

# ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ИЗОЛЯЦИЯ ОБМОТОК СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МАГНИТОВ ДЛЯ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

*Н. Г. Анищенко, И. Е. Карпунина, А. А. Смирнов,  
Ю. А. Шишов*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

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 «Искриз» для измерений электрической прочности и интенсивности частичных разрядов в ЭИК и ЭИМ.

The examples of successful utilization of superconducting magnets (SM) in high energy physics installations and also data for some planned devices are considered.

The peculiarities of the behaviour of adiabatic high current density SM windings, in particular high sensibility to internal heat evolution, are discussed. Main requirements for electroinsulating constructions (EIC) are given. Data are presented on SM winding and frame insulation, SM impregnating compositions and also on electroinsulating materials (EIM) used in EIC for SM. In particular, the effect of irradiation on mechanical properties is shown. Data for dielectric strength of some EIM are given. The methods of selection of EIM for SM determining a rational order of testing EIM properties are suggested. The JINR high-voltage setup «ISKRIZ» used to measure electric strength and partial discharge intensity is briefly described.

## ВВЕДЕНИЕ

В последние 30 лет важнейшим источником экспериментальной информации, затрагивающей основы физики, явились исследования на ускорителях. Причем сооружались ускорители на все возрастаю-

щие энергии и интенсивности пучков, создавались все более сложные регистрирующие установки. Видимо, такая тенденция сохранится еще не один десяток лет. Следует подчеркнуть, что перспективы в развитии ускорительной техники и соответствующей регистрирующей аппаратуры связаны исключительно с использованием технической сверхпроводимости.

В настоящее время использование сверхпроводящих магнитов (СПМ) в ведущих физических центрах мира достигло уровня длительной непрерывной эксплуатации. Проектируются и сооружаются все более сложные и крупные электрофизические установки с применением СПМ. Выбор электроизоляционных материалов и исполнение электроизоляционных конструкций обмоток СПМ в значительной степени определяют надежность работы в целом современных физических установок, содержащих СПМ.

### 1. СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ МАГНИТЫ В ФИЗИКЕ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

СПМ используются в основных устройствах, применяемых в физике высоких энергий, — источниках и каналах частиц, ускорителях, детекторах и спектрометрах. Причем в эксплуатации находятся СПМ с высокой конструктивной плотностью тока ( $\geq 10^8$  А/м<sup>2</sup> при 5 Тл) и различной системой криостатирования — погружной, циркуляционной, косвенной.

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

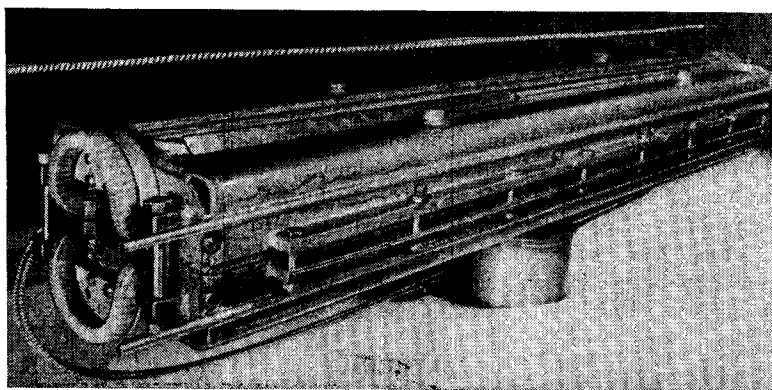


Рис. 1. Импульсный СП дипольный магнит для Нуклотрона из трубчатого сверхпроводящего кабеля с железным ярмом (ОИЯИ, Дубна, [8])

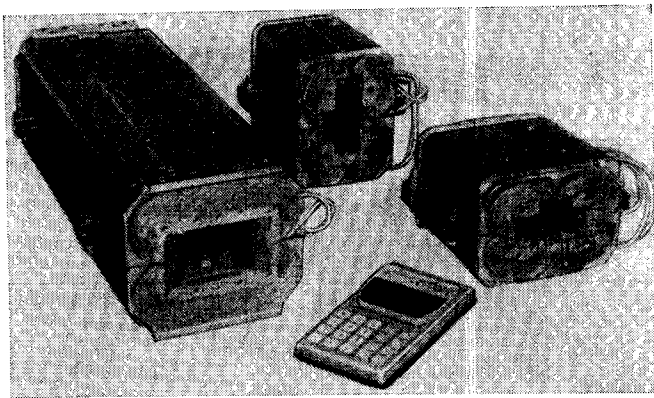


Рис. 2. Сверхпроводящие дипольный и квадрупольные магниты для синхротрона СПИН (ОИЯИ, Дубна, [9])

тель протонов Tevatron (Doubler/Saver) [3—5] (табл. 1). 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 шт. 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;  $I_{\text{раб}} = 3,5 \cdot 10^7$  А/м<sup>2</sup>;  $W_{\text{зап}} = 17$  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 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 СПИН совместно с рефрижератором КГУ-1600/4,5 и испытания его магнитной системы: инжектированный пучок протонов проведен через всю цепочку сверхпроводящих диполей и квадруполов.

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 продолжается моделирование полномасштабных шестиметровых импульсных СП-диполей УНК [11].

В ФРГ (DESY, Карлсруэ) создается электрон-протонный коллайдер с СП-накопительным кольцом на 820 ГэВ [12] (табл. 1). В США начаты работы по проекту SSC-гигантского суперколлайдера на

Таблица 1. Основные параметры сверхпроводящих ускорителей

Параметр	TEVATRON FNAL, США [3-5]	УНК ИФВ, СССР [5, 10, 11]	Исклорон ОИЯИ, Дубна [7, 8]	СПИН ОИЯИ, Дубна [9]	СП-кольцо коллайдера HERA DESY, ФРГ [12]	Суперкол- лайдер SSC, США [13]	СП-коллай- дер Isabelle* BNL, США [5]
Максимальная энергия частиц, ГэВ	4000	3000	7 ГэВ/пуклон	1,5	820	20 000	800
Интенсивность пучка, протон/имп.	5-10 <sup>13</sup>	6-10 <sup>14</sup>	3-10 <sup>12</sup> (дейтерий) 1-10 <sup>9</sup> (уран-82)	1,5-10 <sup>11</sup>	—	—	—
Средний диаметр уско- рительного кольца, км	2	6	0,08	0,054 (периметр)	2	28,6	1,2
Размеры внутренней ка- меры, см	7,1×7,1	6×7	9,0×4,2 (апертура диполя)	∅5	—	—	∅8
Наружные размеры маг- нитов, см	25,4×38	—	25,6×16,6 (железное ядро)	15×14 (железное ядро)	—	—	∅47
Общее число диполей, шт.	774	2460	96	48	422	—	744
Общее число квадруполь- ей, шт.	240	402	64	58	224	—	372
Длина диполя, м	6,7	5,8	4,51	0,42	6,0	16,6	4,75

Продолжение табл. 1

Параметр	TEVATRON FNAL, США [3-5]	УНК ИФВЭ, СССР [5, 10, 11]	Нуклотрон ОИЯИ, Дубна [7, 8]	СПИН ОИЯИ, Дубна [9]	СП-кольцо коллайдера HERA DESY, ФРГ [12]	Суперкол- лайдер SSC, США [13]	СП-коллай- дер Isabelle* BNL, США [5]
Длина квадруполя, м	1,5	4,0	0,4	0,15	2,0	—	1,5
Максимальная индукция поля диполя, Тл	4,2	5,0	2,1	2,3	4,65	6,0—6,4	5,0
Максимальный градиент поля в квадруполе, Тл/м	100	74	35	87,5	90	—	67
Рабочий ток магнитов, кА	5,2	—	6,3	2,07	5,67 (в диполях)	—	4,25
Запасенная энергия на один магнит при максимальном поле, кДж	500	—	12 (в диполях) 6 (в квадруполях)	3,3 (в диполях) 0,87 (в квадруполях)	—	—	82)
Конструктивная плотность тока, А/м <sup>2</sup>	—	—	1,2·10 <sup>8</sup>	5·10 <sup>8</sup>	—	—	—

\* Проект заморожен.

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

Параметр	ISR CERN, Швейцария	PER (TRC) SLAC, США	PETRA (CELLO) DESY, ФРГ	GDF FNAL, США	TRISTAN (TOPAZ) KEK, Япония	TRISTAN (VENUS) KEK, Япония	LEP (DELPHI) CERN, Швейцария	LEP (ALPH) CERN, Швейцария
	Разрабатываются для коллайдеров в настоящее время							
Первое поколение действующих «тонкостенных» СП-магнитов								
Изготовитель магнита	?	LBL 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)	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	6×9	3,6×0,9	1,6×2,2 9×2,2	20×3,9	18×3,6	40×6,6	24×4,5	35×3,6
Материалы матрицы проводника	Медь, алюминий	Медь	Медь, алюминий, припой	Медь, алюминий	Медь, алюминий	Медь, алюминий	Медь, алюминий	Медь, алюминий
Масса 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
Плотность тока в проводнике, А/мм <sup>2</sup>	4,1·10 <sup>7</sup>	7·10 <sup>8</sup>	1,4·10 <sup>8</sup>	6,4·10 <sup>7</sup>	5,6·10 <sup>7</sup>	6,2·10 <sup>7</sup>	4,6·10 <sup>7</sup>	4,0·10 <sup>7</sup>
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	3)	19	12	109	130
Общая масса, т	—	—	—	11	40	—	87	60
Радиационная толщина магнита, отн. ед.	1,1	0,68	0,5	0,85	0,7	0,52	4	1,6

Рис. 3. Сверхпроводящий магнит для спектрометра релятивистских ядер (проект «Сфера», ОИЯИ, Дубна, [16])

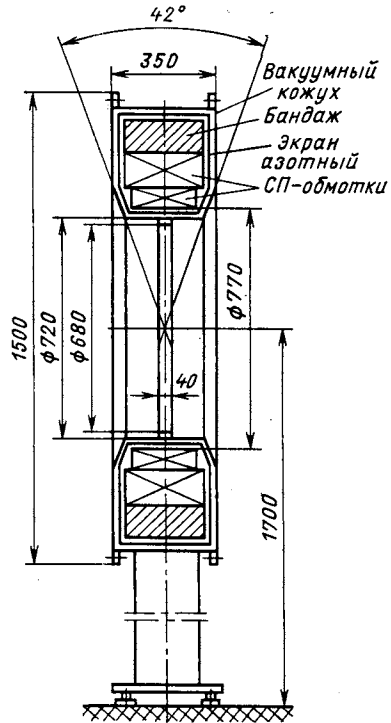
20 ТэВ. Длина накопительного кольца этого ускорителя с СПМ на 6 Тл составит  $\sim 90$  км [13] (табл. 1). В 1986 г. проведены испытания полномасштабного (16,6 м) дипольного магнита SSC.

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 (внутренний диаметр соленоидов 115 мм;  $I_{\text{раб}} = 1$  кА;  $B_0 = 5$  Тл) [5, с. 99; 14]. За это время накоплен значительный опыт работы с СПМ в условиях длительной эксплуатации без отепления. Отметим, что за весь период эксплуатации по разным причинам произошло более 110 переходов СПМ в нормальное состояние. И не

было ни одного перехода из-за неполадок с электроизоляционной конструкцией (ЭИК) магнитной системы, несмотря на то, что нейтронное облучение первого по ходу пучка СПМ составило  $\sim 3 \cdot 10^6$  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 криостата). СПМ первого поколения (1975—1981 гг.) для таких детекторов выполнены «тонкостенными»: магнит по проекту ISR (CERN); магнит для камеры TPC; 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 FNAL, США; соленоиды TOPAZ и VENUS для ускорительного комплекса TRISTAN в КЕК, Япония; соленоиды DELPHI и ALEPH для эксперимента LEP (CERN, табл. 2).

\* 1 Гр = 1 Дж/кг = 100 рад; для полимеров доза радиационного поглощения  $10^9$  рад соответствует интегральной дозе облучения нейтронов  $10^{48}$  см<sup>-2</sup>.



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

## 2. ОСОБЕННОСТИ СПМ, ИСПОЛЪЗУЕМЫХ 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  $[(1-5) \cdot 10^8$  А/м<sup>2</sup>]. Такие обмотки на постоянном токе часто предназначены для работы в условиях, близких к адиабатическим, и они обладают повышенной чувствительностью к внутренним тепловыделениям. Причины повышенной чувствительности обмоток СПМ к внутренним тепловыделениям Иваса с сотр. [18] связывают в основном с очень низкой [порядка  $1 \cdot 10^{-3}$  Дж/(см<sup>3</sup>·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 (десятихи 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 75 % тока перехода. При этом тепловыделение составляет всего  $\sim 70$  мДж. Значительно улучшало ситуацию в данном случае помещение 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/м<sup>3</sup>. Поэтому важно уменьшать толщину слоев компаунда и армировать их, например стеклотканью: это снижает вероятность растрескивания и, соответственно, тепловыделений в обмотке.



Механические силы, воздействующие 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 конструкции обмотки \*; в-третьих, электромагнитными силами при протекании тока в обмотках.

Напряжение от натяга сверхпроводника, например металлургической шинки составляет  $(3-4) \cdot 10^7$  Н/м<sup>2</sup>.

Термомеханические силы при охлаждении обмоток вызывают сложноподвиженное состояние элементов ЭИК.

Электромагнитные силы в соленоидах в основном растягивают витки по радиусу обмотки и сжимают их по ее оси. Для упрощенной оценки электромагнитные усилия в обмотке обычно представляют эквивалентным магнитным давлением, действующим на нее изнутри (как гидравлическое давление действует на стенки сосуда) и равным (в атм)  $B^2 \cdot 10^{-5} / 2\mu_0$ , где  $B$  — индукция (в Тл),  $\mu_0 = 1,26 \times 10^{-6}$  Гн/м. Например, при  $B = 6$  Тл это давление составляет около 140 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;  $I_{\text{ном}} = 1,5$  кА;  $B = 5,1$  Тл), созданных для экспериментов с накопительными кольцами (проект JSR CERN), характерны азимутальные сжатия до 200 т на 1 м длины каждой половины магнита [38].

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

Для обеспечения высокой механической прочности и теплопроводности адиабатических обмоток СПМ важна хорошая адгезия изоляции и пропитывающих обмотку составов к проводнику, охлаждаемому каркасу или теплообменникам. На модельных СПМ по программе VENUS [15] была измерена адгезия полиимидной пленки к элементам конструкции из алюминия после цикла охлаждения всей модели от 300 до 20 К. Прочность при растяжении образцов, вырезанных из обмотки, в направлении, перпендикулярном границе раздела полиимид — алюминий, составила около 39 МПа. Прочность на сдвиг вдоль этой границы была  $\sim 20$  МПа [21].

В целом требования к ЭИК СПМ с точки зрения механических свойств сводятся к обеспечению определенных величин предела прочности материалов витковой, межслоевой и корпусной изоляции, которые в 2—3 раза должны превышать возникающие в изоляции механические напряжения. Например, при выборе ЭИК СПМ для термоядерной установки, разрабатываемой в Японии по проекту LCT, одним из основных требований является надежная работа вит-

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

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 20	180 560	50 230	17 24,5	[23, с. 287]
Стеклотекстолит FMNA на основе эпоксидной смолы	300 77,3 4,2	300 645 715	300 770 750	— — —	[24, с. 503]
Композит на основе смолы Су221/Ну979 с E-стекловолокном	4,2	1500	800	45	[25]
То же с угольным волокном (Т-3 <sup>00</sup> )	4,2	2000	1000	140	[25]
Эпоксидная смола бисфенольная-А Су221/Ну979	4,2	180	—	8	[25]
Стеклопластик G-10CR на основе эпоксидной бисфенольной-А смолы	295 76 4	415/257 * 825/459 862/496	375/283 834/557 862/598	28/22,4 33,7/27 35,9/29,1	* Числитель — вдоль основы; знаменатель — по утку [28]
Припой ПОС-4 <sup>0</sup>	293 77	56 134	39 } при 100 } срезе	— —	[26, с. 237; 27, с. 379]
Медь МЗ (99,5%)	290 77 20	225 372 450	— — —	112 — —	[26, с. 234; 27, с. 379]
Медь бескислородная	297 77 20 4	330 375 405 400	128 139 150 —	— — — —	[29, с. 669]
Алюминий АД-1 (99,5%), лист отожженный	293 90	78 159	— —	71 —	[27, с. 377]
Алюминий (99,99%)	293 4,2	83 284	— —	— —	[24, с. 16 <sup>0</sup> ]

Продолжение табл. 3

Материал	Температура, К	Предел прочности при растяжении, МПа	Предел прочности при сжатии, МПа	Модуль упругости при растяжении, ГПа	Примечания, литература
Нержавеющая сталь	297	400	—	190	[29, с. 669]
	77	450	—	205	
	20	520	—	210	
	4	550	—	200	

ковой, межслоевой и корпусной изоляции при сжимающих усилиях до 400 МПа при 4 К [22]. В другом примере с СПМ на 7 Тл Станфордского центра линейных ускорителей (SLAC, США) (система Гельмгольца с каналом диаметром 30 см) показано, что при расчетных радиальных напряжениях сжатия в проводнике 17,5 МН/м<sup>2</sup> и аксиальных 30 МН/м<sup>2</sup> напряжения сжатия (в целом) изоляции (плетеный полиамид или нейлон) составят 650 МН/м<sup>2</sup> [24].

Механические свойства некоторых электроизоляционных и конструкционных материалов, используемых в СПМ, приведены в табл. 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 тоководах, диагностических потенциальных выводах и в самой обмотке во время ее 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 тоководах 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 «замоноличивания» обмоток (адиабатических), а в ряде случаев — применения косвенного криостатирования и режима «замороженного» тока, эксплуатация с длительными перерывами и отоплением обмоток между сеансами работы ускорителей.

Отметим некоторые другие особенности обмоток СПМ. Для импульсных СПМ-ускорителей требуются высокая прецизионность и идентичность выполнения нескольких сот обмоток. Воздействия 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.

Радиационные нагрузки на органические материалы основных узлов существующих «теплых» ускорителей протонов, приведенные к 1 году работы, уже в настоящее время достигают  $10^8$  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 ее конструкции), технологичность изготовления, минимально возможные тепловыделения, связанные с трением и растрескиванием материалов ЭИК при воздействии механических усилий и низких температур.

Приведенные выше в общем виде требования к ЭИК СПМ можно систематизировать, например, по способу криостатирования их обмоток. При этом значимость того или иного из перечисленных требований меняется. Так, например, для ЭИК магнитов с циркуляционным охлаждением Нуклотрона наиболее важны требования по механической прочности и надежной адгезии витков обмотки друг к другу и к магнитопроводу, радиационной стойкости; для ЭИК СПМ с косвенным криостатированием установки «Сфера» — требования по высокой теплопроводности и монолитности обмотки, хорошей адгезии изоляции к сверхпроводнику и теплообменникам.

### 3. ПРИМЕРЫ ВЫПОЛНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК СПМ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ФИЗИКЕ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

Некоторые данные по выполнению витковой и корпусной изоляции, а также пропитывающим обмотки СПМ составам приведены в табл. 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 вполнахлеста на плоский кабель  $3,8 \times 0,92$  мм, сверху обмотаны стеклолентой типа АСТТ (б) 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

\* Используется листовой эпоксифенольный стеклотекстолит типа СТЭФ-1.

охлаждающего гелия. Стеклолента пропитана эпоксидным компаундом. При подборе пропитывающего состава учитывались следующие технологические особенности и требования: 1) массовое содержание связующего в стеклоленте после пропитки не должно превышать 20 %; 2) связующее должно обладать достаточной тиксотропностью, предупреждающей заполнение эпоксидом промежутков для охлаждающего гелия при обжати обмотки во время полимеризации; 3) вязкость пропитывающего состава должна быть низкой, обеспечивающей равномерную пропитку стеклоленты в бобинах; 4) пропитанная стеклолента при хранении (до 3 мес) не должна становиться хрупкой, 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 трехмерной структуры (глицидные эфиры многоатомных спиртов).

Несколько составов из числа опробованных хорошо выдержали условия эксплуатации при низких температурах. Для использования в СПМ СПИН была отобрана смесь диановых смол с молекулярной массой от 350 до 600: ЭД-153 (массовое содержание 20 %) + 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 125 °С в течение 3—4 ч. Работоспособность обмоток более десятка дипольных и квадрупольных СПМ, выполненных по данной технологии, проверена в рабочих условиях при 4,2 К на трех прототипных периодах СПИН.

ЭИК СПМ Нуклотрона (см. рис. 1, 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 — 4 слоя × 20 мкм лавсана и 2 слоя стеклоленты, пропитанной эпоксидным компаундом (80 мкм). В дальнейшем вместо лавсана была применена полиимидная пленка. Предусматривается опробовать на образцах трубчатого СП-кабеля и полномасштабных моделях СПМ несколько вариантов витковой изоляции с использованием липкой полиимидной и стеклоленты и специальной выравнивающей пасты.

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

Название магнита	Сечение СП-кабеля	Витковая изоляция СП-кабеля; межслоевая изоляция	Другие виды изоляции
Модели диполей УНК (6 м длины) ИФВЭ, СССР [11]	Пленка из 23 проводов $\varnothing 0,85$ мм в виде трапеции $10,55 \times 1,68 \times 1,34$ мм	<b>Витковая:</b> 2 слоя ленты ПЭТФ (20 мкм) + лента (400 мкм) из пропитанного оксидным компаундом стекловолокна	—
Модельный диполь Нуклотрона (4,5 м длины) ОИЯИ, Дубна [8]	Трубка медная $\varnothing 5 \times 0,5$ мм + 31 провод $\varnothing 0,5$ мм (внешний диаметр кабеля $\varnothing 7$ мм)	<b>Витковая:</b> 4 слоя ПЭТФ * (20 мкм) + 2 слоя стеклотканы, пропитанной оксидным компаундом (80 мкм)	<b>Корпусная:</b> листовой стеклотекстолит (0,5 мм); на лобовых частях обмотки — фигурные блоки из стеклотекстолита
Диполи СЛИН (0,42 м длины) ОИЯИ, Дубна [9]	Пленка из 15 проводов $\varnothing 0,5$ мм, $3,8 \times 0,92$ мм	<b>Витковая:</b> 2 слоя ПЭТФ (20 мкм) + стеклоткань, пропитанная оксидным компаундом (400 мкм)	<b>Корпусная:</b> листовой стеклотекстолит (0,5 мм); на лобовых частях обмотки — фигурные блоки из стеклотекстолита типа СТЭФ (до 8 мм толщиной)
Модельный соленоид спектрометра «Сфера» ( $\varnothing 0,27/0,13$ м; высота 0,22 м) ОИЯИ, Дубна [16]	Шинка металлургическая $2 \times 3,5$ мм	<b>Витковая:</b> плетеный хлопчатобумажный чулок <b>Межслоевая:</b> 2 слоя стеклотканы толщиной 400 мкм с последующей промазкой оксидным компаундом	<b>Корпусная:</b> на фланцах каркаса — стеклотекстолит толщиной 0,5 мм, приклеен термореактивным лаком; на цилиндрической части каркаса — стеклоткань толщиной 400 мкм (35 слоев), пропитанная термореактивным лаком
Диполи TEVATRON (6,7 м длины) FNAL, США [4]	Пленка из 23 проводов $\varnothing 0,685$ мм, $7,6 \times 1,3$ мм	<b>Витковая:</b> майларовая лента (ПЭТФ, 25 мкм) внахлест + пропитанная оксидным компаундом стеклоткань (200 мкм) шириной 6,5 мм, намотанная с просветами 4,5 мм <b>Межслоевая:</b> пропитанная оксидным компаундом стеклоткань толщиной 0,5 мм	—

<p>Квадруполи с «холодным» железом для антипроtonного канала (0,71 м длины; апертура 0,15×0,37 м) КЕК, Япония [32]</p>	<p>Пленка из 7 проводов Ø 0,67 мм; 2,65×1,35 мм</p>	<p><b>Витковая:</b> липкая полиимидная лента <i>Karlon</i> (0,75 мкм); последующее эпоксидирование под вакуумом всей обмотки; состав компаунда: <i>GY 250</i> (46,4%) + <i>HU 905</i> (46,4%) + <i>DY 040</i> (7%) + <i>DY 061</i> (0,2%); термообработка: 2) ч при 60 °C + 24 ч при 12) °C</p>	<p><b>Корпусная:</b> проставки из стеклопластика <i>GFRP</i> — <i>glass</i> — <i>fiber</i> (<i>reinforced plastics</i>)</p>
<p>Прототипные диполи на копительного кольца HERA (1 м длины; Ø 75 мм) DFSY, ФРГ [42]</p>	<p>Пленка из 24 проводов Ø 0,83 мм в виде трапеции 10×1,67 × ×1,28 мм</p>	<p><b>Витковая:</b> первый слой — полиимидная пленка <i>Karlon</i> шириной 12 мм, толщиной 25 мкм, намотанная с 60%-ным перекрытием; второй слой — по I варианту — покрывая с обеих сторон полимеризующимся полиимидным клеем <i>Thermibond</i> лента <i>Karlon</i> (9 мм × 75 мкм), намотанная с просветами 1 мм; температура отверждения 180 °C; по II варианту — препрег из стекловолоконистой ленты (9 мм × 120 мкм), пропитанной эпоксидным компаундом в стадии полимеризации, отверждение при 160 °C; намотка с просветами 3 мм</p>	<p><b>Катушечная:</b> стеклопластик <i>G-11</i> (<i>glass</i> — <i>fiber reinforced epoxy</i>) со щелями для охлаждения; корпусная: 6 слоев полиимидной ленты <i>Karlon</i> толщиной 125 мкм. Обмотка после намотки обжимается бадажными пластинами с силой 4,4 МН</p>
<p>Корректирующие катушки на копительного кольца HERA DESY, ФРГ [33]</p>	<p>Одиночные стренды Ø 0,7 мм</p>	<p><b>Витковая:</b> полиимидная лента <i>Karlon</i> (25 мкм), обернутая вокруг стренды с перекрытием, + стекловолокно. Сначала однослойные катушки наматываются на плоский шаблон, затем закрепляются липкой лентой (<i>Karlon</i>) и изгибаются вокруг ионопровода. Используются смола <i>Shell Epikote 245</i> и V140 в отношении 2:1; термообработка ≤ 150 °C</p>	<p><b>Катушечная:</b> каждая катушка обматывается 5 слоями арамидной нити (лески) <i>ARENKA 900</i> или <i>KEVLAR</i> с натягом 900 Н/мм<sup>2</sup>; корпусная: стекловолоконно и полиимидная (<i>Karlon</i>) пленка, общая толщина 0,5 мм; наружная: стекловолоконно толщиной 0,15 мм</p>

\* В настоящее время вместо пленки ПЭТФ используется полиимидная пленка (30 мкм).

Таблица 5. Электроизоляционные материалы, использованные в обмотке модельного СПМ и предполагаемые к применению в СП-соленоиде детектора CDF на ускорителе TEVATRON (FNAL, США) [34]

Соленоид	Толщина и материал	Межвитковая изоляция	Катушечная изоляция		Изоляция выводов катушки
			наружная	внутренняя	
Модельный (исследовательская программа R and D)	Толщина, мм	0,1	0,36	1,0	20
	Материал	Полиамид 5 <sup>0</sup> мкм, намотанный с полуперекрытием	Слюдяная и полиимидная ленты	Листы из слюды и стеклотекстолента	Пластины из эпоксидного стеклотекстолита G-10
	Пропитывающие смолы	Эпоксидная полуотвержденная	Полиэстер холодного отверждения	Полиэстер горячего отверждения	Эпоксидная
CDF	Толщина, мм	0,1	0,36	Не выбрана	20
	Материал	Полиимид 5 <sup>0</sup> мкм или полиамид, намотанный с полуперекрытием	Слюдяная и полиимидная ленты	—	Пластины из эпоксидного стеклотекстолита G-10
	Пропитывающие смолы	Эпоксидная полуотвержденная *	Полиэстер холодного отверждения	—	Эпоксидная

\* Отверждается после каждых 90 витков при аксиальном усилии  $\sim 1,85$  МН.

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 шинки  $2 \times 3,5$  мм в хлопчатобумажной изоляции) осуществлена компаундом ЭТ-10. Примерно такой же, как в случае с ЭТ-10, 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 ИзоМТГФА в пропорции 120 г связующего + 80 г отвердителя.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ И РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ НЕКОТОРЫХ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В 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 стеклотканевые и стекловолоконистые материалы, пропитанные эпоксидными полимеризующимися составами, препреги на основе лавсановой бумаги или стеклотканевые. Применяются также различные композиционные полимерные материалы с органическими и неорганическими наполнителями. СП-провода круглого сечения покрываются полиимидными или полиэфирными эмаль-лаками.

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 СП-устройствах 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 материала 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 К); 2) определение ее 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

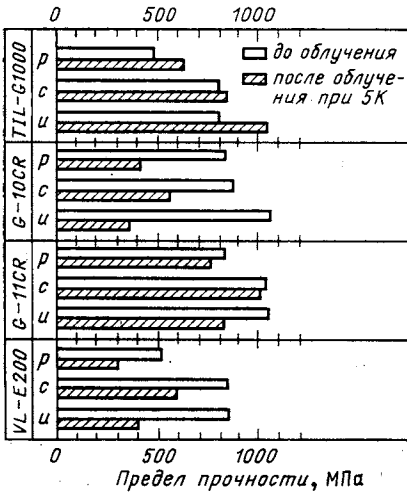


Рис. 4 Действие радиационного облучения ( $1,1 \cdot 10^9$  рад) на механическую прочность при растяжении (р), сжатии (с) и изгибе (и) образцов из стеклопластиков [41]

растяжении, определение ударной прочности по методу Шарпи); 6) определение электрической прочности в жидком гелии; 7) измерение удельного объемного электрического сопротивления, диэлектрической проницаемости и коэффициента диэлектрических потерь ( $\tan \delta$ ) в рабочей среде; 8) испытания на тепловое и электрическое старение (при необходимости); 9) определение удельных теплоемкости и теплопроводности; 10) определение радиационной стойкости в условиях, близких к эксплуатационным. Затем проводятся испытания на образцах 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 пп. 1, 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 температуропроводность и теплопроводность всей конструкции в целом.

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 бисфенольной-А смолы и отвердителя аминного типа с армировкой *E*-стекловолокном на 67 % по объемному содержанию) существенно снизилась. Снижение на 10—30 % отмечалось и для образцов из стеклопластика *G-11CR* (основа, как у *G-10CR*, отверди-

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, мм	Скорость подъема напряжения, кВ/с	Электрическая прочность $E_{пр}^{50}$ , кВ/мм
Образцы <i>VUKI</i> (ЧССР): а) полиэтиленовая пленка КВ-2-11	2×40	1 кВ/с	$E_{пр}^+ = 255$ кВ/мм; $E_{пр}^- = 225$ кВ/мм
	2×40	0,25	121
	1×40	1 кВ/с	$E_{пр}^+ = 400$ кВ/мм
б) полипропиленовая пленка	1×15	—	204
	Образец ВНИИЭИМ (Москва) полипропиленовая пленка		
	1×25	0,7	216
Образцы СКБ СИ (Рига)			
а) ЛСПАРЛ-80	2×110	—	$E_{пр}^- = 100$ кВ/мм
	1×110	—	$E_{пр}^- = 136$ кВ/мм
б) ЛСН-180	1×110	0,7	23
	1×50	0,7	120
в) полиимидная пленка ПМ-С			
г) ниплон	1×25	0,7	112
д) лавсан	1×30	0,7	120
е) ЛСПАИ <sub>2</sub>	1×125	0,7	58,5
ж) ЛСЭ	1×155	0,7	14,2

\* Электроды из нержавеющей стали:  $\varnothing$  25 мм (высоковольтный) —  $\varnothing$  75 мм (земляной).

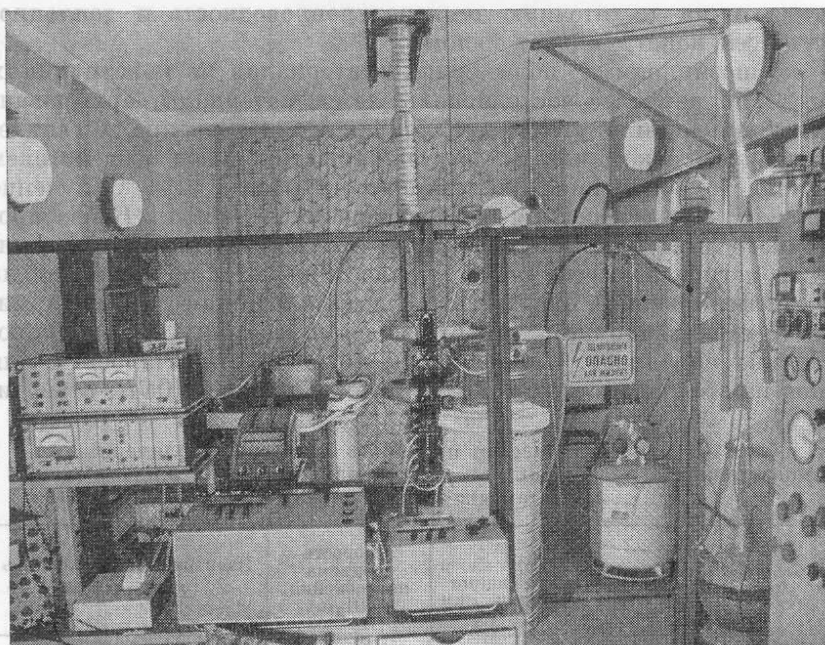


Рис. 5. Высоковольтная установка «Искриз» (ОИЯИ, Дубна) для исследований электрической прочности изоляции в жидком гелии [48]

тель аминного типа несколько иного состава, объемное содержание армировки *E*-стекловолокном 70 %). Стеклопластик VL-E200 на

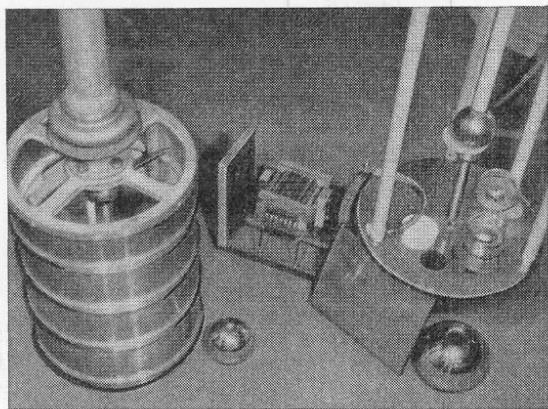
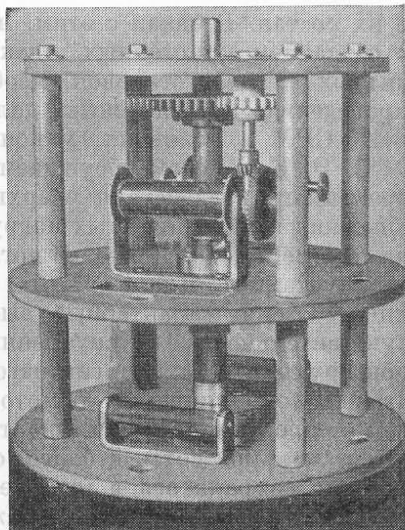


Рис. 6. Высоковольтные испытательные ячейки установки «Искриз» для исследований в жидком гелии электрической прочности барьерной пленочной (слева) и эпоксидной (справа) изоляции [48]

основе циклоалифатической смолы с ангидридным отвердителем и армировкой *E*-стекловолокном показал результаты, близкие к G-10CR. Механические же свойства армированных *E*-стекловолок-

Рис. 7. Высоковольтная испытательная ячейка установки «Искриз» для испытаний в жидком гелии пленочной изоляции на электрическую прочность [48]



ном образцов на полиимидной основе (TIL-G1000) даже улучшились после облучения.

Влияние радиационного облучения при криогенных температурах на материалы и компоненты СПМ подробно освещены также в [46, 47].

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

В табл. 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 г., содержит 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 и листовой электроизоляции на переменном (50 Гц) и постоянном (обеих полярностей) напряжениях до 65 кВ<sub>д</sub> и 80 кВ соответственно. Источники напряжения и измерительная аппаратура изготовлены на заводе *TuR*, г. Дрезден (ГДР). Предусмотрены широкий диапазон скоростей нарастания напряжения (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 MUT-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 до 10 мкс.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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, безопасность и долговечность работы сложных электрофизических установок 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 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 одно-временного воздействия сверхнизких температур и больших механических и радиационных нагрузок (соответственно до 400—600 МПа на сжатие и до  $10^8$  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 замоналичивания обмоток. Для импульсных СПМ-ускорителей — прецизионность и идентичность выполнения многочисленных (до нескольких сотен и более) обмоток, причем эти качества обмоток должны сохраняться в течение нескольких десятков лет эксплуатации с периодическими захолаживаниями и отеплениями.

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

4. Пути дальнейших поисковых работ, направленных на создание надежных СПМ для физики высоких энергий: а) разработка стойких к термоударам компаундов (желательно холодного отверждения) для замоналичивания обмоток; б) повышение качества липких лент, препрегов и выравнивающих полимеризующихся паст; в) разработка вакуумно-плотных, механически и электрически (до  $\sim 5$  кВ) прочных диэлектрических развязок для обмоток из трубчатого сверхпроводника и тоководов; г) увеличение радиационной стойкости ЭИМ и ЭИК обмоток СПМ; д) повышение технологичности создания в целом ЭИК, особенно крупных 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.

6. Перспективы использования СПМ в устройствах физики высоких энергий становятся особенно значительными в связи с недавним открытием эффекта высокотемпературной сверхпроводимости [51, 52, 53]. В настоящее время экспериментально доказано существование сверхпроводимости при температуре жидкого азота. Так,

в [52] сообщается о воспроизводимом переходе в сверхпроводящее состояние образца из металлооксида (керамики)  $Y - Ba - Cu - O$ , наблюдаемом в диапазоне от 80 до 93 К при нормальном давлении. Учитывая современный уровень мировой науки и техники и значимость открытия, можно ожидать получения в ближайшие годы высокотемпературных сверхпроводящих обмоточных материалов. Использование СПМ, работающих при температуре жидкого азота (или хотя бы водорода), может существенно изменить подход к конструированию сверхпроводящих магнитных систем. Однако и в этом случае электрическая изоляция останется важным элементом обмоток СПМ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аксенов В. Г., Донец Е. Д., Зельдович А. Г. и др. Препринт ОИЯИ Р8-8563, Дубна, 1975.
2. Анищенко Н. Г., Безногих Ю. Д., Валевич А. И. и др. Препринт ОИЯИ 9-82-177, Дубна, 1982.
3. CERN COURIER. 1985. Vol. 25, N 2. P. 59—60.
4. The Energy Doubler design study. A progress Report, FN-263, 1.03.1974.
5. Криогенные приборы и устройства в ядерной физике/Н. Н. Агапов, Н. И. Баландиков, В. А. Белушкин и др. М.: Энергоиздат, 1982.
6. CERN COURIER. 1976. Vol. 16, N 12. P. 431—433.
7. Балдин А. М., Василишин Б. В., Дьячков Е. И. и др.//Тр. IV Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. М.: Наука, 1975. Т. II. С. 4—8.
8. Smirnov A. A., Baldin A. M., Donyagin A. M. e.a.//Journ. de Physiq. 1984. Vol. 45. P. C1-279—C1-282.
9. Шелаев И. А., Аверичев С. А., Аксенов В. Г. и др. Препринт ОИЯИ Р9-83-582, Дубна, 1983.
10. Адо Ю. М., Балбеков В. И., Гридасов В. И. и др.//Тр. IV Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. М.: Наука, 1975. Т. I. С. 44—52.
11. Агеев А. И., Александров Г. М., Александров А. Г. и др.//Тр. X Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, ОИЯИ, 1987, т. II, с. 285—290.
12. Wolff S.//Proc. 9th Intern. Conf. on Magn. Technol. Zurich, 1985. P. 62—65.
13. CERN COURIER. 1985. Vol. 25, N 9. P. 383.
14. Horvath J., Vécsey G.//Proc. 9th Intern. Conf. on Magn. Technol., Zurich, 1985. P. 174—177.
15. Desportes H.//Ibid. P. 149—155.
16. Аверичев С. А., Аверичев Г. С., Анищенко Н. Г. и др. Препринт ОИЯИ Р1-85-512, Дубна, 1985.
17. Шишов Ю. А.//Тр. Рабочего совещания по программе экспериментов на встречных пучках. Дубна, ОИЯИ, Д1-83-541, 1983. С. 116—126.
18. Iwasa Y.//Cryogenics. 1985. Vol. 25, N 6. P. 304—306.
19. Yamada T.//IEEE Trans. on Magnetics. 1981. Vol. Mag.-17, N 5. P. 1799—1802.
20. Анищенко Н. Г., Минени В. Ф. Препринт ОИЯИ Р8-6987, 1973; ПТЭ. 1973. Т. 6. С. 176—179; Cryogenics. 1974. Vol. 14, N 7. P. 409—410.
21. Wake M., Sakuda M., Matsui T. e.a.//Proc. 9th Intern. Conf. on Magn. Technol., Zurich. 1985. P. 178—181.
22. Koizumi K., Yoshida K., Tada E. e.a.//Adv. in Cryog. Eng. N.Y., Plenum Press, 1982. Vol. 28. P. 223—230.
23. Вигли Д. А. Механические свойства материалов при низких температурах: Пер. с англ. М.: Мир, 1974.

24. Брехна Г. Сверхпроводящие магнитные системы: Пер. с англ. М.: Мир. 1976.
25. Hartwig G., Knaak S.//Cryogenics. 1984. Vol. 24, N 11. P. 639—647.
26. Справочник по физико-техническим основам криогеники/М. П. Малков, И. Б. Данилов, А. Г. Зельдович и др. М.: Энергоатомиздат, 1985.
27. Фастовский В. Г., Петровский Ю. В., Ровинский А. Е. Криогенная техника. М.: Энергия, 1967.
28. Kasen M. B., MacDonald G. R., Beekman D. H. e.a.//Adv. in Cryog. Eng. 1980. Vol. 26. P. 235—244.
29. Eickett F. R.//Proc. 5th Intern. Conf. on Magn. Technol., Rome, 1975. P. 659—678.
30. Аверченко В. П., Покровский К. К., Сахновский З. Л. и др.//Производство и переработка синтетических смол и пластических масс. М.: НИИПМ, 1977. № 3. С. 11—17.
31. Liptak G., Schuler R., Maier P. e.a. Report CERN 85-02, 1985.
32. Tsuchiya K., Kurokawa S., Mito T. e.a.//Nucl. Instrum. and Methods. 1983. Vol. 206. P. 57—65.
33. Daum C.//Proc. 8th Intern. Conf. on Magn. Technol., Grenoble, 1983. P. C1-267—C1-270.
34. Fast R., Grimson J., Kephart R. e. a. Design Report for an Indirectly Cooled 3-m diameter S.C. solenoid for the Fermilab Collider Detector Facility (CDF). TM-1135, 1982. P. 48.
35. Пономарев Л. Т., Богоявленский О. С.//Тр. II Всесоюзной конференции по технической сверхпроводимости. Ленинград: ЛНИВЦ, 1984. Т. I. С. 325—328.
36. Анищенко Н. Г., Долбилова Г. И., Шишов Ю. А. Препринт ОИЯИ 9-10107, Дубна, 1976.
37. Kasen M.//Cryogenics. 1981. Vol. 21, N 6. P. 323—340.
38. Billan J. Preprint CERN ISR-LTD/76-15, 1976.
39. Middleton A. J., Hey P. D., Colyer V. Preprint RHEL/R-265, 1972.
40. Takamura S., Kato T.//Cryogenics. 1980. Vol. 20, N 8. P. 441.
41. Takamura S., Kato T.//Adv. in Cryog. Eng. N.Y.: Plenum Press, 1984. Vol. 30. P. 41—49.
42. Evans D., Morgan J. T., Stapleton G. V. Preprint RHEL/R-251, 1972.
43. Мивеин В. Ф., Анищенко Н. Г.//ЖТФ. 1976. № 11. С. 2432—2435.
44. Reed R. P., Schramm R. E., Clark A. F.//Cryogenics. 1973. Vol. 13, N 2. P. 67—82.
45. Hartwig G.//Adv. in Cryog. Eng. N.Y.: Plenum Press, 1982. Vol. 28. P. 179—189.
46. Coltman R. R., Klabunde C. E., Kernohan C. J. e.a. Annual Progress Report, ORNL/TM-7077, 1979.
47. Чураков Г. Ф., Скорняков Ю. А., Степанов А. Н. и др.//Электрофизическая аппаратура. М.: Атомиздат, 1981. Вып. 18. С. 46—56.
48. Анищенко Н. Г., Степанов А. Н., Шишов Ю. А. Электрическая изоляция сверхпроводящих магнитов электрофизических и энергетических установок. Рига: ЛатНИИТИ, 1982.
49. Анищенко Н. Г., Яворский Э. Препринт ОИЯИ P8-7663, Дубна, ОИЯИ, 1974.
50. Анищенко Н. Г., Волков В. Я., Халлер Р. и др. Препринт ОИЯИ 8-82-172, Дубна, 1982.
51. Chu C. W., Hor P. H., Meng R. L. e. a.//Science. 1987. Vol. 235. P. 567—569.
52. Wu M. K., Ashburn J. R., Torng C. J. e.a.//Phys. Rev. Lett. 1987. Vol. 58 N 9. P. 908—910.
53. Моцалков В. В. Высокотемпературные сверхпроводники. М.: Знание, 1987.