \text{ м}$
б. вертикальной	$\beta_{z \min}$	$1,05 \text{ м}$
Максимальное значение		
η - функции	η_{\max}	$2,37 \text{ м}$
Минимальное значение		
η - функции	η_{\min}	1 м
Коэффициент пространственного уплотнения	α	$0,23$
Максимальное значение напряженности магнитного поля	H_0	$0,8 \text{ тл}$
Значение напряженности магнитного поля при инжекции	H_i	$0,137 \text{ тл}$
Длина магнитного блока	L	$1,525 \text{ м}$
Длина квадрупольной линзы	$L_{\text{кв.}}$	$0,2 \text{ м}$

Параметр	Обозначение	Величина
Максимальное значение градиентов в линзах		
а. Φ -линзы	G_Φ	$5;419 \text{ т/м}$
б. Д -линзы	G_D	$6,584 \text{ т/м}$
Частота ускоряющего поля	$f_{в.ч.}$	$466,1 \text{ МГц}$
Кратность в.ч.	q	62
Энергия излучаемая за оборот	U_0	$7,3$
Равновесная фаза	φ_s	15°
Амплитуда ускоряющего поля	V_0	14 кв
Мощность ускоряющего генератора	$P_{в.ч.}$	$0,266 \text{ квт}$
Число резонаторов		1
Давление остаточного газа	$P_{\text{ост.}}$	10^{-7} торр
Время жизни по Тунчечу		
а. при 120 мэв	τ_1	15 сек
б. при 700 мэв		$2,4 \times 10^5 \text{ сек}$
Время радиационного затухания		
при 700 мэв	τ_2	$4,6 \times 10^{-2} \text{ сек}$
	τ_3	$2,9 \times 10^{-2} \text{ сек}$
	τ_4	$9,7 \times 10^{-3} \text{ сек}$
Характеристическая длина волны	λ_c	$47,6 \text{ \AA}$
Число фотонов (при токе 0,12 а)	N_γ	$10^{12} \text{ фотон.сек}^{-1} \text{ мрад}^{-1}$ $\Delta\lambda/\lambda = 10^{-3} \text{ мрад}^{-1} \text{ сек}^{-1}$
Размеры электронного пучка		
при отсутствии связи	σ_z	$7,7 \times 10^{-3}$
при максимальной связи	σ_z	10^{-6} м
	σ_z	$2,46 \times 10^{-3} \text{ м}$

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. I - Спектральная кривая в стандартных интервалах для обычного порта излучения (а) и канала снабженного виглер-магнитом.
- Рис. 2 - Амплитудные функции магнитной системы накопителя.
- Рис. 3 - Чертеж квадрупольной линзы.
- Рис. 4 - Чертеж шестиполюсной линзы
- Рис. 5(а, б) Общий вид стандартной секции магнитной системы накопителя.
- Рис. 6 - Блок-схема системы питания электромагнита накопителя.
- Рис. 7 - Чертеж вакуумной камеры, занимающей участок, равный периоду градиента.
- Рис. 8 - Структурная схема системы генерации в.ч. мощности.
- Рис. 9 - Эскиз ускоряющего резонатора.
- Рис. 10 - Схема тракта инжекции от ускорителя на 6 Гэв в накопитель.
- Рис. 11 - Акцептанс накопителя и ее смещение при посадке частиц на орбиту.
- Рис. 12 - Форма скомпенсированного "бампа" посадки частиц на орбиту.
- Рис. 13. - Амплитудные функции бустерного синхротрона.
- Рис. 14 - Схема расположения технологического оборудования ЕРСИНЭ.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Г. А. Гюрзадян, А. Л. Кашин и др. Известия АН Арм. ССР, Физика, 10, вып. 2, 177-183 (1974).
2. А. А. Вазина, В. С. Герасимов, Л. А. Железная, А. М. Матюшин, Б. Я. Сонькин, Л. К. Сребницкая, В. М. Шелестов, Т. М. Франк, Авакян Ц. М., Алиханян А. И. Биофизика, 20, 801-805 (1975).
3. А. И. Алиханян, П. А. Безирганян, Ц. М. Авакян, И. П. Карабеков и др. ПТЭ, №3, 39 (1975).
4. Г. И. Будкер, И. Я. Протопопов, А. Н. Скринский. Труды VII Международной конференции по ускорителям заряженных частиц высоких энергий, Цахкадзор, 1969, т. II, 37, Ереван (1970).
5. Г. И. Будкер, В. Е. Балайкин и др. Труды III Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, 1, 318-326, Москва 1969.
6. К. Штеффен. Труды VII Международной конференции по ускорителям заряженных частиц высоких энергий (Цахкадзор, 1969, 2, 60-80, Ереван (1970).
7. Б. Рихтер. Труды VII Международной конференции по ускорителям заряженных частиц высоких энергий, Цахкадзор, 1969, 2, 81-93, Ереван (1970).
8. The Orsay Storage Ring Group. Proc. of the VIII Int. Conf. on High Energy Accelerators p.150, Geneve, 1971.
9. W. Paul, K. Strauch, H. Winick "Proposal for a Synchrotron Radiation Facility at the Cambridge Electron Accelerator" July 1973.
10. Science Research Council. "A Plan for Future Research with Synchrotron Radiation on a Dedicated Electron Storage Ring". Daresbury 1974.
11. K. O. Hodgson, H. Winick, G. Chu "Synchrotron Radiation Research" SSRP Report 76/100, August 1976.

12. R.W.Morse et al. " Panel to Assess the National Need for Facilities Dedicated to the Production of Synchrotron Radiation, Washington D.C., 1976.
13. А.Н. Скринский, Г.И. Кулипанов, Препринт ИЯФ-76.
14. A.Balzarotti et al " Synchrotron Radiation a Perspective View for Europe, ESF, Strasbourg, France, 1978
15. Design for a Dedicated Source of Synchrotron Radiation. DL/SRF/R2, 1975
16. Y.P.Blewett. Proposal for a National Synchrotron Light Source. BNL 50595, vol. I of II, February 1977.
17. K.Huke. INS-Report 259 (1976).
18. L.Martin SLAC BEAM LINE, 8, July, 1977
19. H.Winick, T.Knight. Wiggler Magnets (A Collection of Material Presented at the Wiggler Workshop Held at SLAC March 21-23, 1977). SSRP Report, N.77/05 May 1977.
20. Verzeichnis der Veröffentlichungen der Synchrotron-strahlungs Gruppe am DESY 1966-1977.
21. G.V.Marr, I.H.Monro, J.C.C.Sharp - Synchrotron Radiation A Bibliography DNPL/R24 (1972).
22. Supplement August 1972 to February 1974, Daresbury Laboratory DL/TM 127.
23. Daresbury Laboratory preprint DL/SRF/PB-P11, 1975, DL/SRF/F 28, 30, 32, 34, 41-43, 46, 47, 49, 50, 52, 53, 55, 57, 1976, DL/SRF/P 58, 59, 64, 67, 70, 72, 75, 89, 90, 94
24. Activity Report to National Science Foundation Period: January 1-July 15 1975. Stanford Synchrotron Radiation Project, SSRP Report N.75/05.
25. Activity Report to National Science Foundation Period: July 16, 1975-March 31, 1976; SSRP Report N.76/07.
26. Activity Report to National Science Foundation Period: April 1-December 31 1976, SSRP Report N.77/02.
27. Activity Report to National Science Foundation Period: January 1-June 30 1977, SSRP Report N.77/09.
28. SSRP Report 74/01, 74/02, 75/08, 75/10, 75/11, 76/01, 76/02, 76/04, 76/10, 76/11 77/04.
29. Intern. Conf. on Synch. Rad. Instrum. and Develop., Orsay France, 1977.
30. R.G.Shulman et al. Proc. Nat. Acad. Sci. US. 72, 4003, (1975).
31. D.E.Sayers et al. J. Chem. Phys. 64, 427, (1976).
32. G.Parzen. BNL 50536 ISA 76-13.
33. "Сверхвысокий вакуум в радиационно-физическом аппаратостроении", под ред. Г.Л. Саксаганского, М., Атомиздат, 1976г.
34. В.В. Ананин, Ю.Д. Валяев, Л.Г. Леонтьевская, Л.А. Мироненко, Б.М. Смирнов Препринт ИЯФ 75-49, Новосибирск, 1975г.
35. А.А. Глазков, И.Ф. Малышев, Г.Л. Саксаганский, "Вакуумные системы электрофизических установок", М., Атомиздат, 1975г.
36. А.Ц. Амадуни, Э.А. Бадаля и др. Труды пятого Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т. 2, стр. 213, изд. "Наука", Москва, 1977г.
37. И.П. Карабеков "Системы самобалансировки и коррекции основных параметров электронных синхротронов на высокие и сверхвысокие энергии", Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук, Дубна, 1974г.
38. Гусев В.А., Захваткин М.Н. и др. Труды пятого Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т. 2, стр. 287, изд. "Наука", Москва, 1977г.
39. Белов С.Д., Гудков Б.А. и др. Труды пятого Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т. 2, стр. 291, изд. "Наука", Москва, 1977г.
40. R.G.Alsmiller, J.Barish Particle Accelerators, 5, 155 (1973).
41. R.W.Ronssin, R.G.Alsmiller and J.Barish, Nuc. Eng. Design 24, 250 (1973).

Рукопись поступила 27-го июня 1978 г.

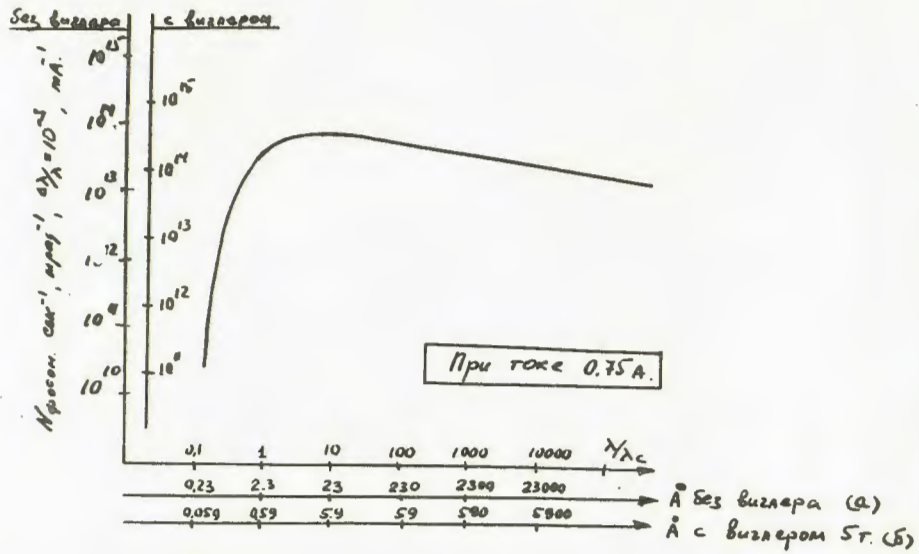


Рис.1

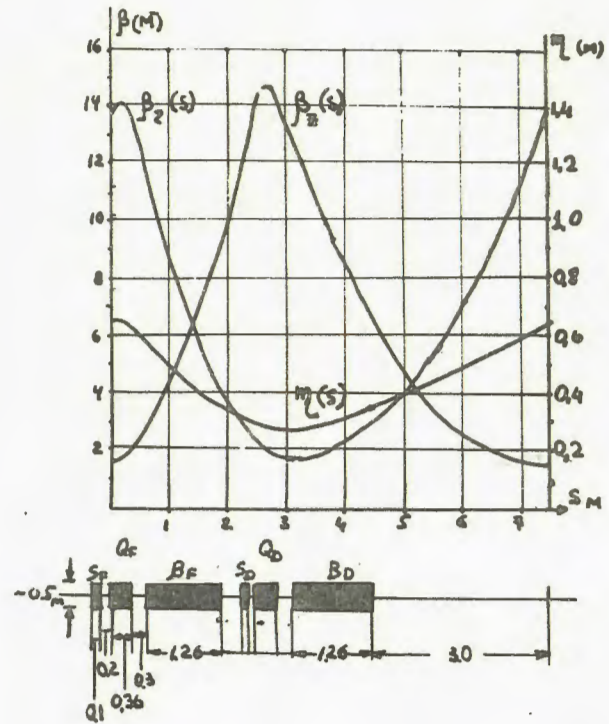


Рис.2

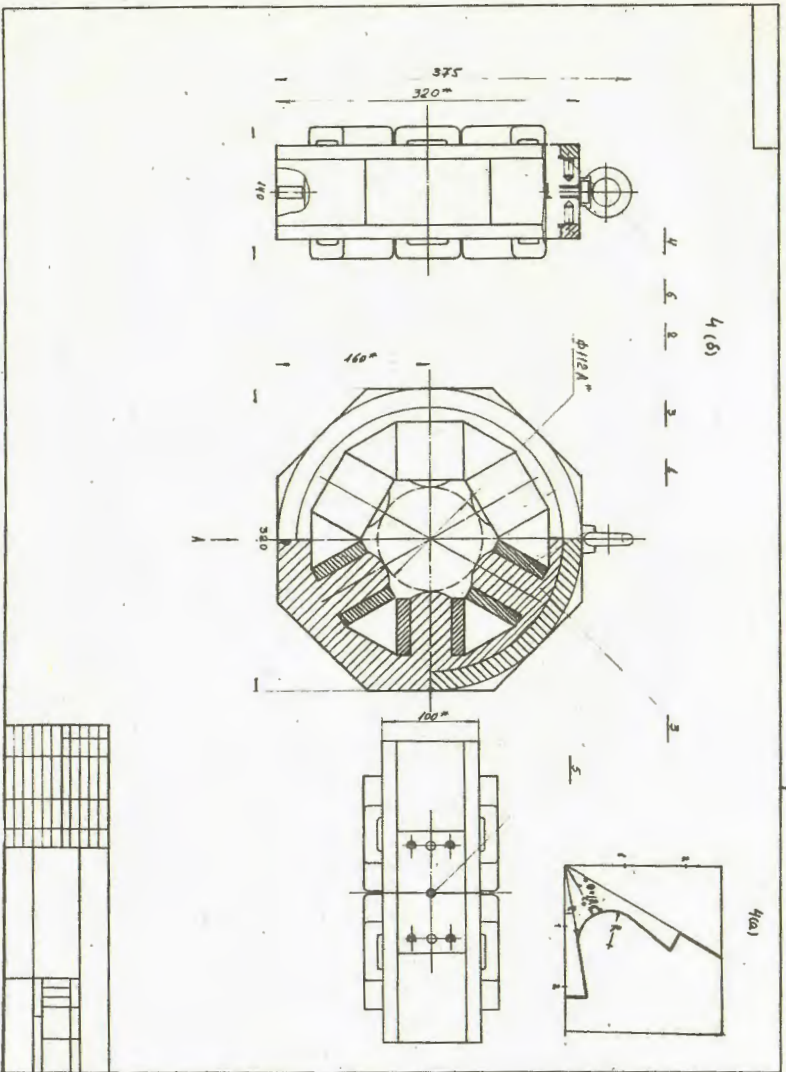
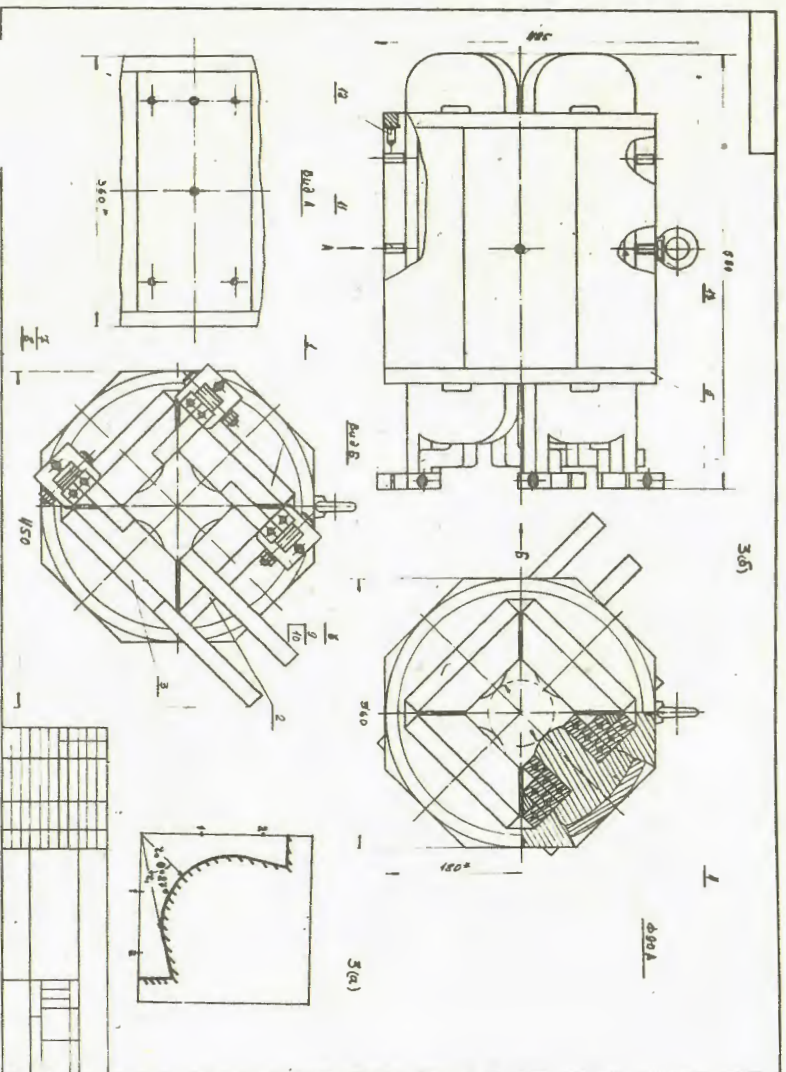


Рис. 4



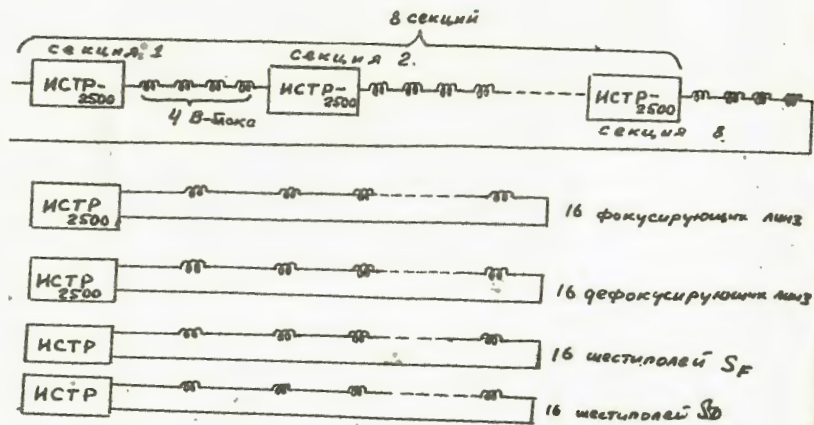
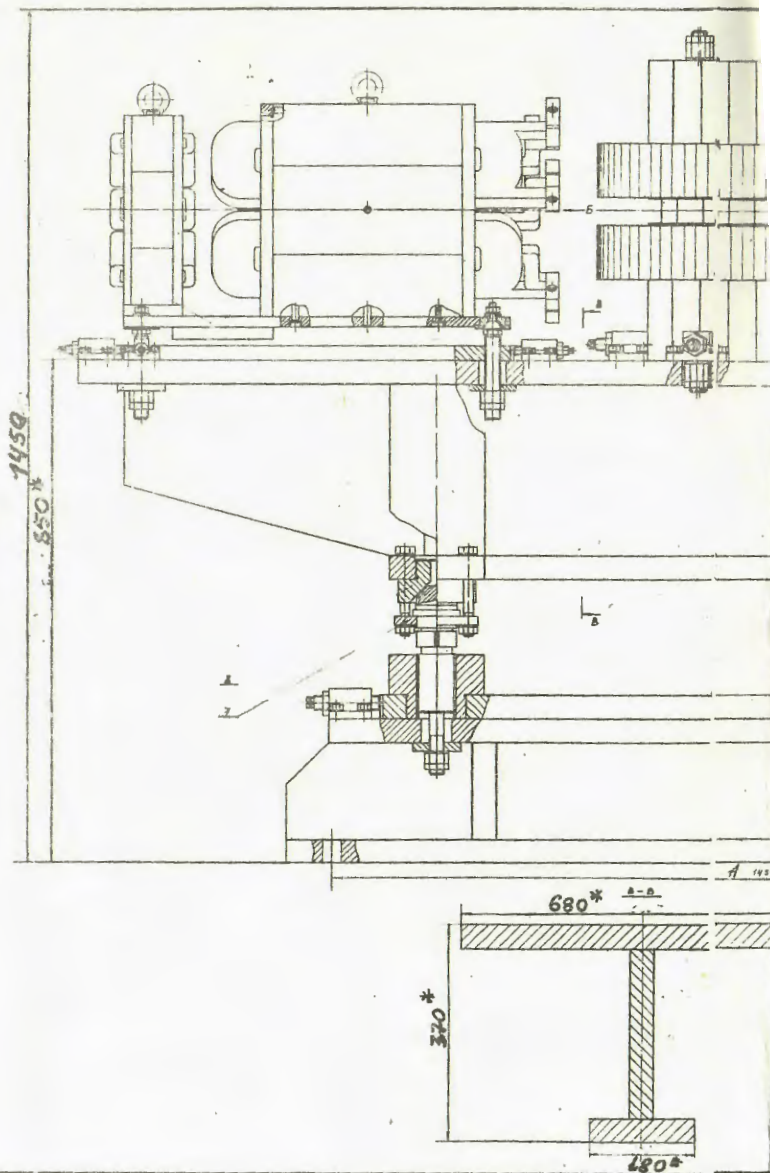
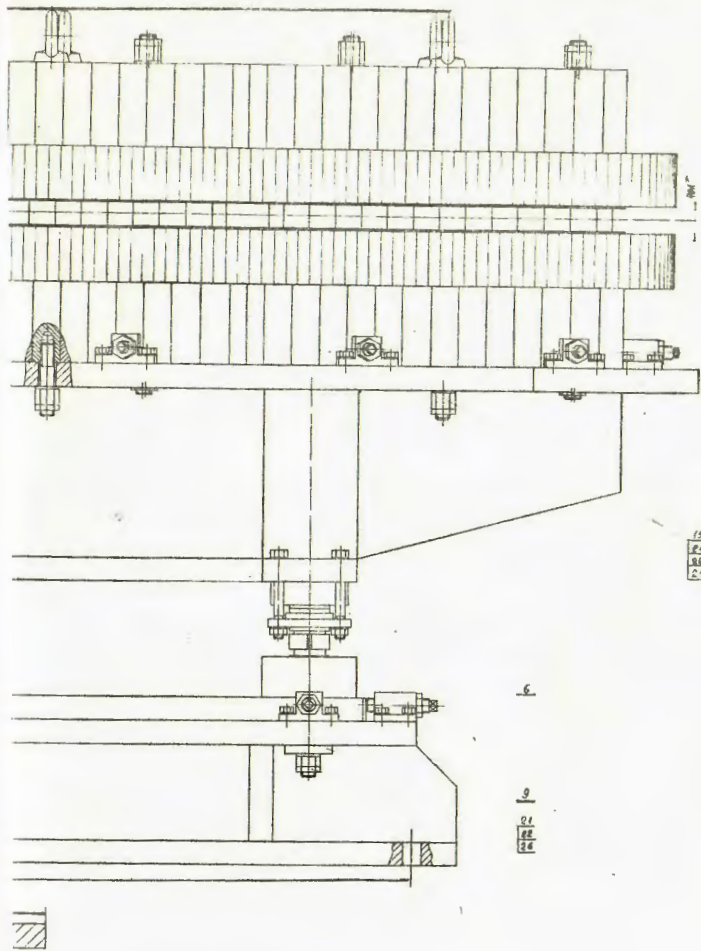


Рис. 6

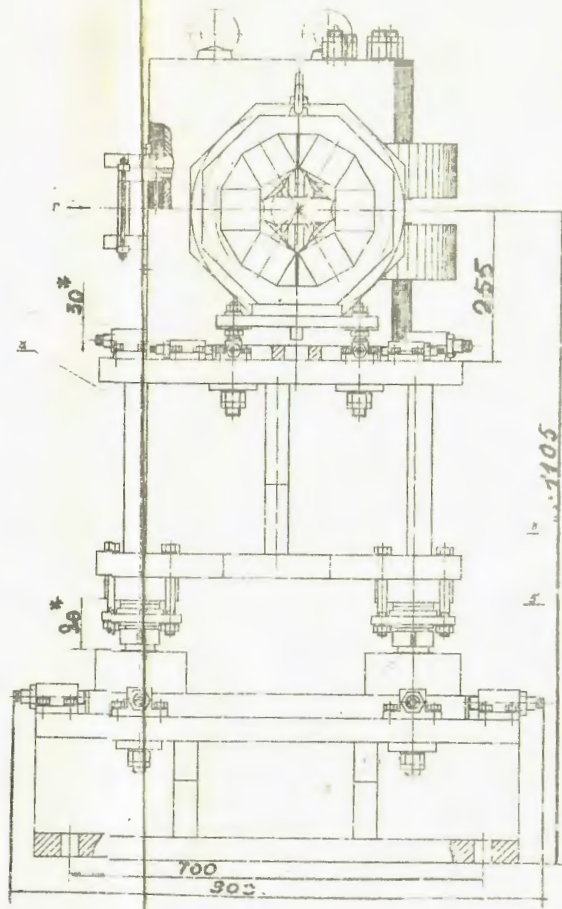




12
12
12

6

9
21
12
12



30

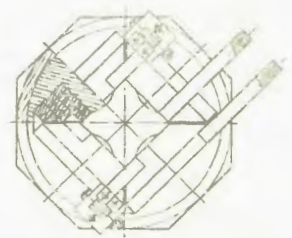
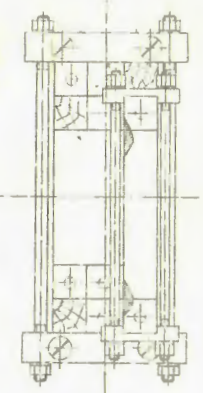
255

30

1105

700

900



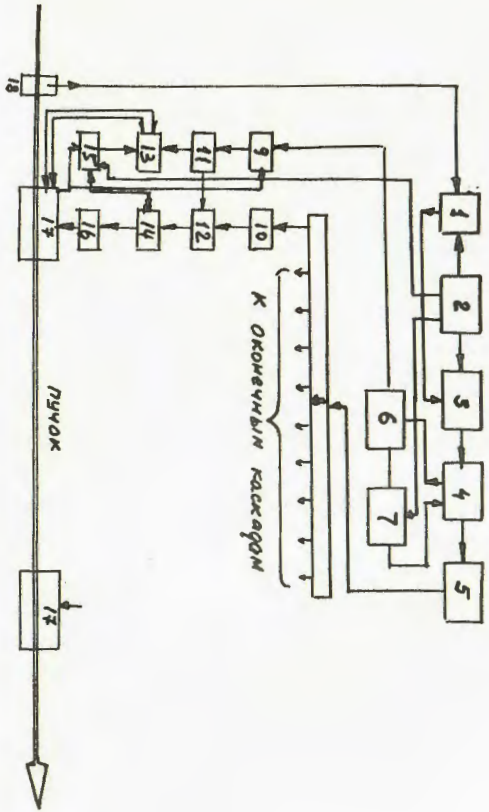


Рис. 8

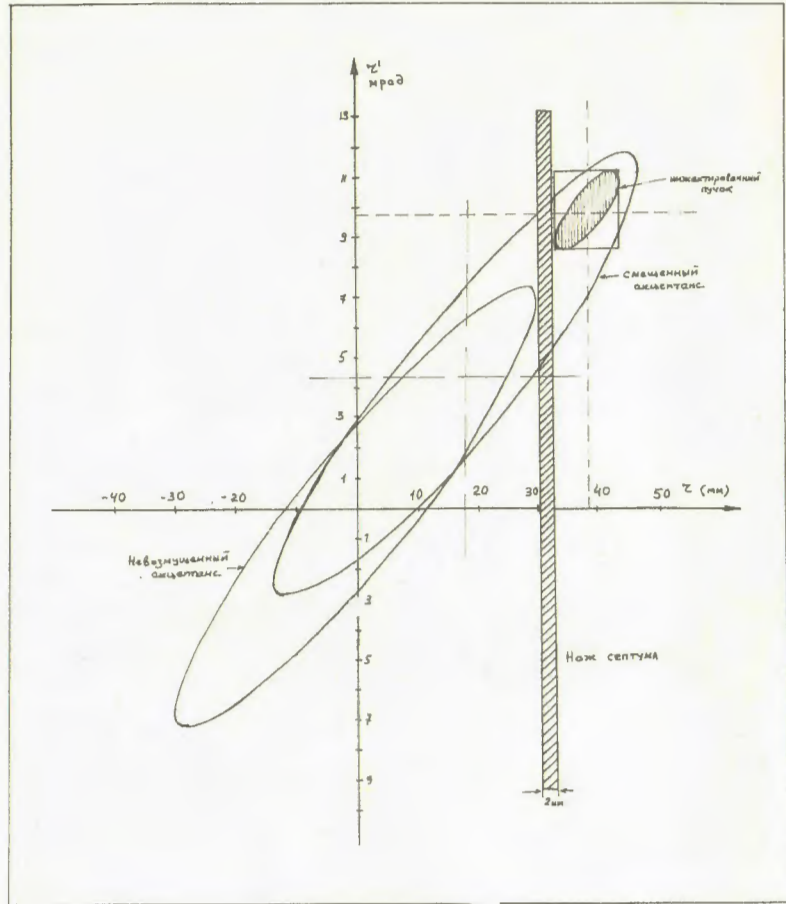


Рис. I1

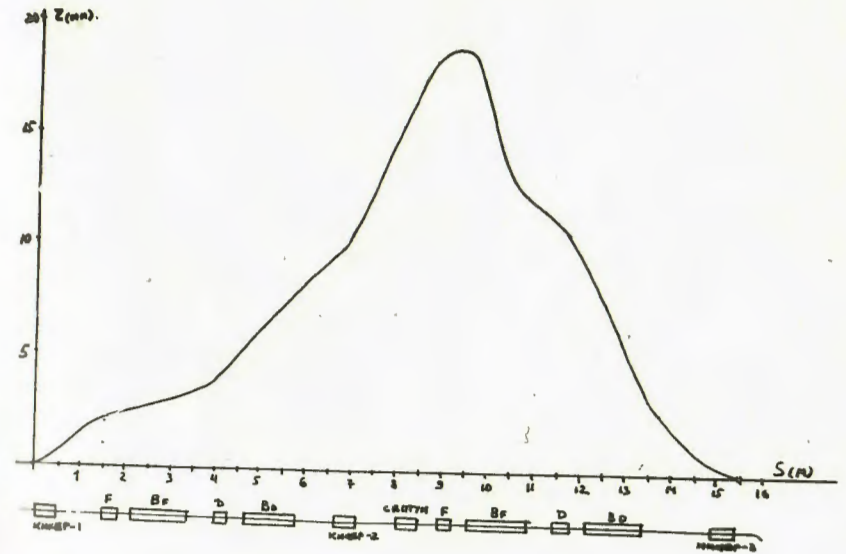


Рис. I2

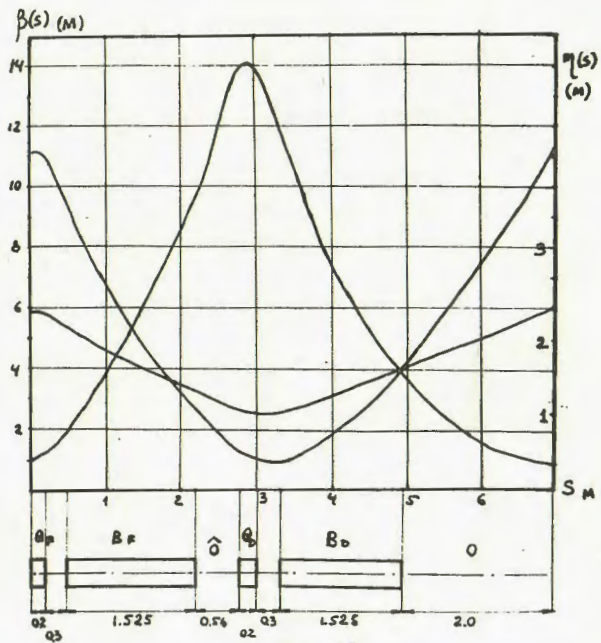
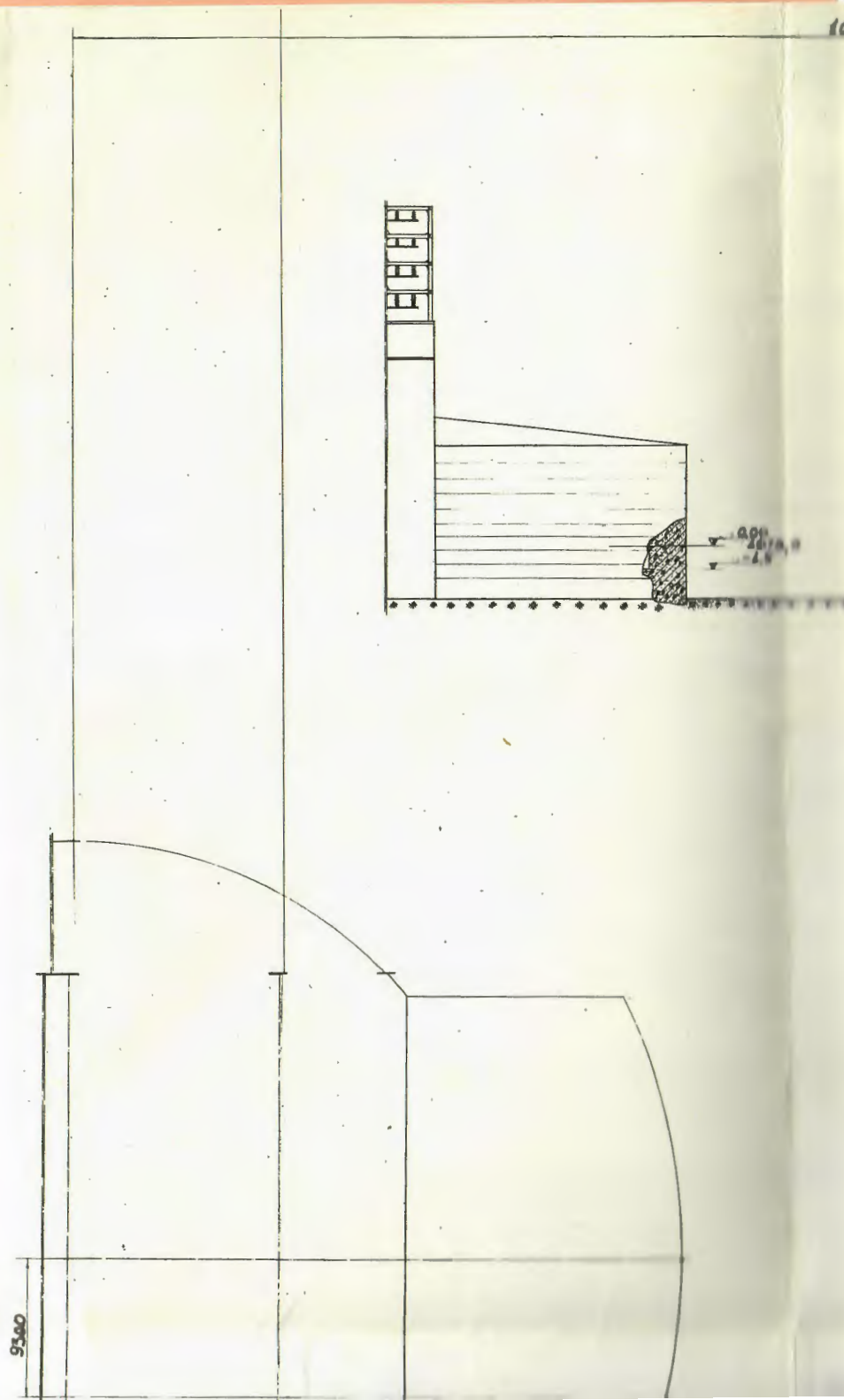


Рис.13



102500

