

Дмищенко Н. Г. и др.

+

С 345с
1895/87

Б1-8-87-2



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Б1-8-87-2

ДЕПОНИРОВАННАЯ ПУБЛИКАЦИЯ

Дубна 19 87

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Лаборатория высоких энергий

Б1-8-87-2

Н.Г.Анищенко, И.Е.Карпунина, А.А.Смирнов, Ю.А.Шипов

ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ КОНСТРУКЦИИ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ
МАГНИТОВ ДЛЯ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

04. 01. 87.

Дубна, 1986

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
СИНХОТРОНА

А Н Н О Т А Ц И Я

Приведены примеры успешного применения сверхпроводящих магнитов (СПМ) в основных устройствах физики высоких энергий, а также параметры некоторых проектируемых устройств.

Обсуждены особенности работы адиабатических обмоток СПМ с высокой плотностью тока, в частности — повышенная чувствительность к внутренним тепловыделениям. Изложены основные требования к электроизоляционным конструкциям (ЭИК) обмоток СПМ.

Приведены данные по выполнению витковой и корпусной изоляции обмоток СПМ, пропитывающим их составам, а также свойствам электроизоляционных материалов (ЭИМ), применяемых в ЭИК СПМ. В частности, показан характер изменения механических свойств под действием радиационного облучения, даны значения электрической прочности некоторых ЭИМ. Предложена методика выбора ЭИМ для СПМ, определяющая рациональный порядок испытаний их свойств. Дано краткое описание высоковольтной установки ОИЯИ "Искрыз" для измерений электрической прочности и интенсивности частичных разрядов в ЭИМ и ЭИК.

I. ВВЕДЕНИЕ. СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ МАГНИТЫ В ФИЗИКЕ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

В основных устройствах, применяемых в физике высоких энергий, - источниках и каналах частиц, ускорителях, детекторах и спектрометрах - успешно используются сверхпроводящие магниты (СПМ), в том числе магниты с косвенным криостатированием и высокой конструктивной плотностью тока ($\geq 10^8$ А/м² при ≥ 5 Тл).

В течение ряда лет в составе инжекционного комплекса синхрофазотрона Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ, Дубна) эксплуатируются источник многозарядных ионов "Крион"/1/ и источник поляризованных дейтронов "Полярис"/2/. Оба источника содержат СПМ.

В США, в Национальной лаборатории им. Э.Ферми (FNAL), введен в постоянную эксплуатацию сверхпроводящий (СП) ускоритель протонов Теватрон (*Doublet/Saker*)/3,4,5/, табл. I. В конце 1985 г. на этом ускорителе достигнута энергия 1600 ГэВ при взаимодействии встречных протонного и антипротонного пучков. Другой пример действующего (с. 1979 г.) ускорителя - СП циклотрон (Университет штата Мичиган, США) для исследований с тяжелыми ионами/5, с. 77; 6/. Крупный СПМ постоянного тока для этого циклотрона, выполненный в Аргоннской национальной лаборатории США, имеет основные параметры: внутренний диаметр обмотки - 1,5 м; высота - 1,3 м; $B = 6$ Тл; $J = 3,5 \cdot 10^7$ А/м²; $W_{\text{зап.}} = 17$ МДж.

В ОИЯИ начато сооружение СП синхротрона релятивистских ядер Нуклотрона/7/ с магнитами с железным ярмом и обмоткой из трубчатого СП кабеля с охлаждением потоком двухфазного

Таблица I. Основные параметры сверхпроводящих ускорителей.

Название проекта, ускорительного Параметры. центра, страны.	TEVATRON FNL, США /3, 4, 5/ /5, 10, 11/ УНК ИФЭ, СССР /5, 10, 11/ Нуклотрон ОИЯИ, Дубна /7, 8/ СПИИ ОИЯИ, Дубна /9/ СП кольцо коллай- дера HERA DESY, ФРГ /12/ Суперколлайдер SSC США /13/ СП коллай- дер Изабелла BNL, США /5/						
максим. энергия частиц, ГэВ	1000	3000	7 ТэВ/нукл.	1,5	820	20000	800
интенсивность пучка, $\frac{\text{протон}}{\text{имп.}}$	$5 \cdot 10^{13}$	$6 \cdot 10^{14}$	$3 \cdot 10^{12}$ (дейт.) $1 \cdot 10^9$ (уран-82)	$1,5 \cdot 10^{11}$			
Средний диаметр уско- рительного кольца, км	2	~ 6	$\sim 0,08$	0,054 (периметр)	2	28,6	1,2
размер внутренней камеры, см	7, 1x7, 1	6x7	9, 0x4, 2 (энергетра диполя)	$\emptyset 5$			$\emptyset 8$
наружные размеры магнитов, см	25, 4x38		25, 6x16, 6 (железное ядро)	15x14 (железное ядро)			$\emptyset 47$
Общее число диполей, шт.	774	2160	96	48	422		744
общее число квадруполей, шт.	240	402	64	58	224		372

Таблица I. Продолжение.

Название проекта, ускорительного центра, страны	TEVATRON FNAL, США	УНК ИФЭ, СССР	Куклотрон ОИЯИ, Дубна	СПИН ОИЯИ, Дубна	СП кольцо коллайдера HERA DESY/PT /12/	Суперколлайдер SSC США /13/	СП коллайдер Изабелла BNL, США /5/
Параметр	/3,4,5/	/5,10,11/	/7,8/	/9/			
длина диполя, м	6,7	5,8	1,51	0,42	6,0	16,6	4,75
длина квадруполя, м	1,5	4,0	0,4	0,15	2,0		1,5
макс. индукция поля диполя, Тл	4,2	5,0	2,1	2,3	4,65	6,0 - 6,4	5,0
макс. градиент поля в квадруполе, Тл/м	100	74	35	87,5	90		67
рабочий ток магнитов, кА	5,2		6,3 (макс.)	2,07	5,67 (дип.)		4,25
запасенная энергия на один магнит при макс. поле, кДж	500		12(дип.) 6(квадр.)	3,3 (дип.) 0,87(квадр.)			820
конструктивная плотность тока, А/м ²			1,2·10 ⁸	5·10 ⁸			

*) Проект заморожен

гелия^{/8/}, рис. 1, табл. 1. В ОИЯИ также создан и находится в стадии доводки СП синхротрон на 1,5 ГэВ - СПИН^{/9/}, рис. 2, табл. 1. В 1986 г. успешно проведены комплексные криогенные испытания криостатной системы СПИНа совместно с рефрижератором КГУ-1600/4,5 и испытания его магнитной системы: инжектированный пучок протонов проведен через всю цепочку сверхпроводящих диполей и квадруполей.

Дальнейшее развитие ускорительной техники во всех ведущих научных центрах мира связано с созданием СП коллайдеров-ускорителей на сверхвысокие энергии со встречными пучками. В ИФВЭ (Протвино, СССР) начаты работы по проекту УНК - ускорительно-накопительного комплекса на 3 ТэВ^{/5, с.89; 10/}, табл. 1. В настоящее время широким фронтом ведутся работы по моделированию СП диполей и квадруполей УНК: на коротких (длиной 0,75 м) моделях исследованы особенности тренировки, механической стабильности, динамических потерь и качества магнитного поля, процессов при переходе магнитов в нормальное состояние. Продолжается моделирование полномасштабных 6-метровых импульсных СП диполей УНК^{/II/}.

В ФРГ (DESY, Карлсруэ) создается электрон-протонный коллайдер со СП накопительным кольцом на 820 ГэВ^{/12/}, табл. 1. В США начаты работы по проекту SSC - гигантского суперколлайдера на 20 ТэВ. Длина накопительного кольца этого ускорителя с СПМ на 6 Тл составит ~ 90 км^{/13/}, табл. 1. На 1986 г. намечены испытания полномасштабного (16,6 м) дипольного магнита SSC.

СПМ используются и для транспортировки пучков ускоренных заряженных частиц. Например, более 10 лет в лаборатории SIN (Швейцария) работает первый мюонный канал длиной 8 м из 16 СПМ постоянного тока с косвенным криостатированием (внутрен-

ний диаметр соленоидов 115 мм; $J_{\text{раб}} = 1 \text{ кА}$; $B_0 = 5 \text{ Тл}$)^{15, с. 99; 14/}. За это время накоплен значительный опыт работы с СПМ в условиях длительной эксплуатации без отепления. Отметим, что за весь этот период эксплуатации по разным причинам произошло более 110 переходов СПМ в нормальное состояние. И не было из них ни одного перехода из-за неполадок с электроизоляционной конструкцией (ЭИК) магнитной системы, несмотря на то, что нейтронное облучение первого по ходу пучка СПМ составило $\sim 3 \cdot 10^6 \text{ Гр.}$ *)

СПМ постоянного тока будут использованы в составе крупных детекторов (спектрометров) частиц, устанавливаемых на ускорителях со встречными пучками^{15/}. Одно из основных требований к таким детекторным магнитам - малая радиационная толщина в радиальном направлении (с учетом стенок кристата). СПМ первого поколения (1975-31 г.г.) для таких детекторов выполнены "тонкостенными": магнит по проекту JSR в CERN (Швейцария); магнит для камеры TRC, созданный в Лоуренсовской лаборатории США для эксперимента PER (Станфорд, США); CLEO - детекторный магнит для электронного накопительного кольца в Корнельском университете США; магнит CELLO, установленный на накопительном кольце PETRA в DESY, ФРГ, табл.2. Из разрабатываемых СПМ для детекторов второго поколения отметим CDF соленоид для коллайдера в Лаборатории им. Э.Ферми, США;

*) 1 Грей = 1 Дж/кг = 100 рад; для полимеров доза радиационного поглощения 10^9 рад соответствует интегральной дозе облучения (флюенсу) нейтронов 10^{18} н/см^2 .

Таблица 2. Основные параметры сверхпроводящих магнитов для детекторов частиц /5, 15, 17/

Название проекта, ускорительного центра, страны, год пуска	CERN Швейцария	FER (TRC) SLAC США	PETRA (CELLO) DESY ФРГ	CDF Fermilab США	TRISTAN (ТОРАЗ)		LEP (DELPHI) CERN Швейцария	LEP (ALEPH) CERN Швейцария
					КЕК Япония	TRISTAN (VENUS) КЕК Япония		
Фирма-изготовитель	1976	1980	1979					
	2	3	4	5	6	7	8	9
Изготовитель магнита		ЛВ/США		Nitachi Япония	Furukawa Япония	Mitsubishi Япония	RAL Англия	Saclay Франция
внутренний (наружный) диаметр, м	1,38	2,2	1,5	2,86(3,35)	2,72(3,22)	3,4(3,82*) *центр. часть	5,2(6,2)	4,96(5,84)
длина магнита, м	1,8	3,4	3,42	4,8	5,0	5,27	6,8	6,36
поперечное сечение проводника, мм ²	6x9	3,6x0,9	1,6x2,2 9x2,2	20x3,9	18x3,6	10x6,6	24x4,5	35x3,6
материалы матрицы проводника,	медь, алюмин.	медь	медь, алюмин. припой	медь, алюмин.	медь, алюмин.	медь, алюмин.	медь, алюмин.	медь, алюмин.
вес проводника обмотки, т				3	2,5	1,8	7	8
рабочий ток, кА	2,17	2,27	3,3	5	3,65	4,1	5	5

Таблица 2. Основные параметры сверхпроводящих магнитов для детекторов частиц /5, 15, 17/

Название проекта, ускорительного центра, страны, год пуска	FIR CERN Швейцария	FER (TRC) SLAC США	PETRA (CELLO) DESY ФРГ	TRISTAN (TORAZ) КЕК Япония		TRISTAN (VENUS) КЕК Япония	LEP (DELPHI) CERN Швейцария	LEP (ALEPH) CERN Швейцария
				CDF Fermilab США	Hitchi Япония			
Фирма-изготовитель	1976	1980	1979					
Параметр	2	3	4	5	6	7	8	9
ИЗГОТОВИТЕЛЬ МАГНИТА		ЦВЦША		Hitchi Япония	Furukawa Япония	Mitsubishi Япония	RAL АНГЛИЯ	Saclay Франция
внутренний (наружный) диаметр, м	1,38	2,2	1,5	2,86(3,35)	2,72(3,22)	3,4(3,82)*	5,2(6,2)	4,96(5,84)
длина магнита, м	1,8	3,4	3,42	4,8	5,0	5,27	6,8	6,36
поперечное сечение проводника, мм ²	6x9	3,6x0,9	1,6x2,2 9x2,2	20x3,9	18x3,6	10x6,6	24x4,5	35x3,6
материалы матрицы проводника,	медь, алюмин.	медь	медь, алюмин. припой	медь, алюмин.	медь, алюмин.	медь, алюмин.	медь, алюмин.	медь, алюмин.
вес проводника обмотки, т				3	2,5	1,8	7	8
рабочий ток, кА	2,17	2,27	3,3	5	3,65	4,1	5	5

Таблица 2. Продолжение.

I	2	3	4	5	6	7	8	9
плотность тока в проводнике, A/m^2	$4,1 \cdot 10^7$	$7 \cdot 10^8$	$1,4 \cdot 10^8$	$6,4 \cdot 10^7$	$5,6 \cdot 10^7$	$6,2 \cdot 10^7$	$4,6 \cdot 10^7$	$4,0 \cdot 10^7$
индукция поля (в центре), Тл	1,5	1,35	1,3	1,5	1,2	0,75	1,2	1,5
запасенная энергия МДж	3	10,9	7	30	19	12	109	130
общий вес, т				11	10		87	60
радиационная толщина магнита, отн. ед.	1,1	0,68	0,5	0,85	0,7	0,52	4	1,6

первое поколение (1975-81гг.)
"Тонкостенных" СП магнитов

разрабатываются для коллайдеров в настоящее время

соленоиды TORAZ и VENUS для ускорительного комплекса TRISTAN в КЕК, Япония; соленоиды DELPHI и ALEPH для эксперимента LEP в CERN, табл. 2.

В ОИЯИ (Дубна) реализуется проект магнитного спектрометра "Сфера" с координатными детекторами в близкой к 4π геометрии^{/16/}. В состав спектрометра входит СПМ на 4,5 Тл (рис. 3). Плотность тока в проводнике его обмотки $\sim 1,4 \cdot 10^8 \text{ А/м}^2$; $I_{\text{раб}} = 1 \text{ кА}$; запасенная энергия $W_{\text{зап}} \approx 5,2 \text{ МДж}$. СПМ проектируется для работы с косвенным криостатированием в режиме "замороженного" тока.

II. ОСОБЕННОСТИ СПМ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В УСТРОЙСТВАХ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ; ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ЭИК ИХ ОБМОТОК

Требования к выполнению ЭИК СПМ вытекают из особенностей конструкции их обмоток и условий эксплуатации, в том числе - в аварийных ситуациях. Как правило, современные СПМ для физики высоких энергий выполняются с большой плотностью тока в обмотках ($1-5 \cdot 10^8 \text{ А/м}^2$). Такие обмотки на постоянном токе часто предназначены для работы в условиях, близких к адиабатическим, и они обладают повышенной чувствительностью к внутренним тепловыделениям. Причины такой повышенной чувствительности обмоток СПМ к внутренним тепловыделениям $Y. Iwasa$ с сотрудниками^{/18/} связывают в основном с очень низкой (порядка $1 \cdot 10^{-3} \text{ Дж/см}^3 \cdot \text{К}$) теплоемкостью пропитывающих и других диэлектрических материалов ЭИК СПМ при 4,2 К, а также с тем, что разница между рабочей температурой обмотки и температурой перехода в нормальное состояние при высокой, близкой к критической, плотности тока очень мала, порядка 0,1 К.

Источниками внутренних тепловыделений в обмотках СПМ могут быть, например, деформации и растрескивания органических материалов ЭИК, происходящие как в процессе глубоких охлаждений, так и под действием электромагнитных усилий при работе СПМ. По этим же причинам могут происходить смещения проводника обмотки относительно элементов ЭИК или соседних витков. Даже самое малое такое перемещение (десятки микрон) может вызвать тепловыделение, приводящее к местному переходу сверхпроводника в нормальное состояние. Так, например, в [19] показано, что перемещение всего на 10 мкм пропитанной эпоксидом маленькой обмотки СПМ (диаметр - 60/123 мм; высота 36,9 мм; индуктивность 4,4 мГн) относительно стеклотекстолитовой корпусной изоляции вызывает преждевременный переход сверхпроводника в нормальное состояние за счет тепла от трения уже при 0,75 от тока перехода. При этом тепловыделение составляет всего ~70 мДж. Значительно улучшало ситуацию в данном случае помещенные между трущимися поверхностями материала с низким коэффициентом трения, например, полиимидной пленки.

Растрескивание в слоях эпоксидного компаунда, пропитывающего обмотки СПМ, вызывает тепловыделения до $6 + 7 \cdot 10^4$ Дж/м³. Поэтому важно уменьшать толщину слоев компаунда и армировать их, например, стеклотканью: это снижает вероятность растрескивания и, соответственно, тепловыделений в обмотке.

Механические силы, действующие на элементы ЭИК при изготовлении и эксплуатации СПМ, обусловлены, во-первых, силами от натяга сверхпроводника при намотке магнитов; во-вторых, термомеханическими силами, появляющимися в магните при охлаждении из-за разницы интегральных температурных сокращений линейных размеров диэлектрических и металлических элементов кон-

струкции обмотки^{*)}; в-третьих, - электромагнитными силами при протекании тока в обмотках.

Натяг сверхпроводника, например, в виде металлургической шинки, составляет $3 \div 4 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2$. Так, шинка $(2 \times 3,5) \text{ мм}^2$ при намотке СПМ "Сфера"/16/ должна натягиваться с усилием $\sim 250 \text{ Н}$.

Термомеханические силы при охлаждении обмоток вызывают сложнапряженное состояние элементов ЭМК.

Электромагнитные силы в соленоидах, в основном, растягивают витки по радиусу обмотки и сжимают их по её оси. Вызываемые ими в изоляции механические напряжения растяжения направлены тангенциально по отношению к виткам обмотки, а напряжения сжатия - вдоль её оси. Для упрощенной оценки электромагнитные усилия в обмотке обычно представляют эквивалентным магнитным давлением, действующим на неё ^{изнутри} как гидравлическое давление ^{действует} на стенки сосуда), и равным (в [атм]) $\sim B^2 \cdot 10^{-5} / 2 \mu_0$, где B - индукция в [Тл], $\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м}$. Например, при $B = 6 \text{ Тл}$ это давление составляет $\sim 140 \text{ атм}$. В СП диполях и квадрупольях картина распределения электромагнитных сил иная, чем в СП соленоидах. Так, для СП квадрупольей постоянного тока (длина 1,5 м; $I_{\text{ном}} = 1,5 \text{ кА}$; $B = 5,1 \text{ Тл}$), созданных в ЦЕРНе для экспериментов с накопительными кольцами (проект JSR), характерны азимутальные сжатия до 200 т на метр длины каждой половины магнита^{/38/}.

В целом распределение механических напряжений в элементах ЭМК СПМ представляет достаточно сложную картину.

*) Термическая интегральная усадка при охлаждении от 300 К до 4,2 К у неармированных диэлектриков в среднем в 3-4 раза больше, чем у меди.

Ответственным моментом при рассмотрении картины механических усилий, например, в адиабатических обмотках СПМ является оценка и последующая её экспериментальная проверка надежности сохранения хорошей адгезии изоляции и пропитывающих обмотку составов к проводнику, охлаждаемому каркасу или теплообменникам. Так, в экспериментах на модельных СПМ по программе VENUS /15/ была измерена адгезия полиимидной пленки к элементам конструкции из алюминия после цикла охлаждения всей модели от 300 К до 20 К. Прочность при растяжении образцов, вырезанных из обмотки, в направлении, перпендикулярном границе раздела полиимид-алюминий, составила ~ 39 МПа. Прочность на сдвиг вдоль этой границы была ~ 20 МПа /21/. Для обеспечения хорошей теплопроводности всей обмотки, что важно для надежной работы адиабатических СПМ необходимо исключить отслоения и растрескивания полимерных материалов, входящих в ЭИК.

В целом требования к ЭИК СПМ с точки зрения механических свойств сводятся к определенной величине предела прочности материалов элементов витковой, межслоевой и корпусной изоляции, который в 2-3 раза должен превышать возникающие в изоляции механические напряжения. Например, при выборе ЭИК СПМ для термоядерной установки, разрабатываемой в Японии по проекту LST, одним из основных требований является надежная работа витковой, межслоевой и корпусной изоляции при сжимающих усилиях до 400 МПа при 4 К /22/. В другом примере с СПМ на 7 Т Стэнфордского центра линейных ускорителей (SLAC), США (система Гельмгольца с каналом диаметром 30 см) показано, что при расчетных радиальных напряжениях сжатия в проводнике

17,5 МН/м² и аксиальных - 30 МН/м² - напряжения сжатия (в целом) изоляции (плетеный полиамид или нейлон) составят 650 МН/м² /24/.

Механические свойства некоторых электроизоляционных и конструкционных материалов, используемых в СПМ, приведены в Таблице 3 /23+29/.

Из воздействий на электрическую изоляцию обмоток СПМ в аварийных ситуациях отметим два - повышение температуры части обмотки, перешедшей в нормальное состояние, и электрическое напряжение, появляющееся на основных токовводах, диагностических потенциальных выводах и в самой обмотке во время её переходов в нормальное состояние и в процессе эвакуации энергии. Обычно обмотку и схему защиты проектируют так, чтобы температура самой "горячей" точки, первой перешедшей в нормальное состояние не превышала 100 + 200 К, а напряжение на основных токовводах при выводе энергии было не более 1 кВ (в некоторых случаях до 3 кВ).

Для крупных обмоток СПМ постоянного тока, используемых в физике высоких энергий, характерны уникальность конструкции и технологии изготовления, необходимость замоналичивания обмоток (адиабатических), а в ряде случаев - применения косвенного криостатирования и режима "замороженного" тока, эксплуатация с длительными перерывами и отеплением обмоток между сеансами работы ускорителей.

Отметим некоторые другие особенности обмоток СПМ. Для импульсных СПМ ускорителей требуется высокая прецизионность и идентичность выполнения нескольких сотен обмоток. Воздей-

Таблица 3. Механические свойства некоторых электроизоляционных и конструкционных материалов, используемых в обмотках сверхпроводящих магнитов.

Материал	Температура К	Предел прочности при растяжении, МПа	Предел прочности при сжатии, МПа	Модуль упругости при растяжении, ГПа	Примечания, литература
Фторопласт ПТФЭ	290	180	50	17	/23, с. 287/
	20	560	230	24,5	
эпоксидная смола	290	360	400	25	/23, с. 287/
	20	750	820	32	
кремнийорганичес- кая смола	290	200	150	17	/23, с. 287/
	20	480	280	20,5	
стеклоукрепитель РАМА на основе эпокси- дной смолы	300	300	300	-	/24, с. 503/
	77,3	645	770	-	
	4,2	715	750	-	
КОМПОЗИТ НА ОСНОВЕ СМОЛЫ Су221/ну979 СО СТЕКЛОВОЛОКНОМ (Е - стекло)	4,2	1500	800	45	/25/
ТО же - С УГОЛЬНЫМ ВОЛОКНОМ (Г-300)	4,2	2000	1000	140	/25/
эпоксидная смола бисфенольная-А Су221/ну979	4,2	180	-	8	/25/

Таблица 3. Продолжение.

Материал	Температура		Предел прочности при растяжении, МПа	Предел прочности при сжатии, МПа	Модуль упругости при растяжении, ГПа	Примечания литературы
	К	°С				
стеклопластик G-10CR на основе бисфенольной-А смолы	295		415/257*	375/283	28/22,4	* числитель - вдоль основы; знаменатель - по углу./28/
	76		825/459	834/557	33,7/27	
	4		862/496	862/598	35,9/29,1	
припой ПОС-40	293		56	39	-	/26, с. 237; 27, с. 379/
	77		134	100	-	
медь М3(99,5%)	29		225	-	112	/27, с. 379; 26, с. 234/
	77		372	-	-	
	20		450	-	-	
медь бескислородная	297		330	128	-	/29, с. 669/
	77		375	139	-	
	20		405	150	-	
	4		400	-	-	
Алюминий А1-1(99,5%) лист отожженный	293		78	-	71	/27, с. 377/
	90		159	-	-	
Алюминий 99,99%)	293		83	-	-	/24, с. 160/
	4,2		284	-	-	
нержавеющая сталь	297		400	-	190	/29, с. 669/
	77		450	-	205	
	20		520	-	210	
	4		550	-	200	

ствия электромагнитных сил на элементы ЭИК СПМ ускорителей носят циклический характер, соответственно и внутренние тепловыделения из-за энергетических потерь в обмотках происходят периодически. Поэтому ЭИК импульсных СПМ должна предусматривать наличие внутри обмотки каналов для прохода жидкого гелия, т.е. обмотки должны выполняться "пористыми". При этом высокая стабильность конструктивных параметров обмоток импульсных СПМ должна сохраняться в течение нескольких десятков лет.

Радиационное воздействие на элементы ЭИК СПМ в процессе ускорения и вывода пучков из камеры ускорителя может достигать опасных величин. Так, радиационные нагрузки на органические материалы основных узлов существующих "теплых" ускорителей протонов, приведенные к 1 году работы, уже в настоящее время достигают 10^6 Гр/30/. Для СП ускорителей соответствующие радиационные нагрузки окажутся более высокими. Так, расчетная интегральная доза поглощения (за 10 лет эксплуатации) для электроизоляционных материалов, расположенных вблизи вакуумной камеры проектируемого в CERN (проект LEP) Большого электрон-позитронного накопительного кольца составляет 10^8 Гр/31/.

Вытекающие из перечисленных выше особенностей СПМ требования к выполнению ЭИК их обмоток в общем виде можно сформулировать, как достаточные механическая и электрическая прочность, эластичность, радиационная стойкость, теплопроводность и температуропроводность (два последних - особенно для СПМ с косвенным криостатированием, когда необходима также и хорошая адгезия к проводнику обмотки и элементам её конструк-

ции), технологичность изготовления, минимально возможные тепловыделения, связанные с трением и растрескиванием материалов ЭИК при воздействии механических усилий и низких температур.

III. ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ КОНСТРУКЦИИ ОБМОТОК СПМ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ФИЗИКЕ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

Некоторые данные по выполнению витковой и корпусной изоляции, а также пропитывающим обмотки СПМ составам приведены в таблицах 4 и 5.

ЭИК СП диполей и квадруполей синхротрона СПИН (ОИЯИ, Дубна) состоит из стеклотекстолитовой^{*} корпусной изоляции и комбинированной витковой: 2 слоя (по 20 мкм толщиной) лавсана, намотанных вполнакresta на плоский кабель (3,8x0,92)мм², сверху обмотаны стеклолентой типа АСТТ (δ) или Э-1 шириной 6 мм, толщиной 100 мкм из алюмоборосиликатного стекла. Шаг намотки стеклоленты 10 мм, так что между витками остаются зазоры по 4 мм для прохода охлаждающего гелия. Стеклолента пропитана эпоксидным компаундом. При подборе пропитывающего состава учитывались следующие технологические особенности и требования: 1) стеклолента после пропитки должна содержать связующего не более 20% по весу; 2) связующее должно обладать достаточной тиксотропностью, предупреждающей заполнение эпоксидом промежутков для охлаждающего гелия при обхати обмотки во время полимеризации; 3) вязкость пропитывающего состава должна быть низкой, обеспечивающей равномерную про-

*) Используется листовой эпоксифенольный стеклотекстолит типа СТЭФ-1.

Таблица 4. Электроизоляционные материалы, используемые в некоторых СП магнитах для физики высоких энергий

Название магнита (ссылка)	Сечение СП кабеля	Витковая изоляция СП кабеля; Межслоевая изоляция	Катушечная изоляция; Корпусная изоляция
Модели диполей УНК (6 м длины), ИФЗ, СССР /11/	Плетенка из 23 проводов $\varnothing 0,85$ мм; 10,55x1,682 (1,34) мм	<u>ВИТКОВАЯ:</u> 2 слоя ленты ПЭТФ (20 мкм) + лента (100 мкм) из пропитанного эпоксидом стекловолокна	
Модельный диполь Нуклотрона (1,5 м длины), ОИЯИ, Дубна /8/	Трубка медная $\varnothing 5 \times 0,5$ мм + 31 провод $\varnothing 0,5$ мм (внеш. диам. кабеля $\varnothing 7$ мм)	<u>ВИТКОВАЯ:</u> 4 слоя ПЭТФ (20 мкм) + 2 слоя стеклотенты, пропитанной эпоксидным компаундом (80 мкм)	<u>КОРПУСНАЯ:</u> Листовой стеклотекстолит (0,5 мм); на лобовых частях обмотки - фигурные блоки из стеклотекстолита
Диполи СИИИ (0,42 м длины) ОИЯИ, Дубна /9/	Плетенка из 15 проводов $\varnothing 0,5$ мм; (3,8x0,92) мм ²	<u>ВИТКОВАЯ:</u> 2 слоя ПЭТФ (20 мкм) + стеклотента, пропитанная эпоксидом (100 мкм)	<u>КОРПУСНАЯ:</u> Листовой стеклотекстолит (0,5 мм); на лобовых частях обмотки - фигурные блоки из стеклотекстолита типа СТЭФ (до 8 мм толщ.)
Модельный соленоид спектрометра "Сфера" ($\varnothing 0,27/0,13$ м; выс. 0,22 м) ОИЯИ, Дубна /16/	Шинка метал-лургическая (2x3,5) мм ²	<u>ВИТКОВАЯ:</u> Плетеный хлопчатобумажный чулок; межслоевая: 2 слоя стеклоткани толщ. 100 мкм с последующей промазкой эпоксидным компаундом	<u>КОРПУСНАЯ:</u> На фланцах каркаса - стеклотекстолит толщ. 0,5 мм, приклеен терморезактивным лаком; на цилиндрической части каркаса - стеклоткань толщ. 100 мкм (35 слоев), пропитанная терморезактивным лаком

Таблица 4. Продолжение.

<p>Диполи TEVATRON (6,7 длины) FNAL, США /4/</p>	<p>Плетенка из 23 проводов Ø 0,685 мм: (7,6x1,3) мм²</p>	<p><u>Витковая:</u> Майларовая лента (ПЭФ, 25 мкм) внахлест + пропитанная эпоксидом стеклолента (200 мкм) шириной 6,5 мм, намотанная с просветами 1,5 мм; <u>Межслоевая:</u> пропитанная эпоксидом стеклолента толщ. 0,5 мм</p>	<p><u>КОРПУСНАЯ:</u> проставки из стеклопластика (GFRP - Glass - Fiber Reinforced Plastics)</p>
<p>Квадруполи с "холодным" железом для антипротон- ного канала (0,71 м длины; апертура 0,15x0,37 м) КЕК, Япония /32/</p>	<p>Плетенка из 7 проводов Ø 0,67 мм: (2,65x1,35) мм²</p>	<p><u>Витковая:</u> Липкая полиимидная лента Картон (75 мкм); последующее эпоксидирование под вакуумом всей обмотки; состав компаунда: GY250(46,4%) + HY905(46,4%) + DY040(7%) + WY061(0,2%); термообработка - 20 час при 60°C + 24 час. при 120°C.</p>	<p><u>КОРПУСНАЯ:</u> проставки из стеклопластика (GFRP - Glass - Fiber Reinforced Plastics)</p>
<p>Протоимидные диполи нако- пительного кольца HERA (1 м длины; Ø 75 мм) DESY, ФРГ /12/</p>	<p>Плетенка из 24 проводов Ø 0,83 мм: 10x1,67(1,28) мм²</p>	<p><u>Витковая:</u> первый слой - полиимидная пленка Картон шириной 12 мм, толщ. 25 мкм, намотанная с 60% перекрытием; второй слой - по I варианту - покрытая с обеих сторон дополимеризующимся долиимидным клеем Tetrabond лента Картон (9 мм x x 75 мкм), намотанная с просветами 1 мм; температура отверждения 180°C; - по II варианту - препрег из стеклово- локнистой ленты (9 мм x 120 мкм), прои- танной эпоксидом в стадии полимеризации, отверждение при 160°C; намотка с просве- тами 3 мм.</p>	<p><u>КАТУШЕЧНАЯ:</u> стеклопластик G-11 (glass - fiber reinforced epoxy) со щелями для охлаждающего гелия; <u>КОРПУСНАЯ:</u> 6 слоев полиимидной ленты Картон толщ. 125 мкм. Ж) Вся обмотка после намотки обжимается бандажными пластинами с силой ~ 4,4 МН</p>

Таблица 4. Окончание.

<p>Корректирующие катушки накопительного кольца HERA DESY, ФРГ /33/</p>	<p>Одиночные стержни $\varnothing 0,7$ мм</p>	<p><u>Витковая:</u> полиимидная лента Картон (2,5 мкм), обернутая вокруг стержня с перекрытием + стекловолокно. Сначала однослойные катушки наматываются на плоский шаблон, затем закрепляются лихой лентой (Картон) и изгибаются вокруг монопровода. Используются смола Shell Epikote 215 и V140 в отношении 2:1, термообработка $\leq 150^{\circ}\text{C}$.</p>	<p><u>Катушечная:</u> каждая катушка обматывается 5 слоями арамидной нити (лески) АРЕНКА 900 KEVLAR с натягом 900 Н/мм²; <u>Корпусная:</u> стекловолокно и полиимидная (Картон) пленка, общая толщина 0,5 мм; <u>Наружная изоляция:</u> стекловолокно толщ. 0,15 мм.</p>
---	--	--	---

Таблица 5. Электроизоляционные материалы, использованные в обмотке модельного СЦМ и предполагаемые к применению в СЦ соленоиде детектора CDF на ускорителе TEVATRON (FNAL, США) /34/

Соленоид	Межвитковая изоляция	Катушечная изоляция		Изоляция выводов катушки
		наружная (outside of coil)	внутренняя (inside of coil)	
Модельный (исследовательская программа R and D)	толщина, мм материалы эпоксидная-пропитывающие смолы	0,1 полиамид 50 мкм, намотанный с полуперекрытием эпоксидная полуотвержденная	1,0 листы из слюды и стеклотекстолита полиэстер горячего отверждения	20 пластины из эпоксидного стеклотекстолита G-10 эпоксидная
CDF	толщина, мм материалы пропитывающие смолы	0,1 полиамид 50 мкм или полиамид, намотанный с голуперекрытием эпоксидная полуотвержденная*)	0,36 слоистая и полиимидная ленты полиэстер холодного отверждения	20 пластины из эпоксидного стеклотекстолита G-10 эпоксидная

*) Отверждается после каждых 90 витков при аксиальном усилии ~ 1,85 МН

питку стеклоленты в боббинах; 4) пропитанная стеклолента при хранении (до 3 месяцев) не должна становиться крупной, вязкость связующего не должна значительно увеличиваться, что могло бы помешать точной укладке витков кабеля при намотке обмоток.

При выборе связующего эпоксидного компаунда опробовано несколько типов диановых и модифицированных циклоалифатических смол (типов ЭД и ДЭГ). Опробованы отвердители сшивающего типа и со смешанными функциями (катализатора и отвердителя) - продукты конденсации фенола и формальдегида с диэтилентриамином; типы отвердителей МТГФА, ИзоМТГФА, УП. В качестве пластификаторов опробованы тиоколы, полиэферы и фталаты высших спиртов. Использовались разбавители - активные модификаторы, участвующие в образовании 3-мерной структуры (глицидные эфиры многоатомных спиртов).

Несколько составов из числа опробованных хорошо выдержали условия эксплуатации при низких температурах. Для использования в СПМ СПИНа была отобрана смесь диановых смол с молекулярным весом от 350 до 600: ЭД-153(20% весовых частей) + ЭД-16(50%) + К-115 (30%) с полифункциональными эпоксидными соединениями эпоксиноволачного типа. В качестве отвердителя использована смесь изомерного метилтетрагидрофталевого ангидрида (ИзоМТГФА) с малеиновым ангидридом и метилтетрагидрофталевым ангидридом (МТГФА). Для ускорения процесса отверждения вводился ускоритель аминного типа (диметилбензиламин) что позволило вести полимеризацию при 125⁰С в течение 3-4 часов. Работоспособность обмоток более десятка дипольных и квадрупольных СПМ, выполненных по данной технологии, проверена в рабочих условиях при 4,2 К на трех прототипных периодах СПИНа.

ЭИК СПМ Нуклотрона (рис. I, табл. 4) включает корпусную изоляцию из листового стеклотекстолита толщиной 0,5 мм и фигурного блочного стеклотекстолита, фиксирующего витки в области лобовых частей, и витковую изоляцию - 4слоя x 20 мкм лавсана и 2 слоя стеклоленты, пропитанной эпоксидным компаундом (80 мкм). В серийных СПМ Нуклотрона вместо лавсана применена полиимидная пленка. Предусматривается опробовать на образцах трубчатого СП кабеля и полномасштабных моделях СП несколько вариантов витковой изоляции с использованием липкой полиимидной и стеклоленты и специальной выравнивающей пасты.

При выборе эпоксидного компаунда для выполнения ЭИК обмотки модельного СПМ "Сфера" (табл. 4) нами опробовано 10 различных составов горячего и холодного отверждения. Среди них: компаунд ЭТ-10 на основе эпоксидной смолы ЭД-20, модифицированной нитрильным каучуком (разработка ВНИИэлектромаш, г. Ленинград)/35/; компаунд холодного отверждения на основе связующего К-115 с отвердителями ПЭПА или Л-20; компаунды на основе эпоксидной смолы ЭД-16 и различные сочетания ЭД-16 с К-115 и отвердителями МТГФА и ИзоМТГФА; термореактивный эпоксидный лак горячего отверждения.

Лак показал лучшие результаты (по адгезии к нержавеющей стали каркаса и стойкости к термоударам до температуры 78 К) при выполнении корпусной изоляции обмотки модельного СПМ "Сфера". Пропитка всей обмотки (24 слоя шпинки (2x3,5) мм² в хлопчатобумажной изоляции) осуществлена компаундом ЭТ-10. Примерно такой же результат по стойкости к термоударам до 78 К и технологичности пропитки был получен на нескольких небольших

моделях обмоток при использовании пропитывающего состава на основе связующего (смесь ЭД-16 и К-115) и отвердителя ИзомТТФА в пропорции 120 гр связующего и 80 гр отвердителя.

IV. ВЫБОР И ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ИСПО-
ЛЬЗОВАНИЯ В ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ КОН-
СТРУКЦИЯХ СПМ

Наиболее распространенными электроизоляционными материалами (ЭИМ), используемыми в ЭИК СПМ в устройствах физики высоких энергий, являются стеклопластики (применяются и углепластики^{/37/}), полиимидные и лавсановые пленки, липкие полиимидные и стеклоленты и стекловолоконистые материалы, пропитанные эпоксидными полимеризующимися составами, препреги на основе лавсановой бумаги или стеклосетки. Применяются также различные композиционные полимерные материалы с органическими и неорганическими наполнителями.

Исследованиям физических свойств ЭИМ при криогенных температурах посвящен ряд работ, например^{/20, 31, 35+48/}. Однако, ввиду специфики работы диэлектриков в криогенных условиях и отсутствия единых норм, стандартов и методики испытаний их физических свойств при низких температурах, данные разных авторов значительно отличаются друг от друга. В^{/49/} предложена одна из возможных методик выбора ЭИМ для использования в ЭИК СПМ, определяющая порядок и методы их испытаний. Критерии оценки свойств ЭИМ, предназначенных для применения в СПУ различного назначения, зависят от типа данного устройства и

функций, которые данные материалы в этом устройстве выполняют: элемента конструкции, электрической изоляции, теплоизоляции, заливочного или покровного материала. Поскольку изучение физических свойств материалов при криогенных температурах - дорогостоящий процесс, предлагается определенный рациональный объем испытаний (сначала - на образцах, а затем - на моделях). Порядок их проведения может уточняться в каждом отдельном случае. Такой подход, включающий и представление о свойствах материалов на уровне их молекулярной структуры, позволяет не только получить характеристику известных материалов при работе в криогенных условиях, но и создавать новые материалы с заранее заданными свойствами, предназначенные специально для криогенной техники. Например, для изоляции обмоток СПМ ускорителей порядок испытаний, позволяющий наиболее рационально вести отбор материалов, может быть таким: 1) определение стойкости изоляции к термоударам (достаточно до 78 K); 2) определение её температурной усадки - расширения; 3) определение прочности при растяжении, сжатии и изгибе (в криогенных условиях); 4) механические испытания при статических нагрузках, при которых определяются, в том числе, температуры стеклования, морозостойкости и эластичности по термомеханическим кривым; 5) механические испытания при динамических нагрузках (определение модулей упругости при кручении или растяжении, определение ударной прочности по методу Шарпи) ;6) определение электрической прочности в жидком гелии; 7) измерения удельного объемного электрического сопротивления, диэлектрической проницаемости и коэффициента диэлектрических потерь ($\text{tg } \delta$) - в рабочей среде; 8) испытания на тепловое и электрическое ста-

рение (при необходимости); 9) определение удельных теплоемкости и теплопроводности; ¹⁰⁾ определение радиационной стойкости в условиях, близких к эксплуатационным. Затем проводятся испытания на моделях при длительных комбинированных воздействиях, приближающихся к рабочим условиям. Естественно, что далеко не всегда необходимо перечисленные испытания проводить в полном объеме. Иногда вполне достаточно провести испытания по п.п. I, 6 и 10. Из отобранных по приведенной выше методике ЭИМ выполняются модельные и полномасштабные ЭИК, которые подвергаются новым испытаниям. Например, для обмоток СПМ с косвенным криостатированием необходимо исследовать адгезию пропитывающих составов к металлу каркасов, теплообменников, проводнику. Только при хорошей адгезии ЭИМ к металлам в криогенных условиях можно рассчитывать на достаточную температуро- и теплопроводность всей конструкции в целом, что играет определяющую роль в обеспечении надежной работы СПМ с косвенным криостатированием.

Из композиционных полимерных материалов в конструкциях обмоток СПМ наиболее часто используются материалы, армированные стеклянными или угольными волокнами. Изменение механической прочности некоторых типов стеклопластиков под воздействием радиационного облучения представлено на рис. 4/41/. Облучение (доза $1,1 \cdot 10^7$ Гр) велось при 5 К, измерения - при 4,2 К без промежуточного отогрева. Механическая прочность при растяжении, сжатии и изгибе образцов из стеклопластика G-10CR (компаунд на основе бис-фенольной (А) смолы и отвердителя аминного типа, армирован на 67% (объемных) E-стеклотканью) существенно снизилась. Снижение на 10-30% отмечалось и для образцов из стеклопластика G-11CR (основа, как и у G-10CR,

отвердитель аминного типа несколько иного состава, объемный процент армировки Е-стеклотканью - 70%). Стеклопластик VL-E200 на основе циклоалифатической смолы с ангидридным отвердителем и армировкой Е-стеклотканью показал результаты, близкие к G-10CR. Механические же свойства армированных Е-стеклотканью образцов на полиимидной основе (TIL-G1000) даже улучшились после облучения.

Влияние радиационного облучения при криогенных температурах на материалы и компоненты СПМ подробно освещено также в /46,47/.

Обширный экспериментальный материал о свойствах эпоксидных компаундов зарубежного производства для пропитки обмоток СПМ приведен, например, в /39,42/.

В таблице 6 приведены результаты измерения в жидком гелии электрической прочности некоторых полимерных ЭИМ. Измерения проводились на высоковольтной испытательной установке "Искриз" (ОИЯИ)/48,50/. Установка (рис.5), действующая с 1972 года, содержит металлический криостат \varnothing 300 мм, высотой 1300 мм с высоковольтным вводом и смотровыми окнами на стеклотекстолитовых сменных крышках криостата с различными испытательными ячейками (рис. 6,7). На установке можно испытывать длительную ^и кратковременную электрическую прочность пленочной

Таблица 6. Электрическая прочность некоторых полимерных и композиционных пленочных материалов, измеренная *) в жидком гелии на установке "Искриз" /48/

Поставщик и название материала	Число слоев и толщина пленки	Скорость подъема напряжения [кВ/с (пост): кВ _Д /с (50Гц)]	Электрическая прочность: E _{пр} ^{50 Гц} [кВ _Д /мм] E _{пр} ⁺ и E _{пр} ⁻ [кВ/мм]
а) Образцы ВУКИ (УССР): полиэтиленовая пленка КВ-2-II	2x40 мкм	I кВ/с	E _{пр} ⁺ = 255; E _{пр} ⁻ = 225
	2x40 мкм	0,25 кВ _Д /с	E _{пр} ⁵⁰ = 121
	Ix40 мкм	I кВ/с	E _{пр} ⁺ = 400
б) полипропиленовая пленка	Ix15 мкм	-	E _{пр} ⁵⁰ = 204
Образец ВНИИМ (Москва) полипропиленовая пленка	I,25 мкм	0,7 кВ _Д /с	E _{пр} ⁵⁰ = 216
	Образцы СКБ СИ (Рига):		
а) ЛСПАКЛ-80	2x110 мкм	-	E _{пр} ⁻ = 100
	Ix110 мкм	-	E _{пр} ⁻ = 136
б) ЛСН-180	Ix110 мкм	0,7 кВ _Д /с	E _{пр} ⁵⁰ = 23
в) полиимидная пленка ПМ-С	Ix50 мкм	0,7 кВ _Д /с	E _{пр} ⁵⁰ = 120
г) ниплон	Ix25 мкм	0,7 кВ _Д /с	E _{пр} ⁵⁰ = 112
д) лавсан	Ix30 мкм	0,7 кВ _Д /с	E _{пр} ⁵⁰ = 120
е) ЛСПАИ ₂	Ix125 мкм	0,7 кВ _Д /с	E _{пр} ⁵⁰ = 58,5
ж) ЛСЭ	Ix155 мкм	0,7 кВ _Д /с	E _{пр} ⁵⁰ = 14,2

*) Электроды из нержавеющей стали: Ø 25 мм (высоковольтный) - Ø 75 мм (земляной).

и листовой электроизоляции на переменном (50 Гц) и постоянном напряжениях до 65 кВ_д и 80 кВ, соответственно. Источники напряжения и измерительная аппаратура изготовлены на заводе Thy, г. Дрезден (ГДР). Предусмотрен подъем напряжения в широком диапазоне скоростей (от 0,3 до 2,5 кВ/с) и автоматическое отключение при пробоях. Имеется устройство для измерения частичных разрядов (ЧР) в испытываемых образцах ЭИМ и ЭИК (измеритель ЧР типа мут-8). Аппаратура для широкополосного измерения ЧР обеспечивает чувствительность измерений (при напряжениях до 60 кВ) до $5 \cdot 10^{-14}$ Кл при длительности импульсов от 0,01 мкс до 10 мкс.

У. ВЫВОДЫ.

1. Использование СПМ в основных устройствах физики высоких энергий (инжекторах и каналах частиц, ускорителях, детекторах и спектрометрах) достигло уровня длительной непрерывной эксплуатации. При этом надежность, обоснованность и долговечность работы сложных электрофизических установок в целом в значительной степени определяются качеством выполнения ЭИК обмоток СПМ, входящих в их состав. В связи с этим, наряду с исследованиями, связанными с созданием криогенных, электронных, электротехнических и магнитных систем этих установок, необходимо шире развернуть работы по проведению комплексных долговременных ресурсных испытаний ЭИК СПМ в условиях, максимально приближенных к рабочим.

2. ЭИК обмоток обсуждаемых СПМ работают в условиях одновременного воздействия сверхнизких температур (до 4 К) и больших механических и радиационных нагрузок (соответственно, до 400-600 МПа - на сжатие и до 10^{18} Гр - по поглощенной

интегральной дозе за 10 лет эксплуатации). Для крупных адиабатических обмоток СПМ постоянного тока характерны: высокая плотность тока, повышенная чувствительность к внутренним тепловыделениям, уникальность конструкции и технологии изготовления, необходимость в ряде случаев замоноличивания обмоток. Для импульсных СПМ ускорителей - прецизионность и идентичность выполнения многочисленных (до нескольких сотен и более) обмоток, которые должны сохраняться в течение нескольких десятков лет эксплуатации с периодическими захлаживаниями и отеплениями.

3. Основные требования к выполнению ЭИК обмоток СПМ для устройств физики высоких энергий: достаточная механическая (2-3 кратный запас пределов прочности по отношению к максимальным напряжениям в изоляции) и электрическая (до 3 кВ - для корпусной изоляции) прочность, эластичность, радиационная стойкость, высокая теплопроводность и хорошая адгезия к соседним элементам конструкции обмоток (при косвенном их криостатировании), технологичность и умеренная стоимость изготовления.

4. Направления дальнейших поисковых работ, направленных на создание надежных ЭИК СПМ для физики высоких энергий:

- а) разработка эластичных и стойких к термоударам компаундов (желательно - холодного отверждения) для замоноличивания обмоток;
- б) повышение качества и экспериментальные исследования в модельных конструкциях липких лент, препрегов и выравнивающих полимеризующихся паст;
- в) разработка и испытания вакуумноплотных, механически и электрически (до ~ 5 кВ) прочных диэлектрических развязок для обмоток из трубчатого сверхпроводника;
- г) увеличение радиационной стойкости ЭИМ и ЭИК обмоток СПМ.

5. Необходима разработка единых норм и технических условий на испытания ЭИМ и ЭИК СПМ. При этом, учитывая уникальность и большую стоимость СП обмоток, следует разработать и использовать при изготовлении и эксплуатации крупных СПМ неразрушающие методы контроля качества выполнения и состояния ЭИК их обмоток.

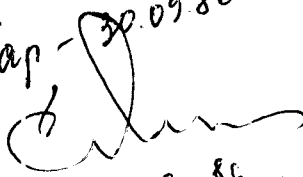
Шелков
08.10.86

И. Луиз

30.09.86г.

Кар

30.09.86



30.09.86

Недостающая подпись Ю.А. Шилова имеется
в рабочих материалах рукописи.

Шелков

4.10.86

Савлов

ПОДРИСУНОЧНЫЕ НАДПИСИ

- Рис. 1. Импульсный СП дипольный магнит для Нуклотрона из трубчатого сверхпроводящего кабеля в железном ярмом (ОИЯИ, Дубна, /8/).
- Рис. 2. Сверхпроводящие дипольный и квадрупольные магниты для синхротрона СПИИ (ОИЯИ, Дубна, /9/).
- Рис. 3. Сверхпроводящий магнит для спектрометра релятивистских ядер (проект "Сфера", ОИЯИ, Дубна, /16/).
- Рис. 4. Действие радиационного облучения ($1,1 \cdot 10^9$ рад) на механическую прочность при растяжении (р), сжатии (с) и изгибе (л) образцов из стеклопластиков /41/.
- Рис. 5. Высоковольтная криогенная установка "Искриз" (ОИЯИ, Дубна) для исследований электрической прочности изоляции в жидком гелии /48/.
- Рис. 6. Высоковольтные испытательные ячейки установки "Искриз" для исследований в жидком гелии электрической прочности барьерной пленочной (слева) и эпоксидной (справа) изоляции /48/.
- Рис. 7. Высоковольтная испытательная ячейка установки "Искриз" для испытаний в жидком гелии пленочной изоляции на электрическую прочность /48/.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аксенов В.Г. и др. ОИЯИ, Р8-8563, Дубна, 1975.
2. Анищенко Н.Г. и др. ОИЯИ, 9-82-177, Дубна, 1982.
3. CERN COURIER, Vol. 25, N 2, 1985, p.59.
4. The Energy Doubler design study. A progress Report. FN-263, 1.03.1974.
5. Криогенные приборы и устройства в ядерной физике. Под ред. А.Г.Зельдовича. Энергоиздат, М., 1982.
6. CERN COURIER, Vol. 16, N 12, 1976, p.431.
7. Балдин А.М. и др. В кн.: Труды IV Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. "Наука", М., 1975, т. 2, с.4.
8. Smirnov A.A. et al. Proc. 8 th Intern. Conf. on Magn. Technol. Grenoble, 1983. (Journ. de Physique; Vol.45, 1984, p.C1-279).
9. Шелаев И.А. и др. ОИЯИ, Р9-83-582, Дубна, 1983.
10. Адо Ю.М. и др. В кн.: Труды IV Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. "Наука", М., 1975, т. I, с.44.
11. Агеев А.И. и др. В кн.: Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. ОИЯИ, Дубна, 1985, т. II, с.335.
12. Wolff S. Proc. 9-th Intern. Conf. on Magn. Technol., Zurich, 1985, p.62.
13. CERN COURIER, Vol. 25, N 9, 1985, p.383.
14. Horvath I., Vécsey. Proc. ^{G.}9-th Intern. Conf. on Magn. Technol., Zurich, 1985, p.174.
15. Desportes H. Proc. 9-th Intern. Conf. on Magn. Technol., Zurich, 1985, p.149.
16. Аверичев С.А. и др. ОИЯИ, Р1-85-512, Дубна, 1985.
17. Шишов Ю.А. В кн.: Труды рабочего совещания по программе экспериментов на встречных пучках. ОИЯИ, ²¹⁻⁸³⁻⁵⁴¹ Дубна, 1983, с. II6.

18. Iwasa Y. et al. Cryogenics, Vol. 25, N 6, 1985, p.304.
19. Yamada T. et al. Proc. 7 th Intern. Conf. on Magn. Technol., Karlsruhe, 1981. (IEEE Trans. on Magnetism, Vol. Mag.-17, N5, 1981, p.1799).
20. Анищенко Н.Г., Минеин В.Ф. ОИЯИ, Р8-6987, Дубна, 1973; ПТЭ, №6, 1973, с.176; Cryogenics, Vol.14, N7, 1974, p.409.
21. Wake M. et al. Proc. 9-th Intern. Conf. on Magn. Technol., Zurich, 1985, p. 178.
22. Koizumi K. et al. Adv. in Cryog. Eng., Vol.28, Plenum Press, New York, 1982, p.223.
23. Вигли Д.А. Механические свойства материалов при низких температурах. Пер. с англ., "Мир", М., 1974.
24. Брехна Г. Сверхпроводящие магнитные системы. Пер. с англ., "Мир", М., 1976.
25. Hartwig G., Knaak S. Cryogenics, Vol. 24, N 11, 1984, p. 639.
26. Справочник по физико-техническим основам криогеники. Под ред. Малкова М.П., издан.3, Энергоатомиздат, М., 1985.
27. Фастовский В.Г. и др. Криогенная техника. "Энергия", М., 1967.
28. Kasen M.B. et al. Adv. in Cryog. Eng., Vol. 26, Plenum Press, New York, 1980, p. 235.
29. Pickett F.R. Proc. 5-th Intern. Conf. on Magn. Technol., Rome, 1975, p. 659
30. Аверченко В.П. и др. В кн.: Производство и переработка синтетических смол пластическим способом. М., НИИПМ, №3, 1977, с.11.
31. Liptak G. et al. Report CERN 85-02, Geneva, 1985.
32. Tsuchiya K et al. Nucl. Instrum. and Meth., Vol. 206, 1983, p. 57.
33. Daum C. Proc. 8-th Intern. Conf. on Magn. Technol., Grenoble, 1983, rep. C1-267.

34. East R. et al. Design Report for an Indirectly Cooled 3-m diameter S.C. solenoid for the Fermilab Collider Detector Facility (CDF). TM-1135, 1982.
35. Пономарев Л.Т., Богоявленский О.С. В кн.: Труды II Всесоюзной конф. по технической сверхпроводимости, Ленинград, ^{ЛНИВЦ} 1984, том I, с.325
36. Анищенко Н.Г., Долбилова Г.И., Шишов Ю.А. ОИЯИ, 9-10107, Дубна, 1976.
37. Kawan M. Cryogenics, Vol. 21, N 6 , 1981, p. 323.
38. Billan J. Preprint CERN ISR-LTD/76-15, Geneva, 1976.
39. Middleton A.J. et al. Preprint RHIC/R-265, 1972.
40. Takamura S., Kato T. Cryogenics, Vol. 20, N 8 , 1980, p.441.
41. Takamura S., Kato T. Adv. In Cryog. Eng., Vol.30, 1984, p.41.
42. Evans D. et al. Preprint RHIC/R-251, 1972.
43. Минейн В.Ф., Анищенко Н.Г. ЖТФ, № II, 1976, с.2432.
44. Reed R.P. et al. Cryogenics, Vol.13, N2, 1973, p.67.
45. Hartwig G. Proc. ICMS/ICES Conf., San-Diego, 1981.
46. Влияние облучения при низких температурах на материалы и компоненты СП магнитов. Препринт CERN 77-03, февраль 1976.
47. Чураков Г.Ф. и др. Сб. "Электрофизическая аппаратура", вып. 18, Атомиздат, М., 1981, с.46.
48. Анищенко Н.Г., Степанов А.Н., Шишов Ю.А. Электрическая изоляция СП магнитов электрофизических и энергетических установок. ЛатНИИТИ, Рига, 1982.
49. Анищенко Н.Г., Изворский Э. ОИЯИ, Р8-7663, Дубна, 1974.
50. Анищенко Н.Г. и др. ОИЯИ, 8-82-172, Дубна, 1982.

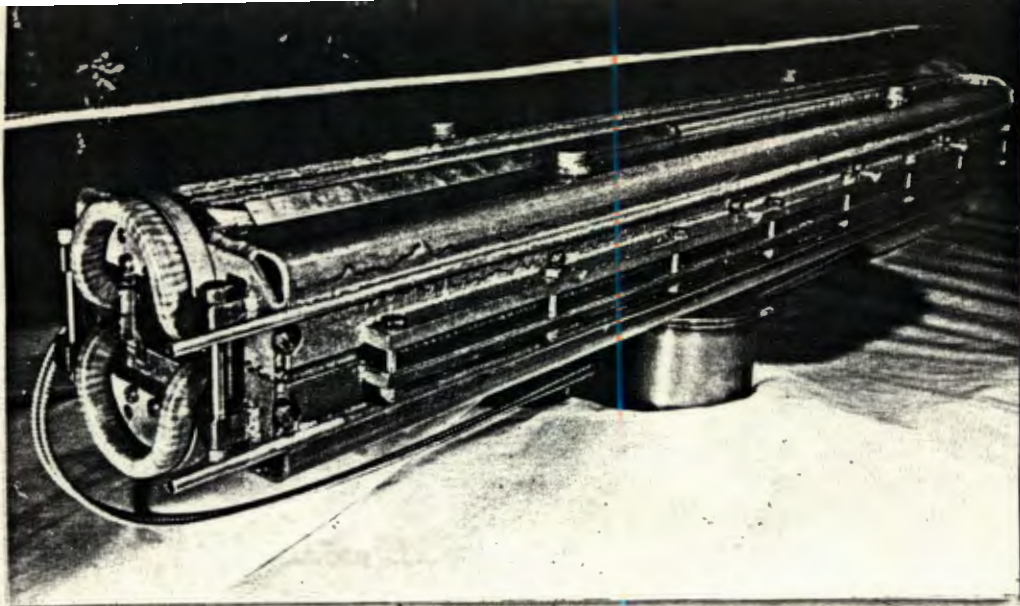


рис. 1.



рис. 2.

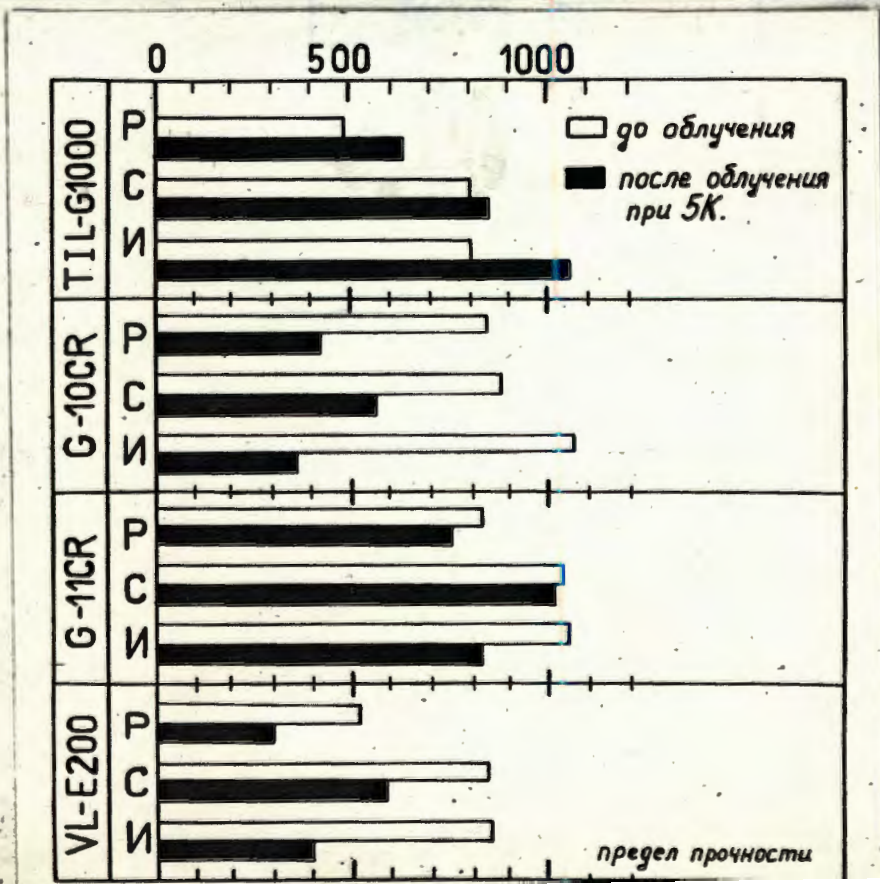


рис. 4.

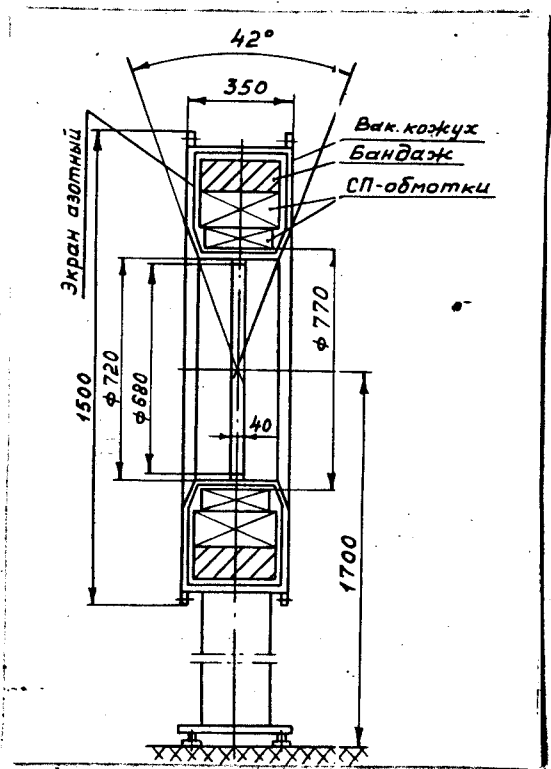
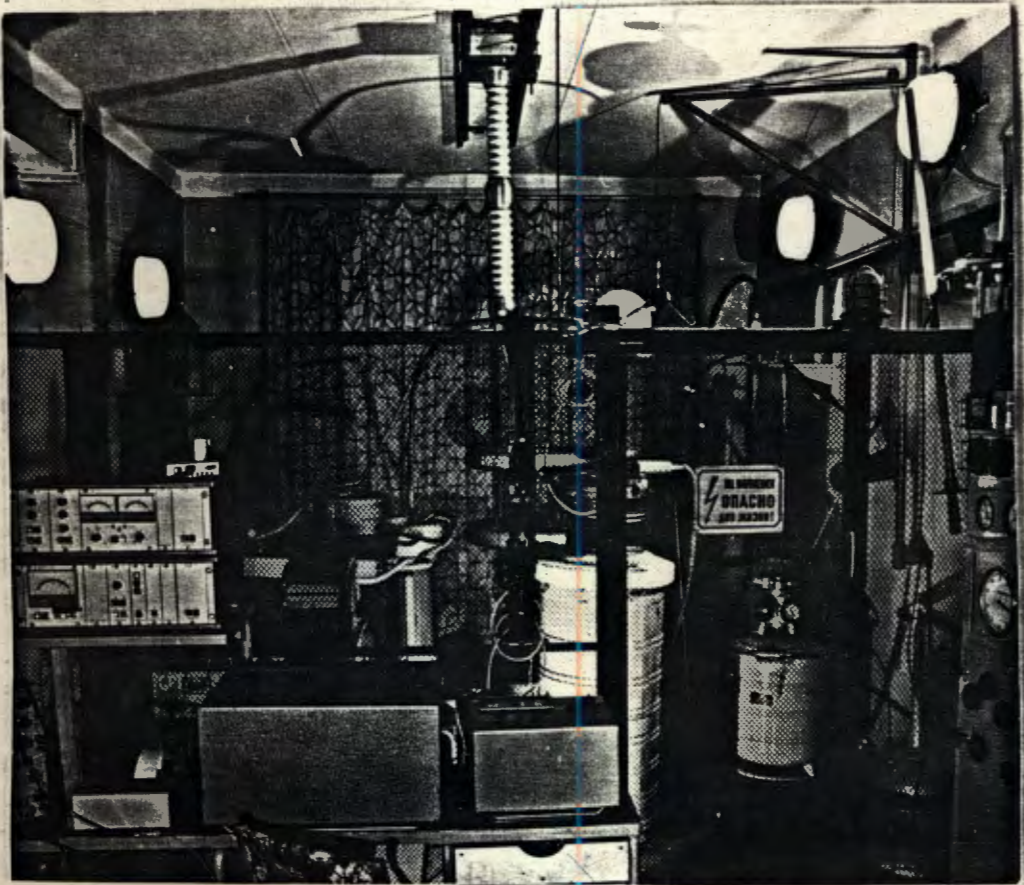
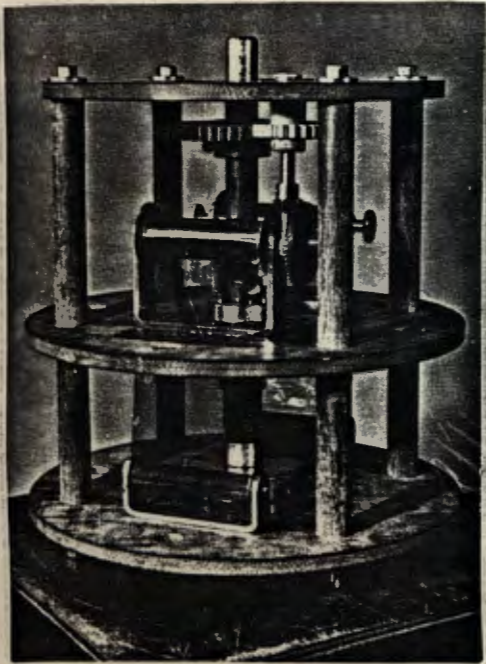


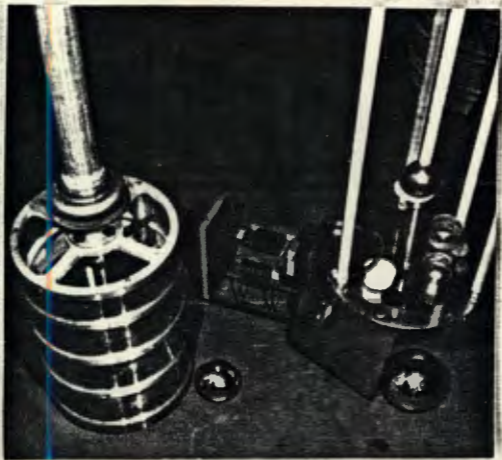
рис. 3.



pic. 5.



pic. 7.



pic. 6.