

## УСКОРИТЕЛЬНО-НАКОПИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ИФВЭ

В.И.Балбеков, А.А.Васильев, Ю.П.Дмитревский,  
В.В.Елистратов, О.В.Курнаев, А.А.Логунов, К.П.Мьзников,  
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, 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.Моносзон, 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

Г.П.Воронцов, А.М.Гюльханданян, Е.Л.Макеев, Ф.З.Ширяев

Государственный комитет по использованию атомной энергии,  
Москва

На протяжении ряда лет специалистами ИФВЭ, НИИЭФА, МРТИ АН СССР ведется изучение различных возможностей развития ускорительного комплекса Института физики высоких энергий /1-3/. Целью этой работы является создание новой экспериментальной базы, которая позволила бы углубить и расширить фронт исследований в области физики высоких энергий. После рассмотрения ряда вариантов в настоящее время в качестве основы выбран сверхпроводящий протонный синхротрон на энергию 3 ТэВ с возможностью дальнейшего создания системы встречных пучков.

## I. Основные параметры

Планируется сооружение двухступенчатого ускорителя протонов. Первая ступень является медленным бустером и представляет собой синхротрон на энергию 200 ГэВ с электромагнитом обычного типа. Ускорение до максимальной энергии 3 ТэВ происходит во второй ступени, в которой будет использоваться сверхпроводящий кольцевой электромагнит. Обе ступени расположены в общем туннеле длиной 19,3 км. В качестве инжектора в бустер используется ускоритель У-70, интенсивность которого предполагается увеличить до  $5 \cdot 10^{13}$  протонов за цикл.

Схема работы ускорителя показана на рис. I. Пучок с интенсивностью  $6 \cdot 10^{14}$  протонов накапливается в бустере путем последовательной инжекции из ускорителя У-70 12 импульсов с интенсивностью  $5 \cdot 10^{13}$  протонов. 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 с 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 с и 20-секундного спада поля. Средняя расчетная интенсивность при этом равна  $7,7 \cdot 10^{12}$  прот/с.

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 (p-p)-пучков с энергией до 1,5 ТэВ в системе центра масс. Кроме того, I ступень можно использовать для накопления электронов и ер-столкновений.

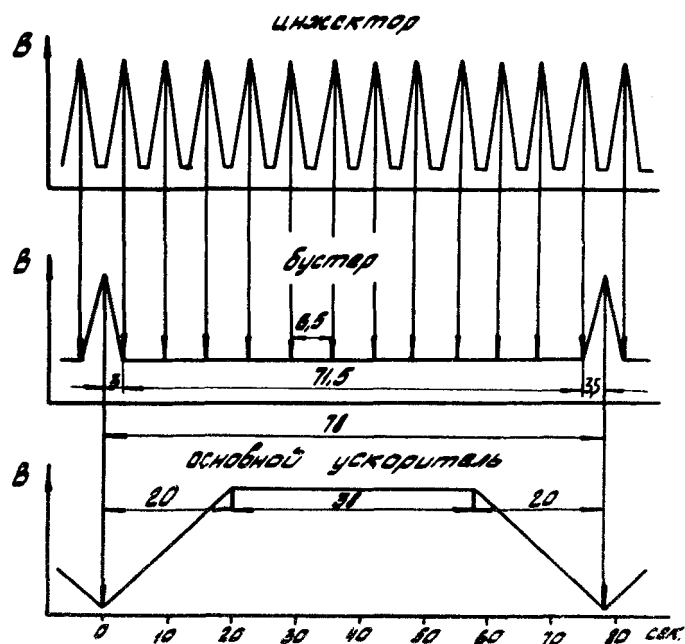


Рис. I. Магнитный цикл инжектора У-70, медленного бустера и основного ускорителя УНК.

Т а б л и ц а I  
Основные параметры ускорителя

Наименование	Ед. изм.	Бустер	Основной ускоритель
1. Общая длина	м	19288	19288
2. Энергия инжекции	ГэВ	70	200
3. Максимальная энергия	ГэВ	200	3000
4. Напряженность магнитного поля при инжекции	кЭ	1,169	3,343
5. Максимальная напряженность магнитного поля	кЭ	3,343	50
6. Длительность цикла	с	78	78
7. Импульсная интенсивность	прот/цикл	$6 \cdot 10^{14}$	$6 \cdot 10^{14}$
8. Средняя интенсивность	прот/с	$7,7 \cdot 10^{12}$	$7,7 \cdot 10^{12}$

## 2. Магнитная структура

Магнитные структуры основного ускорителя и бустера одинаковы и состоят из 6 суперпериодов, каждый из которых включает 30 нормальных периодов и согласованный промежуток длиной 484,67 м. В трех прямолинейных промежутках расположены: система ввода и перевода, ускоряющие волноводы и система вывода. Остальные три промежутка резервируются под встречные пучки.

На рис.2 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.

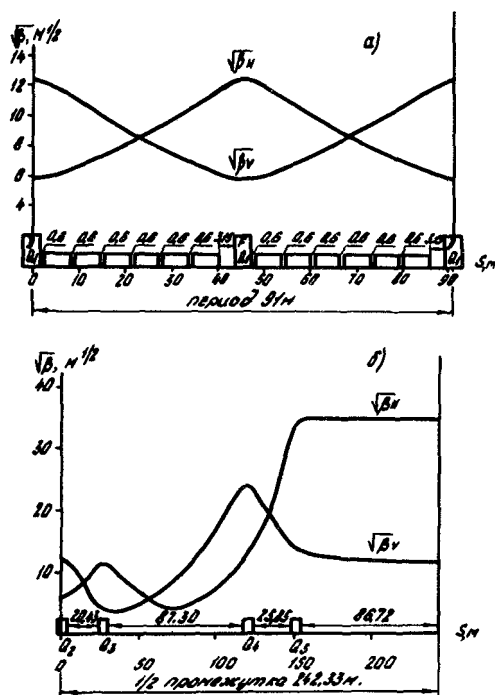


Рис.2. Магнитная структура и амплитудные функции в нормальном периоде (а) и прямолинейном согласованном промежутке (б).

Т а б л и ц а 2

## Основные параметры магнитной структуры

Параметр	Ед.изм.	Значение
1. Длина орбиты	м	19288
2. Средний радиус	м	3069,78
3. Число суперпериодов		6
4. Полное число нормальных периодов		180
5. Длина нормального периода	м	91
6. Длина согласованного промежутка	м	484,67
7. Число диполей в периоде		12
8. Полное число диполей		2160
9. Число квадруполей в периоде		2
10. Полное число квадруполей без учета согласованных промежутков		348
11. Длина диполя	м	5,80
12. Длина квадруполя	м	3,95
13. Радиус кривизны орбиты в диполе	м	1993,89
14. Отношение градиента квадруполей к полю диполей	м <sup>-1</sup>	14,93
15. Бетатронные частоты		40,75
16. Коэффициент расширения орбит		$5,83 \cdot 10^{-4}$
17. Критическая энергия	ГэВ	38,8

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

Т а б л и ц а 3

1. Среднеквадратичный относительный разброс полей диполей (вертикальная и радиальная составляющие)	$5 \cdot 10^{-4}$
2. Среднеквадратичная точность привязки оптической оси линзы к геодезическому знаку по радиусу и вертикали	0,1 мм
3. Среднеквадратичная точность установки соседних линз по радиусу и вертикали	0,05 мм
4. Относительная нелинейная добавка к полю в апертуре диаметром 70 мм	$10^{-4}$

Следует ожидать, что разброс вертикальных составляющих поля будет больше чем  $5 \cdot 10^{-4}$ . Это не является серьезным препятствием, 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 данные об остаточных полях пока отсутствуют, поэтому выбор промежуточной энергии 200 ГэВ является предварительным.

Расчетная нелинейность поля сверхпроводящих диполей составляет величину  $2+3 \cdot 10^{-3}$ , 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  $2 \text{ мм} \cdot \text{мрад}$  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 потерям частиц в сверхпроводящем ускорителе размер апертуры основного ускорителя был выбран 70 мм по горизонтали и 60 мм по вертикали. Размер апертуры бустера был выбран равным 120 мм х 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 магнито-разрядными насосами с быстротой действия 100 л/с, установленными через 13 м. Конструкция камеры, технология ее изготовления и вакуум-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 сверхпроводящего ускорителя  $20-40^\circ\text{К}$  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/с устанавливаются через 45 м. Камера может быть прогрета до  $150-200^{\circ}\text{C}$  перед охлаждением криостатов. При вакууме  $10^{-11} - 10^{-13}$  тор существенно замедляется процесс накопления сконденсированного газа на поверхности камеры, что дает возможность 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 I6, и дополнительный ударный магнит, который предполагается установить в прямолинейном промежутке I4. 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 плоскостях, состоящие из датчиков положения пучка и трех корректирующих магнитов. В этом случае при среднеквадратичном допуске на точность 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 не хуже 1 мм.

Система ввода пучка в бустер УНК (рис.3) расположена в большом прямолинейном промежутке I. Она состоит из квартета 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.

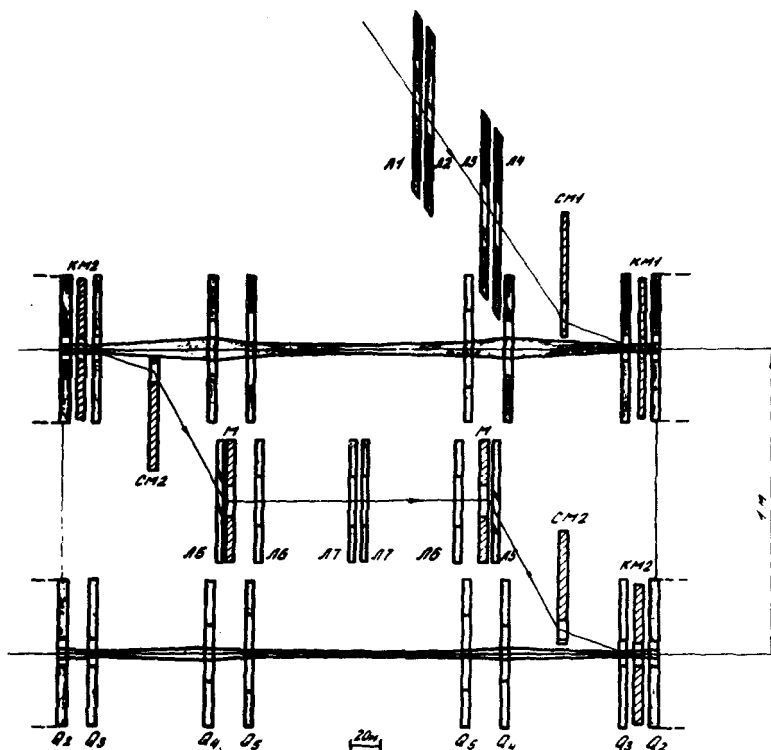


Рис.3. Системы ввода пучка в бустер и перевода в основной ускоритель УНК.

В этом же промежутке расположена система перевода пучка из бустера в сверхпроводящее кольцо. Перевод пучка производится в вертикальной плоскости с помощью двух ударных магнитов  $KM2$ , двух септум-магнитов  $CM2$  и двух отклоняющих магнитов  $M$ , расположенных симметрично относительно центра прямолинейного промежутка. Согласование пучка бустера с аксептансом сверхпроводящей ступени производится с помощью системы квадрупольных линз  $L5-L7$ .

### 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 адиабатический перзахват на частоту 200 МГц с помощью дополнительной ускоряющей

станции на промежуточном плате магнитного поля при энергии 67 ГэВ. Динамический диапазон изменения амплитуды ускоряющего напряжения этой станции лежит в пределах от 50 кВ до 4 МВ, 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 -  $10^{-5}$ . 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 секции 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 8 модулей, в основном ускорителе - 28.

## 6. Система вывода

Быстрый и медленный вывод ускоренного пучка предполагается производить по совмещенному каналу из прямолинейного промежутка У (рис.4). Выводной канал состоит из электростатического септума ЭС и магнитных септумов СМ1-СМ2. Ионно-оптическая система из шести квадрупольных линз обеспечивает получение стигматичного изображения выведенного пучка в точке промежуточного фокуса, отстоящей от ускорителя на расстоянии  $\sim 140$  м от конца прямолинейного промежутка У. Элементы выводного канала расположены за огибающей пучка при инжекции, поэтому с помощью трех бамп-магнитов БМ создается полуволновое искажение замкнутой орбиты.

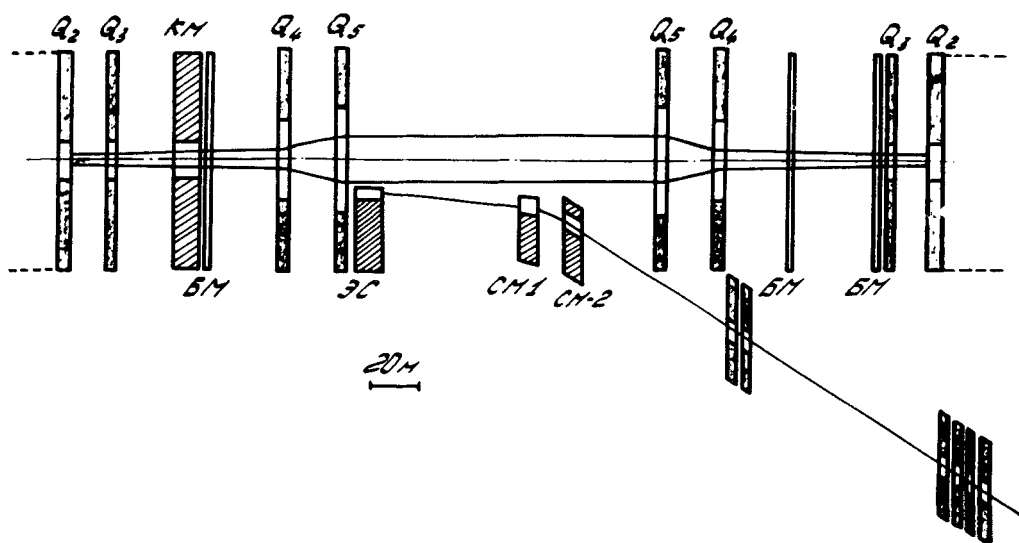


Рис.4. Система вывода пучка из основного ускорителя УНК.

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  $\sim 30$  с допуск на относительную величину пульсаций тока в линзах резонансной раскачки должен быть порядка  $10^{-6}$ , а в магнитах сверхпроводящего кольца порядка  $10^{-9}$ . 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 инжекции будут организованы промежуточные в распределении пучка по азимуту длительностью  $I,5 - 2$  мкс.

Для защиты оборудования ускорителя от разрушения пучком при аварийной ситуации предусмотрена система аварийного сброса пучка, подобная системе быстрого вывода. Так как перекрыть весь диапазон энергий 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 кВ, размещаемой в центре кольца. Графики постоянной и импульсной составляющих суммарной мощности УНК изображены на рис.5.

Импульсная составляющая мощности определяется в основном системой питания сверхпроводящего кольцевого электромагнита. С целью уменьшения импульсной мощности предусмотрено программное изменение величины напряжения источников питания на ускорительной и инверторной частях цикла. Для ограничения напряжения, прикладываемого к обмоткам магнита относительно земли, используется 60 источников питания напряжением 1 кВ, которые включаются в рассечки 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 (рис.5). Технологические здания имеют соединительные туннели с кольцевым залом, в которых проходят коммуникации от источников питания, криогенных модулей, насосных станций обессоленной воды и т.д.

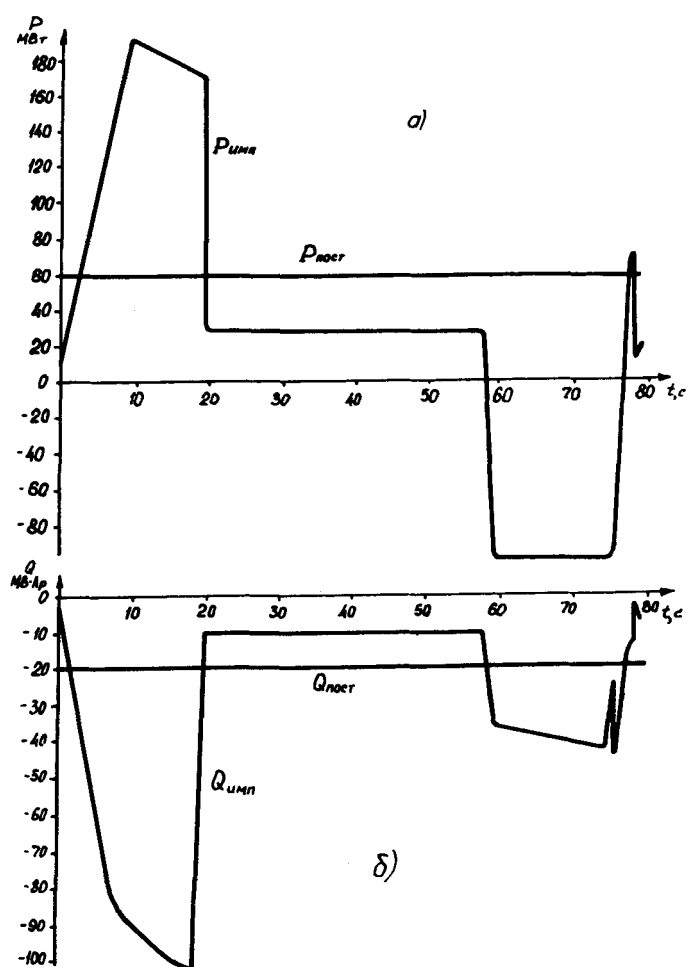


Рис.5. Графики суммарной электрической мощности УНК:  
а) активная мощность;  $P_{\text{имп}}$  - импульсная составляющая;  
 $P_{\text{пост}}$  - постоянная составляющая; б) реактивная мощность;  
 $Q_{\text{имп}}$  - импульсная составляющая;  $Q_{\text{пост}}$  - постоянная составляющая.

Несколько технологических зданий расположены вдоль каналов инжекции и вывода протонов, вблизи прямолинейных согласованных 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. Будущее развитие

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 ГэВ, возможно получение энергии в системе центра масс до 1,5 ТэВ. Достижимая величина светимости  $10^{32} - 10^{33} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ .

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 ГэВ, образованных при бомбардировке внешней мишени первичным протонным пучком <sup>/4/</sup> и при использовании внешнего электронного ускорителя <sup>/2/</sup>. В обоих случаях кажется возможным получить светимость порядка  $10^{32} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ . Железное кольцо может быть использовано 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 <sup>/5/</sup>. Для организации площадок для экспериментов со встречными пучками три прямолинейных промежутка оставлены свободными от всякого оборудования. Выбранная длина промежутков позволяет удовлетворить всем требованиям экспериментов.

Дальнейший скачок по энергии в (p-p)-столкновениях 6 ТэВ в системе центра масс может быть получен путем сооружения в

туннеле ускорителя дополнительного сверхпроводящего кольца с постоянным полем  $\sim 5$  Т. Это даст возможность накапливать пучок протонов с энергией  $\sim 3$  ТэВ и сталкивать его с пучком такой же энергии, ускоренным в импульсном сверхпроводящем кольце.

В заключение авторы приносят благодарность большому кругу специалистов, принявших участие в обсуждении характеристик ускорительно-накопительного комплекса ИФВЭ и различных возможностей его использования для физических исследований.

### Л и т е р а т у р а

1. Ю.М.Адо, А.А.Логунов и др. Труды III Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т.II, стр.275, "Наука", Москва, 1973.
2. Ю.М.Адо и др. Труды IV Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т.I, стр.44, "Наука", Москва, 1975.
3. А.А.Васильев, А.А.Логунов. Состояние разработки ускорительно-накопительного комплекса (УНК). Доклад на V Всесоюзном совещании по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1976.
4. В.И.Балбеков, С.С.Герштейн и др. О возможности накопления интенсивного электронного пучка с помощью мишени, облучаемой протонами. Доклад на данной конференции.
5. Г.И.Будкер, Т.А.Всеволожская и др. Предложение по осуществлению протон-антипротонных пучков на основе метода электронного охлаждения в проекте УНК. Доклад на V Всесоюзном совещании по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1976.

## ДИСКУССИЯ

E.D.Courant: Can you tell us when this complex will be built?

К.П.Мызников: Я могу сказать, что сейчас делается. В настоящее время выбрана площадка для УНК. На ней ведутся геологические исследования стабильности грунтов, изучаются возможности электрической сети с учетом графика мощности, который приведен в докладе.

В ИФВЭ, НИИЭФА и Сакле начата работа над сверхпроводящими однометровыми магнитами. В дальнейшем эта работа будет продолжена над магнитами большей длины. Ведется работа по моделированию криогенной системы. В ИФВЭ строится большой корпус, в котором будут размещены стенды магнитных измерений, вакуумный, криогенный стенд и стенды других систем ускорителя.

С.П.Капица: Какое место в проекте УНК занимает электронное охлаждение?

К.П.Мызников: На первой стадии проекта большее внимание мы уделяем протонному ускорителю. Работа над электронным охлаждением и осуществлением  $p\bar{p}$ -встреч — это одна из возможностей дальнейшего развития.