

УСКОРИТЕЛЬНО-НАКОПИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ИФВЭ

(СОСТОЯНИЕ ДЕЛ И РАЗВИТИЕ)

А.И.Агеев, В.Н.Алферов, В.И.Балбеков, В.И.Гридасов, Г.Г.Гуров,
Ю.П.Дмитревский, А.Ф.Дунайцев, В.В.Елистратов, О.В.Курнаев,
В.Н.Лебедев, А.А.Логунов, К.П.Мызников, В.Г.Рогозинский, Л.Д.Соловьев,
И.И.Сулыгин, Н.М.Тараканов, Ю.С.Федотов, Б.К.Шембель, В.А.Ярба
Институт физики высоких энергий, Серпухов

А.Д.Артемов, С.В.Васильев, В.А.Глухих, О.А.Гусев, В.В.Иванов,
Б.Г.Карасев, М.Н.Косякин, И.Ф.Мальшев, И.В.Мозин, А.В.Никифоровский,
В.И.Перегуд, О.Б.Сенченко, П.В.Смирнов, В.А.Титов

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

А.А.Васильев, Г.П.Воронцов, Е.Л.Макеев, Ф.З.Ширяев
Государственный комитет по использованию атомной энергии, Москва

1. Основные характеристики УНК

Сооружение ускорительно-накопительного комплекса ИФВЭ ведется в соответствии с ранее сообщавшимся проектом¹. Структура и параметры УНК выбраны с учетом возможности работы как в режиме ускорения, так и в режиме встречных пучков². В проекте предусмотрены следующие возможности:

- ускорение протонов до энергии 3 ТэВ для экспериментов с неподвижными мишенями;
- встречные протон-протонные пучки с энергиями 0,4x3 ТэВ, что позволит получить в системе центра масс энергию 2,2 ТэВ;
- дальнейшее повышение энергии встречных пучков до 6 ТэВ в с.п.м.

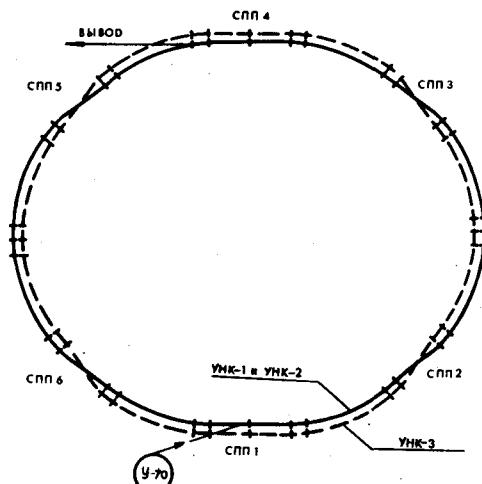


Рис. 1. Схема магнитной структуры УНК

На рис.1 показана схема магнитной структуры УНК. Четыре прямолинейных промежутка СПП 2,3,5,6 длиной по 490 м предназначены для экспериментов со встречными пучками. Технологические промежутки СПП 1,4 имеют длину по 800 м. В СПП 1 сосредоточено основное оборудование систем ввода, ускорения, локализации потерь и аварийного сброса пучка. Выход пучка осуществляется из промежутка СПП 4, в котором сосредоточено все выводное оборудование и основные средства защиты сверхпроводящих магнитов от облучения.

Инжектором УНК является существующий протонный синхротрон с энергией 70 ГэВ (У-70), интенсивность которого планируется повысить до $5 \cdot 10^{13}$ протонов за цикл. Пучок из У-70 инжектируется в первую ступень УНК (УНК-1), представляющую собой ускоритель с обычными магнитами. Максимальная энергия частиц в УНК-1 равна 600 ГэВ в режиме ускорения и 400 ГэВ в режиме встречных пучков. Периметр УНК-1 в 14 раз превышает периметр У-70, поэтому накопление пучка осуществляется путем многократной инъекции. Для этого пучок, ускоренный в У-70, предварительно группируется на частоте ускоряющего поля УНК 200 МГц и накапливается в УНК-1 до интенсивности $6 \cdot 10^{14}$ протонов, для чего потребуется 12 импульсов инъекции в течение 71,5 с. Часть пе-

риметра УНК остается незаполненной пучком, что дает возможность образовать интервалы, необходимые для облегчения работы вводных и выводных устройств. После накопления производится ускорение пучка в УНК-1 и однооборотный перевод его в сверхпроводящую вторую ступень УНК (УНК-2), где он ускоряется до энергии 3 ТэВ. Цикл УНК-2 состоит из ускорения пучка в течение 40 с, вывода в течение 40 с и спада поля в течение 40 с.

УНК-1 расположен в тоннеле над сверхпроводящим кольцом УНК-2 (рис.2). В плане идеальные орбиты этих ускорителей точно совпадают. Размеры тоннеля выбраны с таким расчетом, чтобы в будущем в нем можно было разместить дополнительный сверхпроводящий накопитель УНК-3. Это позволит получить встречные протон-протонные пучки с энергией 6 ТэВ в с.п.м. Орбиты УНК-2 и УНК-3 расположены в одной горизонтальной плоскости. Чтобы осуществить их пересечение в четырех прямолинейных промежутках, предназначенных для встреч, производится перевод пучков с одного края тоннеля на другой (рис.1). В этих же прямолинейных промежутках предусмотрена возможность организации встреч протонных пучков 0,4x3 ТэВ. В этом случае пересечение пучков будет происходить в вертикальной плоскости.

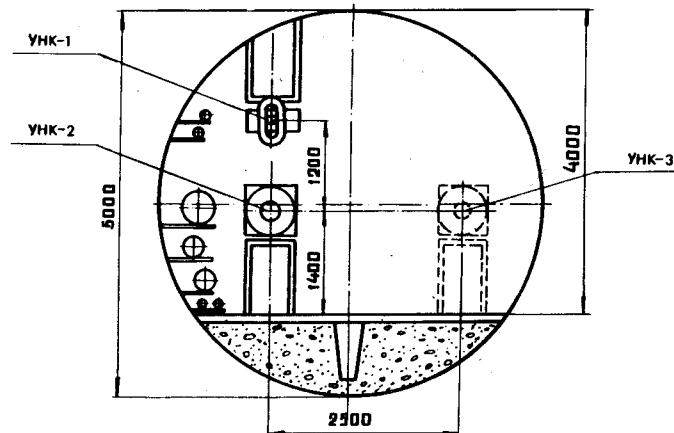


Рис. 2. Поперечное сечение тоннеля УНК

Параметры УНК в ускорительном режиме приведены в табл.1.

Размер области хорошего поля в УНК-2 составляет 13 см, что удовлетворяет условиям ускорения, накопления и вывода пучка³. Для уменьшения взаимодействия пучка высокой интенсивности с вакуумной камерой она выполнена на всем протяжении гладкой, а все имеющиеся полости закрыты лайнерами.

Большое внимание уделено разработке мер по уменьшению радиационного облучения сверхпроводящих магнитов УНК-2 за счет потерь пучка при ускорении. Накопление пучка производится в УНК-1, оборудование которого менее чувствительно к радиации. В обеих ступенях УНК создаются системы локализации потерь пучка, расположенные в СПП 1, а также системы формирования эмиттанса⁴. В случаях нарушения нор-

мального режима ускорения будет производиться аварийный вывод пучка из ускорителя в специальную ловушку ⁵.

Таблица 1. Параметры УНК в ускорительном режиме

Параметр	УНК-1	УНК-2
Максимальная энергия, ГэВ	600	3000
Энергия инжекции, ГэВ	70	400-600
Длина орбиты, м	20771,8	20771,8
Максимальная напряженность магнитного поля, Т	1	5
Напряженность магнитного поля при инжекции, Т	0,116	0,67-1
Время ускорения, с	11	40
Суммарная амплитуда ускоряющего напряжения, МВ	8	11
Максимальный прирост энергии за оборот, МэВ	2,1	6
Критическая энергия, ГэВ	42	42
Максимальная величина β -функции в регулярной части, м	152	152
Максимальная величина β -функции на участке вывода, м	400	784
Максимальная величина Ψ -функции в регулярной части, м	2,43	2,43

Предусматривается три режима вывода пучка из УНК-2: медленный вывод в течение 40 с, быстрый резонансный вывод 10 импульсов длительностью 1-2 мс с интервалом 3 с по $6 \cdot 10^{13}$ протонов и однооборотный вывод. Медленный вывод будет осуществляться с использованием нелинейного резонанса 3-го порядка. Одновременно с медленным может производиться многократный быстрый резонансный вывод. Расчетная эффективность вывода составляет 99%. При быстром выводе пучка с такой эффективностью возникают проблемы, связанные с радиационным разогревом СП магнитов, расположенных вблизи выводного участка, из-за неизбежных потерь протонов на выводных устройствах. Разработаны специальные меры защиты магнитов, расположенных в радиационно опасных местах ⁶. Они позволяют уменьшить радиационный разогрев обмоток магнитов до приемлемого уровня. Учитывая неопределенность в эффективности вывода, для обмоток этих магнитов температурный запас по критическому току взят не менее 0,5 К ⁷.

Для выбранных параметров магнитного цикла средняя мощность, потребляемая комплексом, равна 120 МВт при пиковой мощности 200 МВт. Мощность криогенной системы равна 50 кВт на температурном уровне 4,2 К.

2. Встречные пучки в УНК

Оптическая схема промежутка с малой β -функцией для встречных пучков pp с энергиями 0,4x3 ТэВ показана на рис.3. Расположение магнитооптических элементов симметрично относительно центра промежутка, поэтому на рисунке показана только его левая половина.

Накопление пучка с энергией 70 ГэВ в УНК-1 будет производиться так же, как в режиме с неподвижной мишенью. Вначале отклоняющий магнит M будет включен, так что пучок пойдет по трассе T1 в обход детектора. После завершения накопления пучок будет ускорен до энергии 525 ГэВ и переведен в УНК-2, где он пойдет по трассе T2. Система перевода находится в СПП4.

После этого магнит M будет выключен, и произойдет новое накопление пучка с энергией 70 ГэВ в УНК-1. При этом пучок пойдет по трассе T1 в направлении, противоположном первоначальному. После завершения накопления пучки в обеих ступенях будут синхронно ускорены до конечных энергий, причем в любой момент времени энергии пучков в УНК-1 и УНК-2 будут относиться как 1:7,5.

На рис.4 показаны амплитудные функции бетатронных колебаний. Они изменяются в течение цикла. Пунктирные линии относятся к этапам накопления и ускорения пучков. При этом максимальные значения амплитудных функций в промежутке имеют почти такую же величину, как в регулярной части структуры. Это позволяет при умеренных апертурах магнитооптических элементов построить канал с аксептантом, равным аксептанту регулярной части. После ускорения пучков до максимальных энергий их эмиттансы уменьшаются в 5,7 раза, что позволяет увеличить максимальные значения амплитудных функций. Перестройка будет производиться путем изменения токов возбуждения квадрупольных линз. Амплитудные функции для режима встреч показаны на рис.4 сплошными линиями. На всех этапах набега фаз бетатронных колебаний в пределах промежутка равны 4π по обоим направлениям. В режиме встреч отсутствует вертикальная дисперсия орбит как в пересечении, так и в регулярной части магнитной структуры. Необходимость подавления дисперсии привела к довольно сложной форме трасс T1 и T2. Горизонтальная дисперсия подавлена во всех СПП с помощью примыкающих к ним специальных участков магнитной структуры ².

Основные параметры встречных пучков pp с энергиями 0,4x3 ТэВ представлены в следующей таблице.

При выбранных параметрах пучки в области взаимодействия имеют круговые сечения с одинаковыми диаметрами. Пучки пересекаются под углом ~ 1 мрад в вертикальной плоскости.

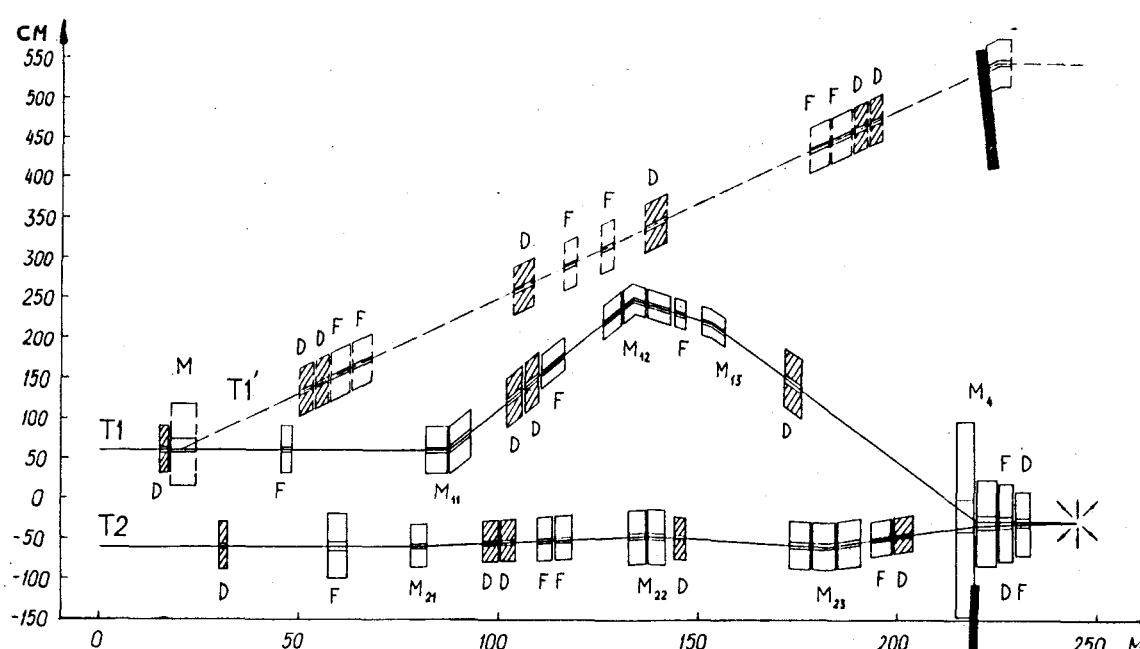


Рис. 3. Схема промежутка для встречных пучков pp с энергиями 0,4x3 ТэВ

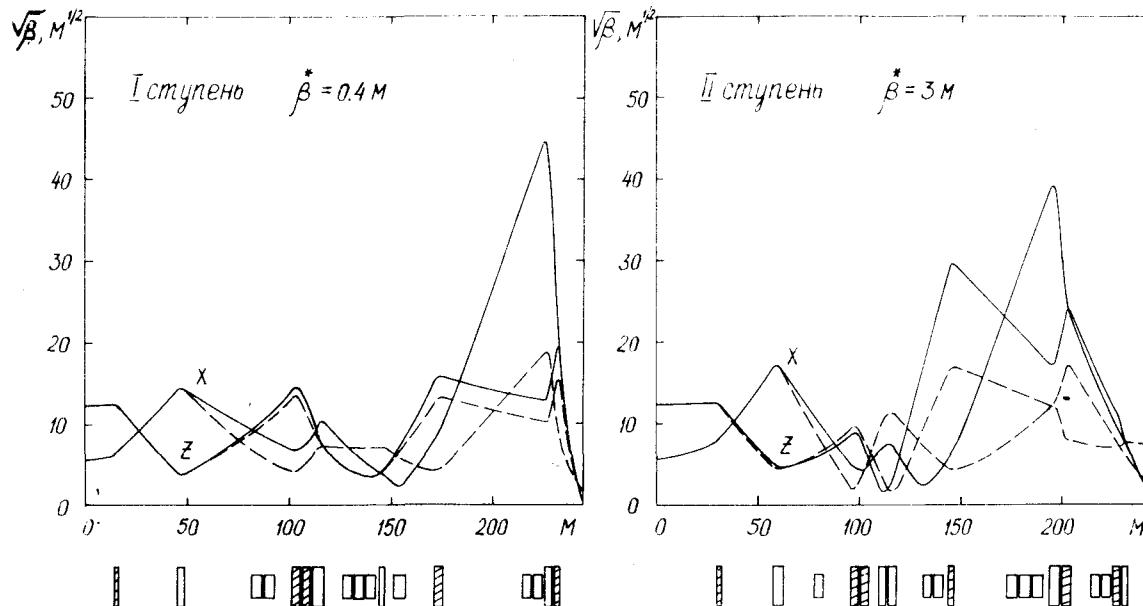


Рис.4. Амплитудные функции на участке встреч пучков pp с энергиями 0,4x3 ТэВ

Таблица 2. Параметры встречных протон-протонных пучков

Параметр	УНК-1	УНК-2
Максимальная энергия, ГэВ	400	3000
Полная интенсивность	$2,4 \cdot 10^{14}$	$2,4 \cdot 10^{14}$
Число сгустков	$1,2 \cdot 10^4$	$1,2 \cdot 10^4$
Число частиц в сгустке	$2 \cdot 10^{10}$	$2 \cdot 10^{10}$
Инвариантный поперечный эмиттанс, x/z, мм·мрад	20/20	20/20
Инвариантный продольный эмиттанс сгустка, МэВ·с·м	10	10
Ф-функция в пересечении, x/z, м	0,4/0,4	3/3
Диаметр пучка в пересечении, мм	0,27	0,27
Длина сгустка при максимальной энергии, см	18	12
Расстояние между сгустками, м	1,5	1,5
Длина области взаимодействия, см	15	
Светимость, см ⁻² ·с ⁻¹	$1 \cdot 10^{32}$	
Число событий на столкновение	0,05	
Сдвиги бетатронных частот при встречах	$0,8 \cdot 10^{-3}$	
Длина свободной зоны для детектора, м	+12	

Отметим, что требования к фазовому объему сгустков в режиме встреч значительно жестче, чем в режиме с неподвижной мишенью. Это связано с необходимостью уменьшения размеров области взаимодействия и повышения светимости. Чтобы удовлетворить этим требованиям, предполагается использовать однооборотную инъекцию в бустер ускорителя У-70, хотя это и сопряжено с потерей интенсивности.

Дальнейшее развитие УНК пойдет по пути создания встречных пучков 3x3 ТэВ. Сооружение в тоннеле сверхпроводящего накопительного кольца УНК-3 позволит организовать встречные пучки pp и достичь энергии 6 ТэВ в с.ц.м. Рассмотрена возможность осуществления в УНК встреч pp⁸. Предварительные проработки показали, что при использовании в качестве инжектора существующего ускорителя У-70 в pp встречах может быть получена светимость порядка $10^{32} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, в pp-встречах — порядка $10^{30} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

3. Разработка сверхпроводящих магнитов

В ИФВЭ продолжалась разработка конструкции сверхпроводящих диполей УНК 9,10. Для исследований полномасштабных моделей в циркуляционном режиме охлаждения был создан стенд (рис.5). Он предназначен для испытаний как одиночных

магнитов, так и цепочки последовательно соединенных магнитов. Криогенная схема стекда позволяет производить в режиме автоматического регулирования захолаживание и отогрев, а также криостатирование магнитов как однофазным, так и двухфазным потоками гелия. Результаты испытаний подробно сообщаются в отдельном докладе на этой конференции¹¹.

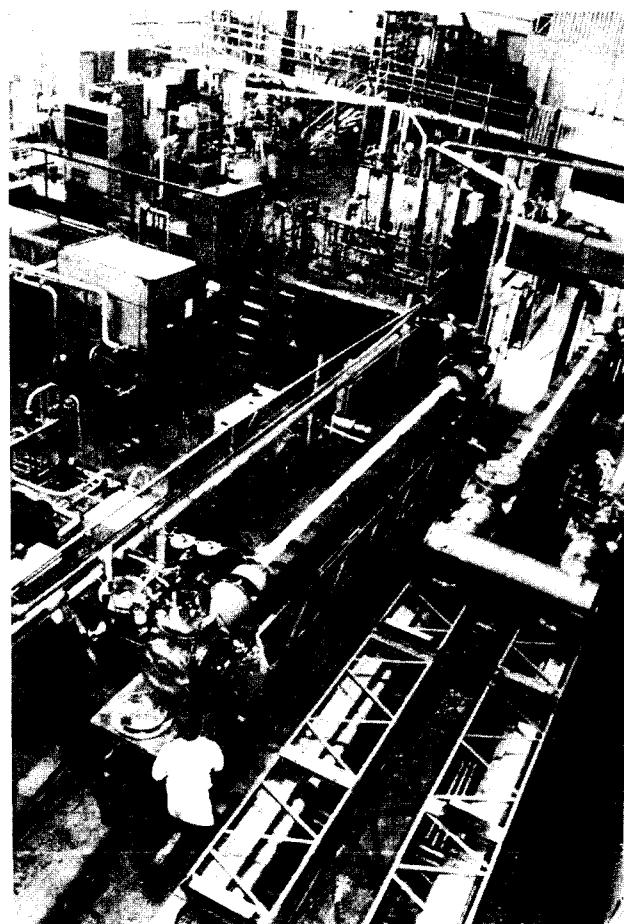


Рис. 5. Стенд для исследования полномасштабных моделей СП-магнитов

Исследования в циркуляционном режиме охлаждения проводились в условиях, близких к рабочим условиям УНК. Охлаждение диполя производилось потоком однофазного гелия с общим расходом около 100 г/с при температуре на входе в криостат 4,2 К. Тренировка всех магнитов идет в полях, значительно превышающих величину рабочего поля УНК 5 Т. Типичная кривая тренировки дана на рис.6. Через 5-7 переходов поле в центре апертуры достигает максимального значения 6,2 Т. Измерения гармонического состава магнитного поля при различных уровнях поля показали, что отклонения относительных величин гармоник от допустимых значений на величину $1 \cdot 10^{-4}$ начинается при полях, превышающих 6 Т. Таким образом, запас по критическому току и механическая стабильность диполей при рабочем поле 5 Т являются вполне удовлетворительными.

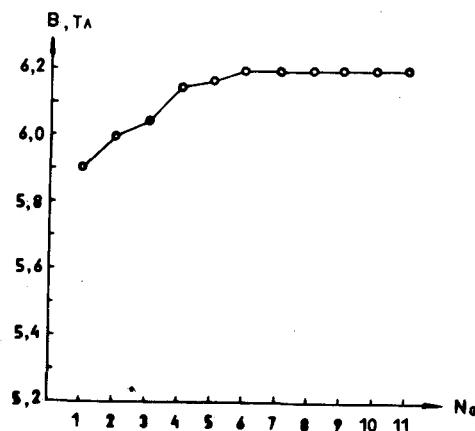


Рис. 6. Кривая тренировки полномасштабной модели СП-диполя

На рис.7 приведена зависимость максимальной величины поля в апертуре от скорости ввода тока в магнит. Она удовлетворяет всем требованиям в рабочем цикле и при аварийном выводе энергии. Нагрузка перехода ($\int i^2 dt$) при искусственном переводе диполей в нормальное состояние с помощью нагревателей не превышала $8 \cdot 10^6$ А² с, а соответствующая максимальная температура обмотки не превышала 160 К, что меньше допустимого значения.

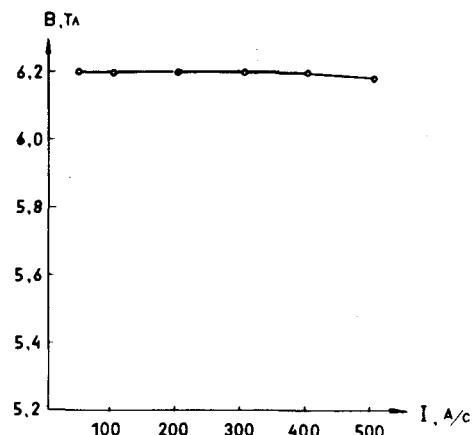


Рис. 7. Зависимость максимального поля в центре СП-диполя от скорости ввода тока

Динамические тепловые потери в диполе в рабочих циклах УНК составили 1,2 Вт/м. Измеренная величина статических теплопритоков в режиме охлаждения однофазным гелием составила $2,5 \pm 0,8$ Вт/м.

В настоящее время проводятся испытания цепочки последовательно соединенных диполей с теплым магнитным экраном. Их целью является изучение процессов теплообмена и гидрав-

лики в магнитах, процессов эвакуации энергии и гелия при аварийном переходе в нормальное состояние, моделирование возможных схем захолаживания и отогрева и т.п.

Конструкция диполя с теплым магнитным экраном обладает определенными недостатками. К ним следует отнести большую величину статических теплопритоков и сложность конструкции криостата. Этих недостатков можно избежать в конструкции диполя с холодным магнитным экраном. Чтобы сделать обоснованный выбор конструкции диполя для серийного производства, в ИФВЭ параллельно велась разработка такого диполя. На рис.8 показано его поперечное сечение. По-прежнему за основу взята двухслойная обмотка оболочечного типа. Для снижения расхода сверхпроводника уменьшены диаметры обмотки и магнитного экрана. С учетом предполагаемого повышения критической плотности СП проводов до $2,3 \cdot 10^5$ А/см² это позволяет уменьшить потребное количество СП материала приблизительно на 30%. Одновременно предполагается существенно уменьшить динамические потери и статические теплопритоки, что снижает нагрузку на криогенную систему. Упрощается также проблема эвакуации энергии при переходе магнитов в нормальное состояние. Недостатком магнита с холодным магнитным экраном является неизбежное увеличение времени его захолаживания и отогрева. Подробное изучение показало, что при выбранной криогенной системе УНК время отогрева цепочки магнитов составит ~40 часов, а время захолаживания ~50 часов, что с точки зрения ремонтного цикла является приемлемым.

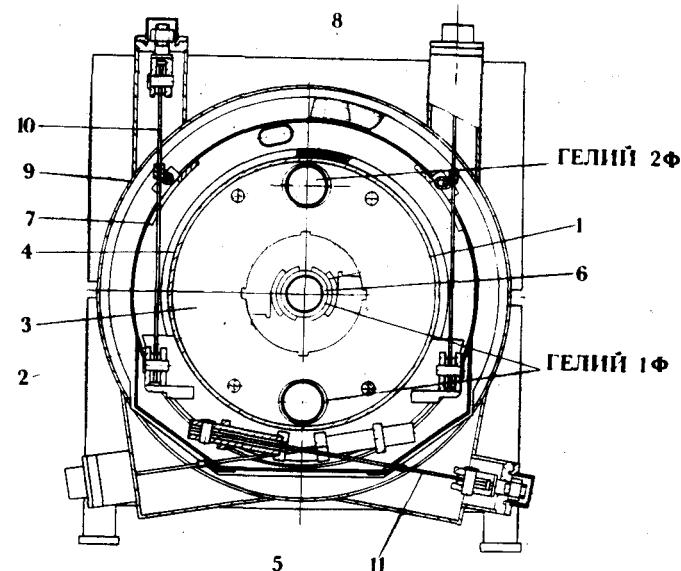


Рис. 8. Поперечное сечение диполя с холодным магнитным экраном

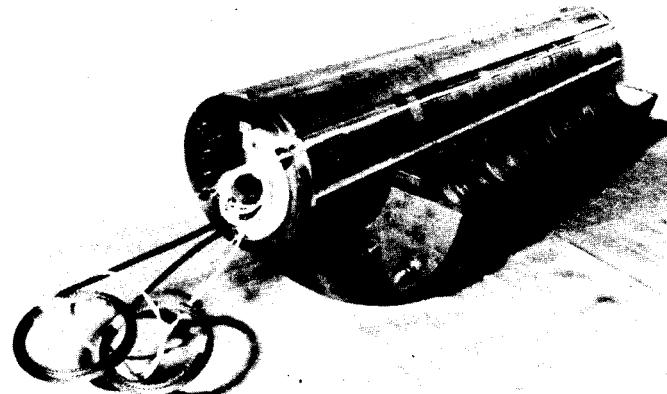


Рис. 9. Короткая модель СП-диполя с холодным магнитным экраном

На рис. 9 показана фотография короткой модели такого ди-
поля. Результаты его испытаний в погружном режиме охлажде-
ния даны на рис. 10; кривая тренировки (а) и скоростная зави-
симость (б). Величина динамических потерь в обмотке соста-
вила 0,6 Вт/м. Исследования продолжаются. Окончательный вы-
бор конструкции диоплей УНК для серийного изготовления
предполагается сделать в 1987 году.

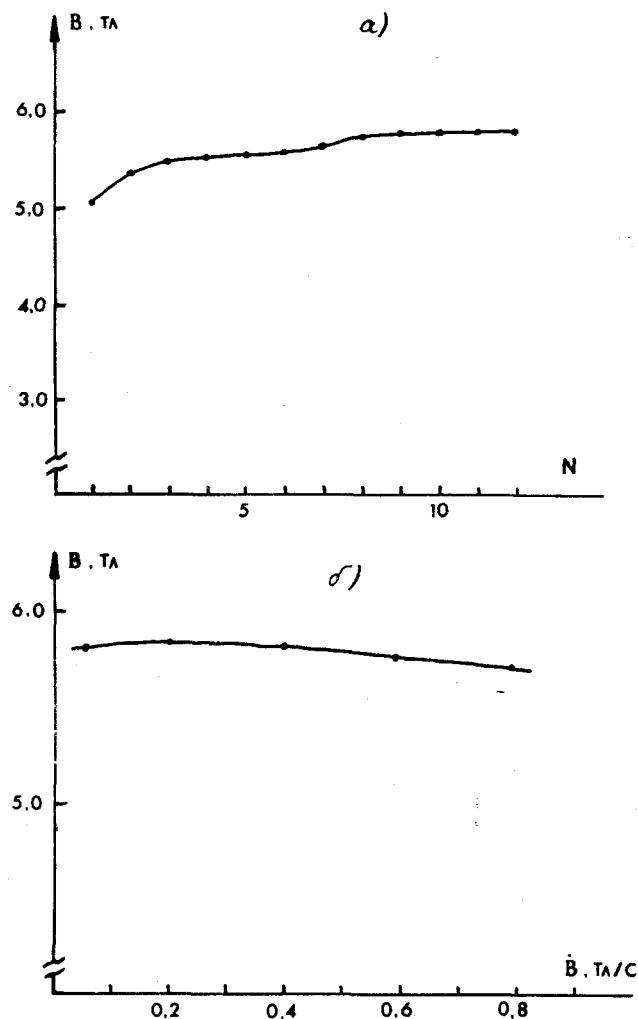


Рис. 10. Кривая тренировки (а) и скоростная зависимость (в) короткой модели СП-диполя с холодным магнитным экраном

4. Сооружение комплекса

На всей территории комплекса развернуты строительные работы. Организовано 11 строительных площадок для производства подземных работ. Из 26 вертикальных шахт комплекса полностью готовы 7, завершается сооружение еще трех. Начато сооружение подземных тоннелей. В настоящее время проходка ведется из 4 точек в 7 направлениях. Пройдено около 200 м тоннеля канала инъекции из общей длины 2,6 км и 1,5 км кольцевого тоннеля. На рис.11 показана схема подземных сооружений УНК и состояние строительных работ.

Для проведения крупномасштабных испытаний важнейшего оборудования комплекса в рабочих условиях, отработки технологий монтажа и режимов вывода пучка из У-70 в направлении УНК принято решение еще до полного окончания строительных работ соорудить и смонтировать 4 характерных участка ускорителя: канал инъекции, технологический промежуток колышца, предназначенный для размещения ускоряющей системы и систем ввода и аварийного вывода пучка, участок регулярной структуры 1 ступени ускорителя, включающий цепочку из 100 "теплых" магнитов ($1/24$ часть колышца), и участок сверхпроводящего кольца из 100 магнитов.

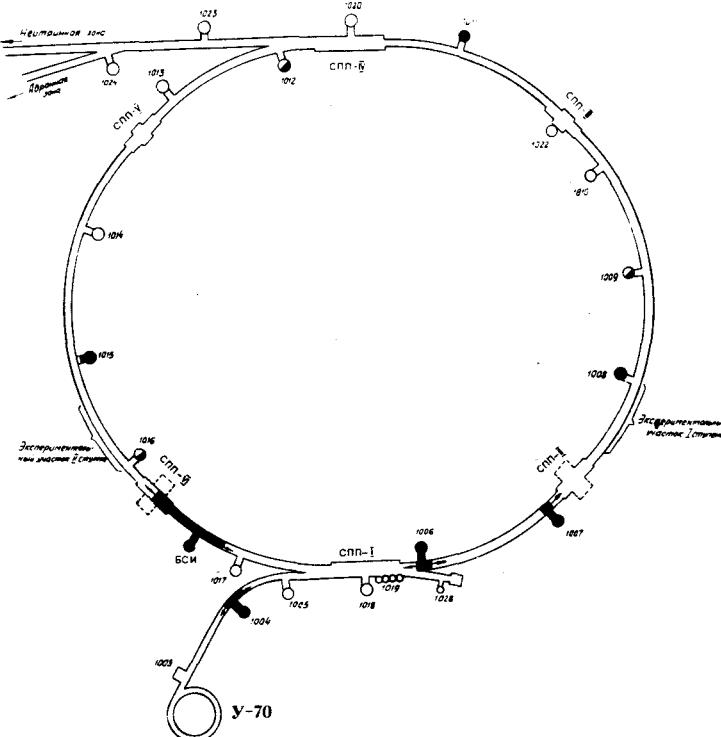


Рис. 11. Схема подземных сооружений УНК и состояние работ. Затемнены выполненные участки тоннеля УНК

В настоящее время ведется проектирование семи наземных технологических зданий, обслуживающих первоочередные участки, а с 1987 г. будет начато их сооружение.

Заканчивается моделирование массового оборудования 1 ступени, определены его изготовители и начата технологическая подготовка производства. Заказы на изготовление вакуумной системы, источников питания кольцевого электромагнита и магнитов канала инъекции, кольцевого электромагнита 1 ступени, корректирующих магнитов кольца и линз канала инъекции размещены в промышленности. В 1987 г. намечено провести испытания головных образцов оборудования, а с 1988 г. приступить к серийному производству.

Для массовых испытаний оборудования УНК сооружается стендовый корпус площадью около 20 тыс.м² и проектируются соответствующие стенды. Первую очередь стендового корпуса намечено ввести в конце 1987 г. Строительные и монтажные работы по УНК планируется завершить в 1992 г.

Литература

1. Balbekov V.I. et al. Proceed of 12th Int. Conf. on High Energy Accel. -Batavia, 1983, p.40.
 2. Балбеков В.И. и др. Труды 8-го Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т.1, с.187.-Дубна,1983.
 3. Балбеков В.И. и др. Труды 9-го Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т.II, с.371.-Дубна,1985.
 4. Дрождин А.И. и др. Там же,т.И, с.368.
 5. Байшев И.С. и др. Труды 8-го Всесоюзного совещения по ускорителям заряженных частиц, т.1, с.268.-Дубна, 1985.
 6. Байшев И.С. и др.-Там же, т. 1, с.262.
 7. Агеев А.И. и др. Препринт ИФВЭ 86-58.-Серпухов, 1986.
 8. Всеволожская Т.А. и др. Труды 7-го Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т.1, с.229.-Дубна, 1981.
 9. Andreyev N.I. et al. Proc. of 12-th Int. Conf. on High Energy Accel.-Batavia, 1983, p.554.
 10. Агеев А.И. и др. Труды 9-го Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т.П, с.335.-Дубна 1985.
 11. Агеев А.И. и др. Разработка сверхпроводящих диполей УНК . доклад на данной конференции.

Discussion

H.Kaiser. To what characteristics of your SC dipole magnet do you attribute the observed slight training?

К.П.Мызников. Мы имеем очень короткую тренировку. За 3-4 перехода мы выходим на поле 6.2 Т. Считаем, что это нормально, поскольку это существенно выше, чем необходимое поле при инжекции. Причины такой быстрой тренировки я назвать затрудняюсь, но нам удалось существенно сократить ее процесс после того, как мы улучшили конструкцию концевых частей магнита.

Г.А.Нагорский. Учитывается ли при проектировании дрейф геометрии туннеля и подвески магнитов из-за температурной нестабильности в зависимости от времени года и погодных условий? Каков допуск на эту нестабильность?

К.П.Мызников. Безусловно учитывается.