

## УСКОРИТЕЛЬНО-НАКОПИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ИФВЭ

*В. И. Балбеков, А. А. Васильев, Г. П. Воронцов,  
А. М. Гюльханданян, Ю. П. Дмитриевский,  
В. В. Елистратов, О. В. Курнаев, А. А. Логунов,  
Е. Л. Макеев, К. П. Мызников, Л. Л. Мойжес,  
А. А. Наумов, В. Г. Рогозинский, Л. Д. Соловьев,  
К. З. Тушабрамишвили, Н. М. Тараканов,  
Ю. С. Федотов, А. Е. Ханамирян, Б. К. Шембель,  
Ф. З. Ширяев, В. А. Ярба*

Институт физики высоких энергий, Серпухов

*В. Л. Васильев, С. Н. Васильев, В. А. Глухих,  
О. А. Гусев, Л. Б. Динабург, Н. А. Монозон,  
И. А. Мозалевский, Б. В. Рождественский,  
В. В. Рябов, Г. Л. Саксаганский, В. А. Титов,  
В. Д. Федоров, И. А. Шукейло*

Научно-исследовательский институт электрофизической  
аппаратуры им. Д. В. Ефремова, Ленинград

*В. В. Елян, А. А. Кузьмин, Р. А. Мещеров,  
Е. С. Миронов*

Московский радиотехнический институт АН СССР

Сообщается современное состояние проекта ускорительно-накопительного комплекса ИФВЭ. Планируется сооружение двухступенчатого синхротрона длиной около 20 км. Первая ступень есть медленный бустер, а вторая ступень содержит сверхпроводящие магниты с максимальным полем 5 тл, что соответствует энергии 3 Тэв. Обсуждаются возможности получения различных встречных пучков.

The present status of the designed accelerating and the storage IHEP complex is reported. Plans are under way for the construction of two-stage synchrotron of about 20 km long. The first stage is a slow booster, and the second stage contains superconducting magnets with a peak field of 5t, corresponding to 3 Tev energy. The possibilities of creating of various colliding beams are discussed.

### ВВЕДЕНИЕ

На протяжении ряда лет специалистами ИФВЭ, НИИЭФА, МРТИ АН СССР ведется изучение различных возможностей развития ускорительного комплекса Института физики высоких энер-

гий [1—3]. Суть этой работы заключается в создании новой экспериментальной базы, которая позволила бы углубить и расширить фронт исследований в области физики высоких энергий. В настоящее время в качестве основы выбран сверхпроводящий протонный синхротрон энергией  $3 \text{ Тэв}$  с возможностью дальнейшего создания системы встречных пучков.

## 1. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Планируется сооружение двухступенчатого ускорителя протонов с максимальной энергией  $3 \text{ Тэв}$ . Первая ступень является

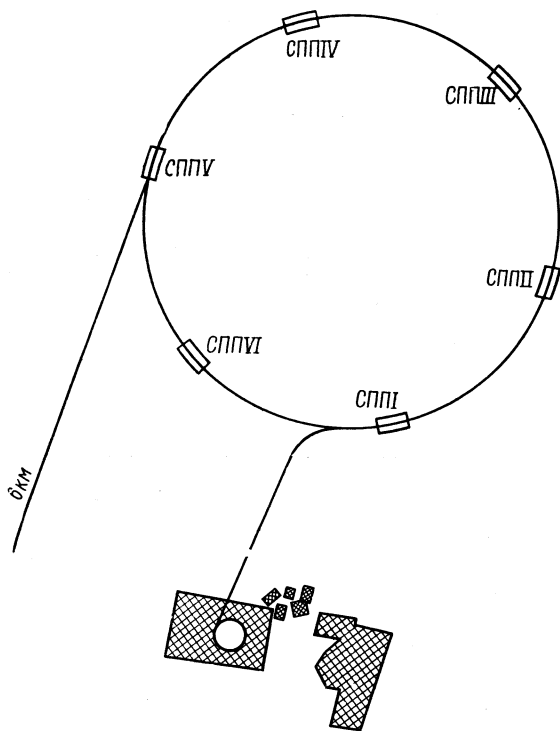


Рис. 1. Общая схема ускорительно-накопительного комплекса ИФВЭ:  
СПП I, СПП II, . . . , СПП VI — суперпериоды

медленным бустером и представляет собой синхротрон энергией  $200 \text{ Гэв}$  с электромагнитом обычного типа. Ускорение до максимальной энергии происходит во второй ступени, в которой будет использоваться сверхпроводящий кольцевой электромагнит. Обе ступени расположены в общем туннеле длиной  $19,3 \text{ км}$ . В качестве

инжектора в бустер используется ускоритель У-70, интенсивность которого предполагается увеличить до  $5 \cdot 10^{13}$  *протон/цикл*.

Двухступенчатая система позволяет полностью использовать интенсивность инжектора и получить наибольшую среднюю интенсивность ускорителя. Облегчается режим работы сверхпроводящей ступени за счет уменьшения размеров пучка и снижения вклада остаточных полей. Появляется возможность создания без специального накопительного кольца встречных *pp*-пучков с энергией до  $1,5$  *Тэв* в с. ц. м. Кроме того, первую ступень можно использовать для накопления электронов и *ep*-столкновений.

Схема работы ускорителя показана на рис. 1. Пучок с интенсивностью  $6 \cdot 10^{14}$  *протон/цикл* накапливается в бустере последовательной инжекцией из ускорителя У-70 двенадцати импульсов с интенсивностью  $5 \cdot 10^{13}$  *протон/цикл*. Каждый импульс заполняет  $1/13$  часть периметра бустера. Между импульсами предусматриваются временные интервалы для того, чтобы облегчить работу вводных и выводных устройств и уменьшить потери при вводе и выводе.

После завершения накопления следует ускорение в течение  $3,5$  *сек* до промежуточной энергии  $200$  *Гэв* и перевод пучка в основной ускоритель, цикл работы которого состоит из  $20$ -секундного ускорения до  $3$  *Тэв*, вывода пучка в течение  $38$  *сек* и  $20$ -секундного спада поля. Средняя расчетная интенсивность при этом равна  $7,7 \cdot 10^{12}$  *протон/сек*.

В табл. 1 перечислены основные параметры ускорителя.

Т а б л и ц а 1

Основные параметры ускорителя

Параметр	Бустер	Основной ускоритель
Общая длина, м	19 288	19 288
Энергия инжекции, <i>Гэв</i>	70	200
Максимальная энергия, <i>Гэв</i>	200	3000
Напряженность магнитного поля при инжекции, <i>кэ</i>	1,169	3,343
Максимальная напряженность магнитного поля, <i>кэ</i>	3,343	50
Длительность цикла, <i>сек</i>	78	78
Импульсная интенсивность, <i>протон/цикл</i>	$6 \cdot 10^{14}$	$6 \cdot 10^{14}$
Средняя интенсивность, <i>протон/сек</i>	$7,7 \cdot 10^{12}$	$7,7 \cdot 10^{12}$

## 2. МАГНИТНАЯ СТРУКТУРА

Магнитные структуры основного ускорителя и бустера одинаковы и состоят из шести суперпериодов, каждый из которых включает  $30$  нормальных периодов и согласованный промежуток длиной

484,67 м. В I, III и V промежутках расположены соответственно система ввода и перевода, ускоряющие волноводы и система вывода. Промежутки II, IV и VI резервируются под встречные пучки (рис. 2).

На первом этапе все длинные промежутки будут иметь одинаковую структуру, обеспечивающую набег фазы бетатронных коле-

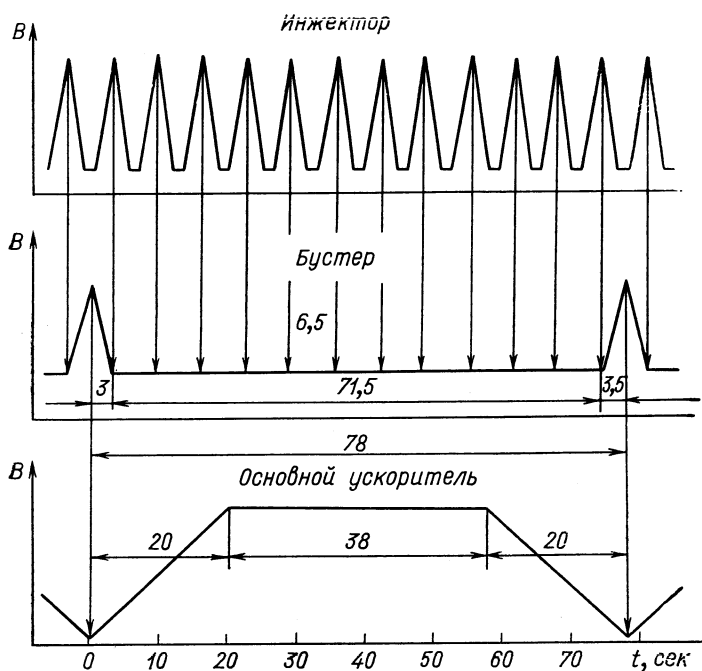


Рис. 2. Магнитный цикл инжектора У-70, медленного бустера и основного ускорителя УНК

баний 2л в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Положения и силы магнитооптических элементов выбраны из соображений удобства размещения устройств ввода, вывода и ускоряющих волноводов. Для проведения экспериментов на встречных пучках конструкция промежутков II, IV и VI в дальнейшем должна быть изменена с учетом конкретных требований эксперимента.

На рис. 3 показаны структуры нормального периода и согласованного промежутка, а также амплитудные функции. Согласованный промежуток симметричен относительно центра, поэтому показана только его первая половина. Первая согласующая линза промежутка является продолжением последней линзы примыкающего нормального периода. Все согласующие линзы имеют

длину около 6 м, их градиенты не превышают 7,5 кэ/см. Основные параметры магнитной структуры приведены в табл. 2.

Требования к сверхпроводящим магнитам и точности юстировки элементов кольцевого электромагнита перечислены в табл. 3.

Следует ожидать, что разброс вертикальных составляющих поля будет больше, чем  $5 \cdot 10^{-4}$ . Это не является серьезным пре-

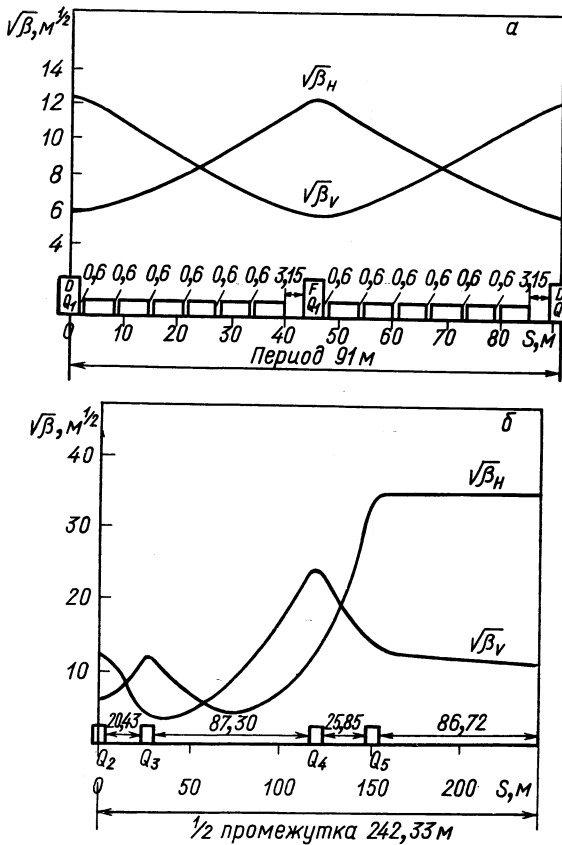


Рис. 3. Магнитная структура и амплитудные функции в нормальном периоде (а) и прямоугольном согласованном промежутке (б)

пятствием, так как диполи будут расставлены по результатам магнитных измерений так, чтобы подавить опасные резонансные гармоники. Более важно обеспечить стабильность магнитных характеристик. В этой связи требует детального изучения вопрос об остаточных полях в сверхпроводящих магнитах. Надежные

Таблица 2

## Основные параметры магнитной структуры

Параметр	Значение	Параметр	Значение
Длина орбиты, м	19 288	Полное число квадрупольей без учета согласованных промежутков	348
Средний радиус, м	3069,78		
Число суперпериодов	6	Длина диполя, м	5,80
Полное число нормальных периодов	180	Длина квадрупольей, м	3,95
Длина нормального периода, м	91	Радиус кривизны орбиты в диполе, м	1993,89
Длина согласованного промежутка, м	484,67	Отношение градиента квадрупольей к полю диполей, м <sup>-1</sup>	14,93
Число диполей в периоде	12	Бетатронные частоты	40,75
Полное число диполей	2160	Коэффициент расширения орбит	5,83 · 10 <sup>-4</sup>
Число квадрупольей в периоде	2	Критическая энергия, Гэв	33,8

Таблица 3

## Характеристики линз

Среднеквадратический относительный разброс полей диполей (вертикальная и радиальная составляющие)	5 · 10 <sup>-4</sup>
Среднеквадратическая погрешность привязки оптической оси линзы к геодезическому знаку по радиусу и вертикали	0,1 мм
Среднеквадратическая погрешность установки соседних линз по радиусу и вертикали	0,05 мм
Относительная нелинейная добавка к полю в апертуре диаметром 70 мм	10 <sup>-4</sup>

данные об остаточных полях пока отсутствуют, поэтому выбор промежуточной энергии 200 Гэв является предварительным.

Расчетная нелинейность поля сверхпроводящих дипольей составляет  $2 \div 3 \cdot 10^{-3}$ , которую трудно уменьшить без существенного усложнения конструкции магнитов. Поэтому ускоритель будет оснащен большим количеством корректоров, место для которых оставлено рядом с основными квадрупольными линзами. В настоящее время ведется детальная проработка систем коррекции.

Пучок, инжектируемый из У-70, имеет эмиттанс 2 мм·мрад по обоим направлениям и импульсный разброс  $\pm 1,5 \cdot 10^{-3}$ . Исходя из этого, с учетом возможных искажений орбиты, требований при медленном выводе и чрезвычайно жестких требований к поте-

рям частиц в сверхпроводящем ускорителе размер апертуры основного ускорителя был выбран равным 70 мм по горизонтали и 60 мм по вертикали. Размер апертуры бустера был выбран равным  $120 \times 65$  мм с учетом возможности использования его для накопления пучка электронов.

### 3. ВАКУУМ

Требования к вакууму в камерах обеих ступеней УНК определяются потерями протонов из-за рассеяния на остаточном газе. В режиме ускорения для бустера требуемое давление  $10^{-7}$  тор, для основного ускорителя  $10^{-8}$  тор, а в режиме встречных пучков — не менее  $10^{-9}$  тор для обеих ступеней при токе пучка до 5 а. Требуемый вакуум в бустере в режиме ускорения обеспечивается магниторазрядными насосами, установленными через 13 м, с быстротой действия 100 л/сек. Конструкция камеры, технология ее изготовления и вакуумно-термической обработки предусматривают возможность получения устойчивого вакуума с установкой дополнительного числа насосов в режиме встречных пучков, а также при использовании бустера в качестве накопителя электронов.

Расчетные оценки показывают, что при температуре стенок камеры основного ускорителя 20—40° К может быть получен вакуум с пучком  $2 \cdot 10^{-11}$  тор по водороду, а по остальным газам  $\sim 10^{-13}$  тор. Сублимационно-магниторазрядные насосы с быстротой действия 200 л/сек устанавливаются через 45 м. Камера может быть прогрета до 150—200° С перед охлаждением криостатов. При вакууме  $10^{-11}$ — $10^{-13}$  тор существенно замедляется процесс накопления сконденсированного газа на поверхности камеры, что позволяет вести работы в режиме встречных пучков без изменения вакуумной системы. Предварительная откачка камер обеих ступеней будет производиться передвижными постами с механическими безмасляными насосами.

### 4. СИСТЕМА ИНЖЕКЦИИ

Система инжекции протонного пучка в УНК состоит из системы вывода из У-70, канала транспортировки и системы ввода в УНК.

В системе вывода У-70 используется ударный магнит системы быстрого вывода, расположенный в прямолинейном промежутке, и дополнительный ударный магнит, который предполагается установить в прямолинейном промежутке. Система из пяти квадрупольных линз согласует пучок из У-70 с аксептансом канала транспортировки.

Канал транспортировки представляет собой жесткофокусирующий периодический канал типа ФОДО длиной 5,6 км. Расстояние между линзами составляет 50 м, длина линзы 1 м, градиент 600 э/см, диаметр апертуры линзы 100 мм. Максимальный размер пучка в канале не превышает 36 мм.

На всем протяжении канала транспортировки через каждые 1000 м расположены станции коррекции траектории пучка в обеих

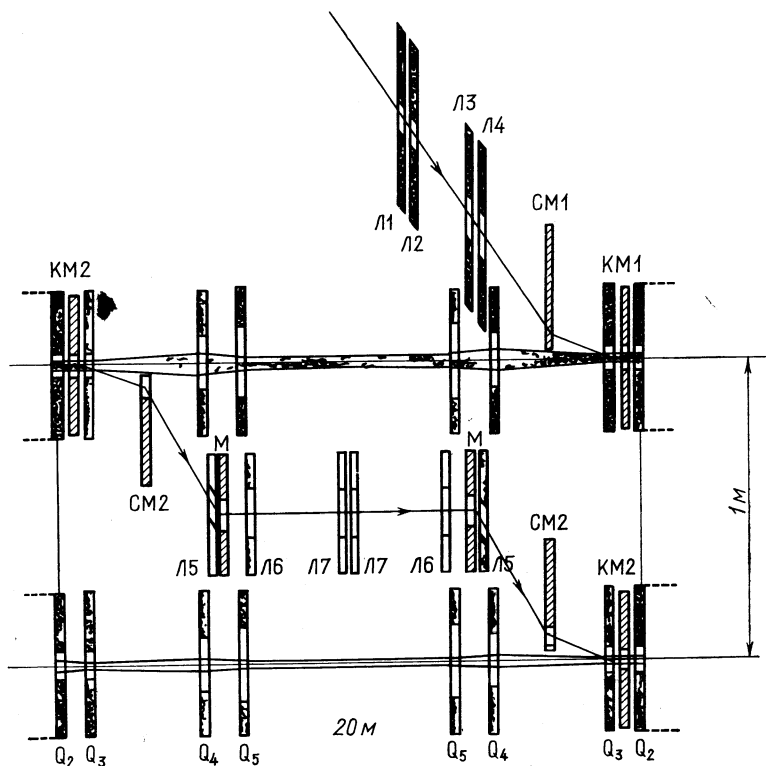


Рис. 4. Системы ввода пучка в бустер и перевода в основной ускоритель УНК

плоскостях, состоящие из датчиков положения пучка и трех корректирующих магнитов. В этом случае при среднеквадратическом допуске на погрешность привязки линз к оси канала 0,2 мм искажение траектории пучка не должно превышать 5 мм на всей длине канала. Конечная станция коррекции должна обеспечивать сопряжение оси канала с орбитой УНК и погрешностью не большей 1 мм.

Система ввода пучка в бустер УНК (рис. 4) расположена в большом прямолинейном промежутке 1. Она состоит из четырех линз



Л1—Л4, согласующих пучок с аксептансом УНК, септум-магнита СМ1 длиной 2 м с полем 7,5 кэ и ударного магнита КМ1 длиной 4 м с полем 1,2 кэ. Пучок вводится в бустер в вертикальной плоскости. Для корректировки траектории в обеих плоскостях используются два корректирующих магнита.

В этом же промежутке расположена система перевода пучка из бустера в сверхпроводящее кольцо. Перевод пучка производится в вертикальной плоскости с помощью двух ударных магнитов КМ2, двух септум-магнитов СМ2 и двух отклоняющих магнитов М, расположенных симметрично относительно центра прямолинейного промежутка. Согласование пучка бустера с аксептансом сверхпроводящей ступени производится с помощью системы квадрупольных линз Л5 — Л7.

## 5. УСКОРЯЮЩАЯ СИСТЕМА

Частота ускоряющего напряжения в бустере и сверхпроводящей ступени выбрана равной 200 Мгц. Поскольку в конце цикла ускорения У-70 частота равна 6 Мгц, будет производиться адiabатический перезахват на частоту 200 Мгц с помощью дополнительной ускоряющей станции на промежуточном плато магнитного поля при энергии 67 Гэв. Динамический диапазон изменения амплитуды ускоряющего напряжения этой станции лежит в пределах от 50 кэ до 4 Мэ, перестройка по частоте —  $10^{-5}$ . Синхронизация ВЧ полей У-70 и бустера УНК может быть затруднена из-за большой протяженности линии инжекции. Поэтому предполагается производить быструю корректировку фазы ВЧ-полей У-70 и бустера УНК по информации о фазовом положении сгустков. Синхронизация ВЧ-полей бустера и основного ускорителя УНК осуществляется аналогично.

Диапазон изменения частоты при ускорении от 70 до 200 Гэв составляет  $10^{-4}$  и от 200 до 3000 Гэв составляет  $10^{-5}$ . Ускоряющие устройства должны обеспечить амплитуду ВЧ-поля  $\sim 5$  мв для бустера и 17 мв для основного ускорителя. При токе пучка 1,5 а мощность, передаваемая пучку ускоряющими устройствами, составит соответственно 3,2 и 18 Мвт.

В настоящее время предпочтение отдается ускоряющим устройствам с бегущей волной как широкополосным, не требующим сложного оборудования в туннеле и обеспечивающим хорошее согласование с питающим фидером. Предполагается построить ускоряющую систему из однотипных модулей, каждый из которых состоит из ВЧ-генератора с выходной мощностью 800—1000 квт, с питающими устройствами и одной ускоряющей секцией длиной 6 м. Генератор и нагрузка волновода будут расположены в здании на поверхности земли непосредственно над ускоряющей

секцией и соединены с ней жесткими фидерными линиями. В бустере необходимо иметь восемь модулей, в основном ускорителе — двадцать восемь.

## 6. СИСТЕМА ВЫВОДА

Быстрый и медленный вывод ускоренного пучка предполагается производить по совмещенному каналу из прямолинейного промежутка (рис. 5). Выводной канал состоит из электростатического

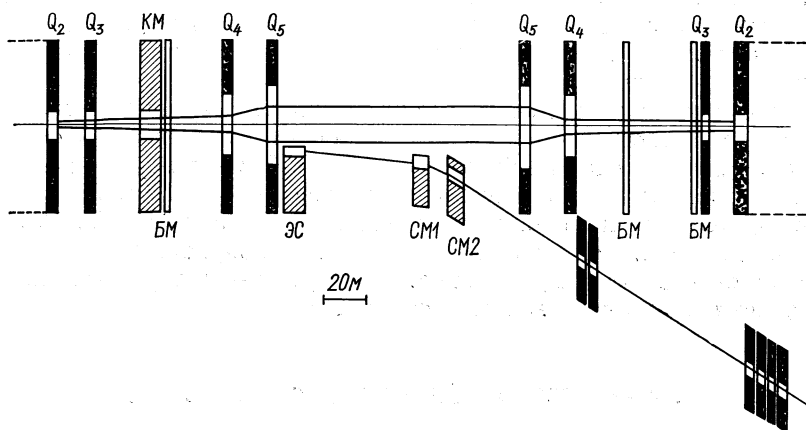


Рис. 5. Система вывода пучка из основного ускорителя УНК

септума ЭС и магнитных септумов СМ1, СМ2. Ионно-оптическая система из шести квадрупольных линз обеспечивает получение стигматичного изображения выведенного пучка в точке промежуточного фокуса, расположенной на расстоянии  $\sim 140$  м от конца прямолинейного промежутка. Элементы выводного канала расположены за огибающей пучка при инжекции, поэтому с помощью трех бамп-магнитов БМ создается полуволновое искажение замкнутой орбиты.

Структура согласованного прямолинейного промежутка рассчитывалась таким образом, чтобы получить в его центре максимум огибающей пучка по радиусу. При выбранном отношении максимальных значений  $\beta$ -функций в промежутке и в структуре ускорителя  $\sim 10$  можно получить в месте установки электростатического септума заброс пучка  $\sim 20$  мм. В этом случае максимальная амплитуда пучка в структуре ускорителя составляет  $\sim 20$  мм.

Для радиальной раскачки бетатронных колебаний при медленном выводе предполагается использовать нелинейный резонанс третьего порядка. Чтобы обеспечить высокую эффективность вывода, допуск на относительную величину нелинейности на краю

апертуры вакуумной камеры должен составлять для квадратичной составляющей  $10^{-4}$ , для кубической  $5 \cdot 10^{-5}$ . Для получения хорошей равномерности пучка по плотности при длительности вывода  $\sim 30$  сек допуск на относительную величину пульсаций тока в линзах резонансной раскочки должен быть  $\sim 10^{-6}$ , а в магнитах сверхпроводящего кольца  $\sim 10^{-9}$ . Выполнение указанных допусков является чрезвычайно сложной проблемой.

При быстром выводе заброс пучка в первый магнитный септум производится полноапертурным ударным магнитом КМ длиной 30 м с полем 0,9 кэ. Для упрощения технического решения ударного магнита и его источника питания при инъекции будут организованы промежутки в распределении пучка по азимуту длительностью 1,5—2 мксек.

Для защиты оборудования ускорителя от разрушения пучком при аварийной ситуации предусмотрена система аварийного сброса пучка, подобная системе быстрого вывода. Так как перекрыть весь диапазон энергии одной системой технически затруднительно, она разбивается на две системы: от 200 до 700 Гэв и от 700 Гэв до 3 Тэв. Пучок низкой энергии выводится на ловушку в вертикальной плоскости вниз, пучок высокой энергии — в горизонтальной плоскости наружу от кольца ускорителя.

## 7. КОМПЛЕКС ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Комплекс основных инженерных сооружений и технологических устройств распределен вдоль туннеля в 30 наземных зданиях. Вблизи каждого здания располагаются электрические подстанции открытого типа. Эти подстанции запитываются от главной понизительной подстанции 220/10 кэ, размещаемой в центре кольца. Графики постоянной и импульсной составляющих суммарной мощности УНК изображены на рис. 6.

Импульсная составляющая мощности определяется в основном системой питания сверхпроводящего кольцевого электромагнита. В целях уменьшения импульсной мощности предусмотрено программное изменение напряжения источников питания на ускорительной и инверторной частях цикла. Для ограничения напряжения, прикладываемого к обмоткам магнита относительно земли, используется 60 источников питания напряжением 1 кэ, которые включаются в расщелки прямой и обратной ветвей обмоток магнитов через шесть нормальных периодов. Источники питания будут расположены по два в каждом здании. В этих же зданиях размещаются криогенные модули, которые потребляют около половины постоянной составляющей электрической мощности УНК (см. рис. 6). Технологические здания имеют соединительные туннели с кольцевым залом, в которых проходят коммуникации от источни-

ков питания, криогенных модулей, насосных станций обессоленной воды и т. п.

Несколько технологических зданий расположены вдоль каналов инжекции и вывода протонов, вблизи прямолинейных согла-

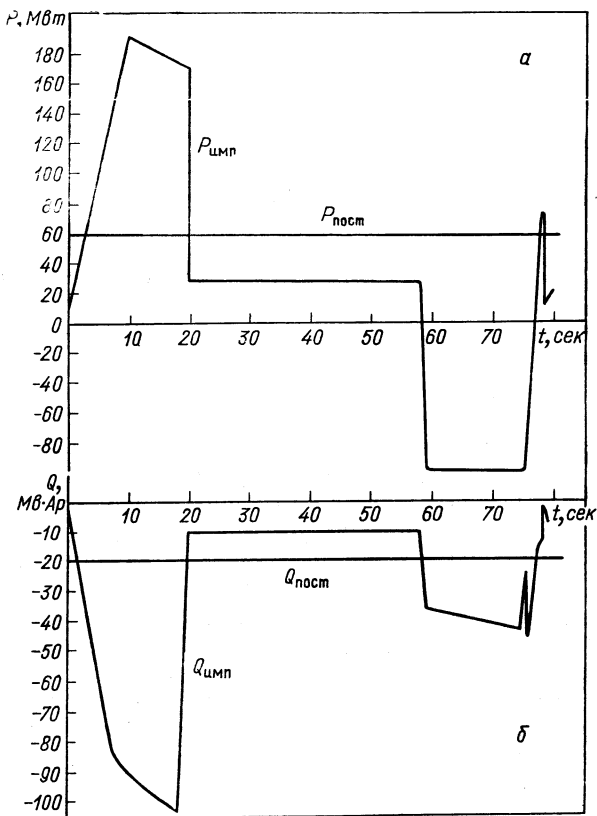


Рис. 6. Графики суммарной электрической активной (а) и реактивной (б) мощностей УНК:

$P_{\text{имп}}$ ,  $Q_{\text{имп}}$  — импульсные составляющие;  $P_{\text{пост}}$ ,  $Q_{\text{пост}}$  — постоянные составляющие

сованных промежутков и каналов пучков вторичных частиц. В них размещаются системы питания магнитной оптики, насосные станции обессоленной воды и другие технологические устройства. В одном из зданий располагается центральный пульт управления УНК. Уровень контроля и автоматизации всех технологических систем УНК проектируется в достаточном объеме для их обслуживания без постоянного дежурного персонала. Вся оперативная информация выводится на центральный пульт управления.

## 8. ДАЛЬНЕЙШЕЕ РАЗВИТИЕ УНК ИФВЭ

Проектирование ускорительно-накопительного комплекса ИФВЭ ведется с учетом перспективы его дальнейшего развития. Наличие двух колец открывает большие возможности для организации встречных пучков. На последующих стадиях развития комплекса предполагается осуществить в сверхпроводящем кольце режим накопления пучка протонов максимальной энергии с большим временем жизни. При столкновении этого пучка с пучком протонов, ускоренным в противоположном направлении в бустере УНК до энергии 200  $Gэв$ , возможно получить энергию в с. ц. м. до 1,5  $Tэв$ . Достижимое значение светимости  $10^{32}$ — $10^{33}$   $см^{-2} \cdot сек^{-1}$ .

Железное кольцо бустера проектируется так, что оно может быть использовано для накопления интенсивного электронного пучка. В настоящее время рассматривается способ накопления электронов с энергией 15—20  $Gэв$ , образованных при бомбардировке внешней мишени первичным протонным пучком [4] и при использовании внешнего электронного ускорителя [2]. В обоих случаях можно получить светимость  $\sim 10^{32}$   $см^{-2} \cdot сек^{-1}$ . Железное кольцо можно использовать также для накопления чистых пучков частиц (например, антипротонов), генерируемых на внешней мишени.

Изучается также возможность осуществления в УНК протон-антипротонных встречных пучков с использованием электронного охлаждения [5]. Для организации площадок для экспериментов со встречными пучками прямолинейные промежутки II, IV и VI оставлены свободными от всякого оборудования. Выбранная длина промежутков удовлетворяет всем требованиям экспериментов.

Дальнейший скачок по энергии в  $pp$ -столкновениях до 6  $Tэв$  в с. ц. м. можно получить сооружением в туннеле ускорителя дополнительного сверхпроводящего кольца с постоянным полем  $\sim 5$  тл. Это позволит накапливать пучок протонов с энергией  $\sim 3 Tэв$  и сталкивать его с пучком такой же энергии, ускоренным в импульсном сверхпроводящем кольце. В заключение авторы приносят благодарность специалистам, принявшим участие в обсуждении характеристик ускорительно-накопительного комплекса ИФВЭ и использования его для физических исследований.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адо Ю. М. и др. В кн.: Труды III Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Т. II, М., «Наука», 1973, с. 275.
2. Адо Ю. М. и др. В кн.: Труды IV Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Т. 1, М., «Наука», 1975, с. 44.
3. Васильев А. А., Логунов А. А. В кн.: Доклад на V Всесоюз. совещании по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1976.
4. Балбеков В. И. и др. В кн.: Доклад на X Международной конференции по ускорителям заряженных частиц. Серпухов, 1977.
5. Будкер Г. И. В кн.: Доклад на V Всесоюзном совещании по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1976.