

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА



7663

ЭКЗ. ЧИТ. ЗАЛА

P8 - 7663

Н.Г.Анищенко, Э.Яворский

ВЫБОР ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
ДЛЯ КРИОГЕННЫХ
И СВЕРХПРОВОДЯЩИХ УСТРОЙСТВ
И ИССЛЕДОВАНИЯ ИХ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

1974

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

P8 - 7663

Н.Г.Анищенко, Э.Яворский*

ВЫБОР ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
ДЛЯ КРИОГЕННЫХ
И СВЕРХПРОВОДЯЩИХ УСТРОЙСТВ
И ИССЛЕДОВАНИЯ ИХ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

ОИЯИ
БИБЛИОТЕКА

* VUKI - Научно-исследовательский институт
кабелей и изоляционных материалов, г.Братислава,
ЧССР.

Summary

A number of papers /1-5, 11-13/ are devoted to investigations of electroinsulating materials operating under cryogenic conditions. However, in technical publications there is no common approach to the selection of electroinsulating materials for superconducting devices, and the obtained results are different to a great extent. That is why in this paper we have proposed the methods of research used in the division of physical investigations of VUKI (Bratislava, Czechoslovakia) and cryogenic division of JINR (Dubna, USSR). The proposed consistency of testing dielectrics in cryogenic conditions, on their molecular level as well, allows not only the selection but also the development of new electroinsulating materials for cryogenic technique. Short static tests (according to item 1-5) make it possible to obtain fast enough the information about the mechanical properties of materials under cryogenic conditions. These tests are the following: 1) heat stroke by liquid nitrogen; 2) determination of frost-resistant and glass temperatures; 3) determination of the so-called thermomechanical graphs /14/; 4) determination of static mechanical properties, and 5) determination of the coefficient of thermal linear expansion. Some results of these investigations are presented in figs. 4, 5, 6, 7 and Table II. In particular, it is noted that the problem of the superposition of polymers and metals under cryogenic conditions arises and the knowledge about thermal expansions are extremely important for the epoxy compounds used for impregnating the winding of superconducting solenoids /22-24/. The dynamic mechanical properties of the materials under cryogenic conditions (item 6) are determined when measuring the dynamic elasticity modulus or dynamic percussion properties (figs. 8, 9a, 9b). Electrical investigations of the materials under cryogenic conditions conclude the determination of their short- (item 7 - Tables I, III and fig. 10) and long-term (item 8 - fig. 11) electrical strength, ρ_v (item 9 - fig. 1), ϵ (item 10 - fig. 3) and $\operatorname{tg} \delta$ (item 11 - fig. 2). The dielectrics selected according to the experimental results (items 1-11) are subjected to thermal ageing (item 12), and then their specific heat (item 13) and thermal conductivity (item 14) are determined. The authors of this paper recommend to apply some dielectrics as electric insulation of superconducting devices.

Исследованиям физических свойств электроизоляционных материалов при криогенных температурах посвящен ряд работ, например, /1-5, 11-13/. Однако, ввиду большой 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. К тому же исследованы лишь отдельные свойства диэлектриков, а общий подход к выбору электроизоляционных материалов, пригодных к применению в сверхпроводящих устройствах, в литературе отсутствует. В данной работе на основании опыта, приобретенного в отделе физических измерений VUKI /г. Братислава, ЧССР/ /14, 15/ и криогенном отделе ЛВЭ ОИЯИ /16, 17, 25/, предлагается методика испытаний и общий подход к выбору диэлектриков для применения в криогенных и сверхпроводящих устройствах.

Кроме основного своего назначения - служить электрической изоляцией, диэлектрики могут применяться и в качестве конструкционных, заливочных и пропиточных материалов при создании криогенных и сверхпроводящих систем /каркасы, подвески, неметаллические криостаты, закрепление витков обмоток/. В этих случаях неудачный выбор материала диэлектрика может привести либо к нарушению расчетной однородности поля, либо к большим механическим напряжениям в сверхпроводящей обмотке, что может значительно снизить ее критический ток.

Можно назвать также и некоторые другие случаи применения полимеров в криогенных условиях, - например, криогенные мишени в ядерной физике /18, 19/.

Специфика работы диэлектриков в криогенных условиях весьма многообразна. Разность температурных усадок полимеров и металлов при охлаждении от комнатной до гелиевой температуры обычно составляет 0,7-2,3%, что сравнимо с величиной деформаций при разрыве этих диэлектриков при криогенных температурах, т.е. возникает проблема совмещаемости полимеров и металлических элементов конструкций /5/; у полимеров при температуре жидкого азота /по сравнению с комнатной/, например, относительное удлинение при растяжении до разрыва снижается в 50÷100 и более раз /13/; эти материалы теряют гибкость, становятся хрупкими, а некоторые вообще разрушаются; значительно меняются при глубоком охлаждении и диэлектрические и тепловые свойства электроизоляционных материалов /3,4/. Температурная зависимость некоторых физических параметров электроизоляционных материалов приведена на рис. 1, 2 /14/, 3 /15/ и 4 /21/.

Электрическая прочность самих криогенных жидкостей и газов, в среде которых работает электрическая изоляция рассматриваемых устройств, приведена в табл. 1 и на рис. 10 /9/.

Предлагается выбирать электроизоляционные материалы для применения в криогенных условиях по результатам испытаний, порядок и методика проведения которых указаны ниже /п.п. 1 ÷ 14/.

Только после этих испытаний рекомендуется проводить модельные испытания на электрическую и механическую прочность электроизоляционных конструкций реальных криогенных и сверхпроводящих устройств.

Такой подход к выбору электроизоляционных материалов, включающий и представление о свойствах последних на уровне их молекулярной структуры, позволяет и создавать новые материалы с заранее заданными свойствами, специально предназначенные для криогенной техники.

1. Испытания на тепловой удар производятся однократным резким погружением образца в жидкий азот с последующей проверкой под микроскопом на отсутствие

Электрическая прочность холодных и теплых газообразных и жидких азота, водорода и гелия при давлении 1 атм. (промежуток 1 мм)

	азот		водород		гелий		воздух	трансформаторное масло
температура [°К]	293	77	293	20	293	4,4	293	293
электрическая прочность газа /кВ/ 18 скваж.-испытаний информации	4,8	20	2,5	22	0,8	19	4,5	—
электрическая прочность жидкости (электроды шор-шор ф 6,25 мм 50 гс) /кВ макс/ 18 скваж.-испытаний информации	40,5		39,5		31,5 ÷ 25,5		—	42,5
	/9/		/9/		/10/ /9/			/9/

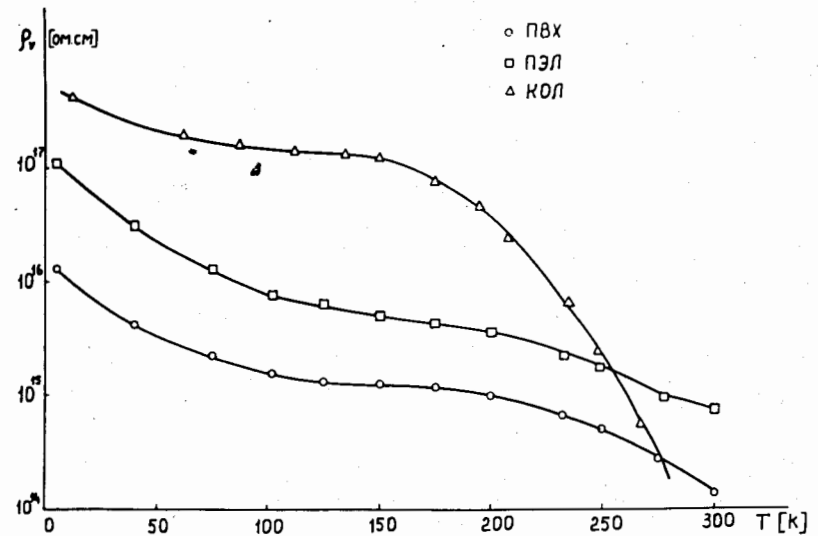


Рис. 1. Температурная зависимость удельного объемного сопротивления для поливинилхлорида /ПВХ/, полиэфирного /ПЭЛ/ и кремнийорганического /КОЛ/ лаков.

трещин. Иногда применяется цикл жидкий азот - горячая вода. Основанием для дальнейших испытаний данного материала является безусловное отсутствие микротрещин.

2. Температуры стеклования (T_C), морозостойкости (T_M) и эластичности (T_E) определяются из графика температурной зависимости удельной работы, затрачиваемой на определенный вид деформации образца материала. Такие кривые получают, например, на эргометрах либо изгибая /на 180° / образец /ленту длиной 50 мм/ вокруг металлического профиля определенного сечения, либо протягивая образец /длиной 100 мм/ в виде петли через узкую щель /рис. 5/. Образец помещен в криостат, в котором можно поддерживать неизменной любую температуру вплоть до температуры жидкого азота. В испытаниях,

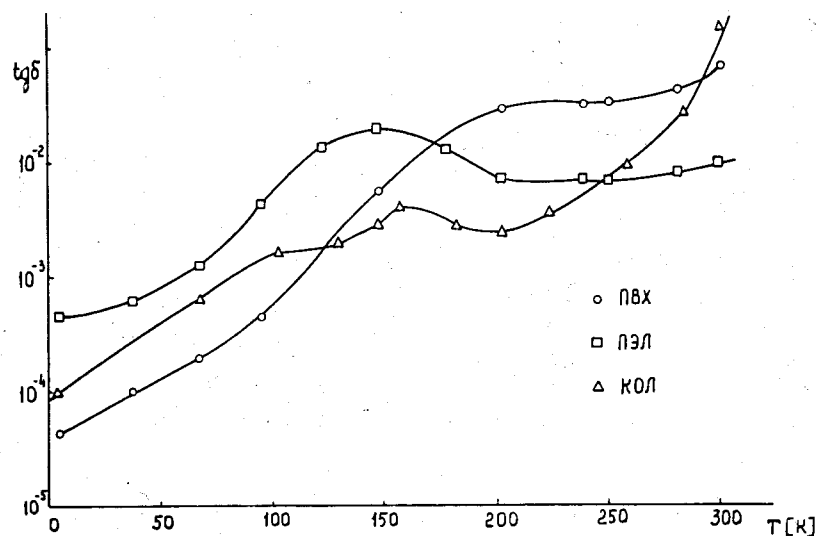


Рис. 2. Температурная зависимость тангенса угла диэлектрических потерь для поливинилхлорида /ПВХ/, полиэфирного /ПЭЛ/ и кремнийорганического /КОЛ/ лаков. Измерено при 50 Гц.

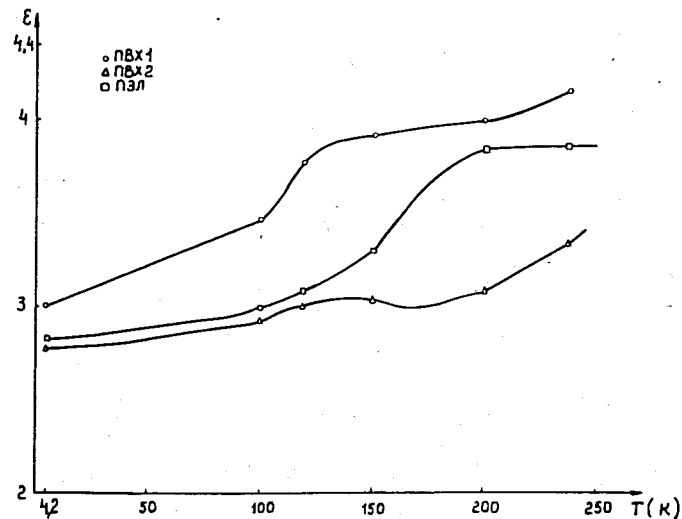


Рис. 3. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости для полиэфирного лака /ПЭЛ/ и различных видов поливинилхлорида /ПВХ/. Измерено при 50 Гц.

проводимых в ВУКИ, обычно принимались: толщина испытуемых образцов $0,01 \div 3$ мм, ширина 10 мм, ширина щели в 3 раза больше толщины испытуемого образца. При температурах ниже T_M /определяется по максимуму измеренной удельной работы/ на поверхности материала появляются мелкие трещинки, что контролируется под микроскопом. При температуре T_C образец при испытаниях трескается полностью. Сечения металлических профилей, вокруг которых изгибается образец, могут иметь прямоугольную, полукруглую или круглую формы. Значения T_C , T_M , T_E , величины которых затем контролируются в рядом последующих испытаний /см. п.п. 3,6/, позволяют правильно выбрать диапазон рабочих температур для данного материала.

3. Термомеханическая кривая /ТК/ определяет изменение деформации материала при неизменном усилии и равномерно повышающейся температуре /например,

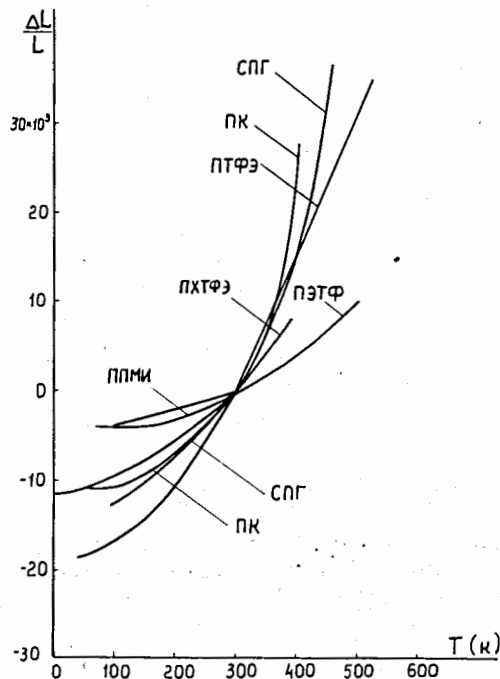


Рис. 4. Линейное температурное расширение /сжатие/ полимеров по сравнению с комнатной температурой: ПТФЭ - политетрафторэтилен /тефлон/; СПГ - сополимер ПТФЭ с гексафторпропиленом / FEP - тефлон/; ПХТФЭ - полихлортрифторэтилен; ПЭТФ - полиэтилентерефталат /майлар/; ППМИ - полипиромелитимид; ППК - полипараксилилен; ПК - поликарбонат.

со скоростью $1^\circ \text{C}/\text{мин}$. Для термопластичных материалов применяется метод проникновения иглы /сечением $1 \div 3 \text{ мм}^2$ / в центр образца толщиной $1 \div 3 \text{ мм}$ в виде диска диаметром 20 мм , для терморезистивных - чаще метод изгиба образцов длиной 20 мм и толщиной $0,1 \div 3 \text{ мм}$ от поперечной нагрузки, прикладываемой к середине образца. Температура образца в криостате при испытаниях повышается с равномерной скоростью /выбирается от $0,1$ до $10^\circ \text{C}/\text{мин}$ - в зависимости от теплопроводности/. Характер ТК в общем виде показан

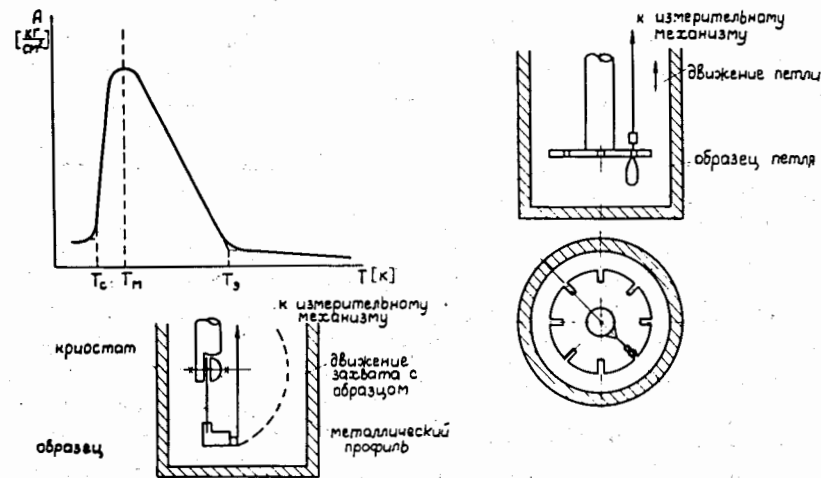


Рис. 5. Определение температур стеклования (T_C), морозостойкости (T_M) и эластичности (T_Z) с помощью эргометра.

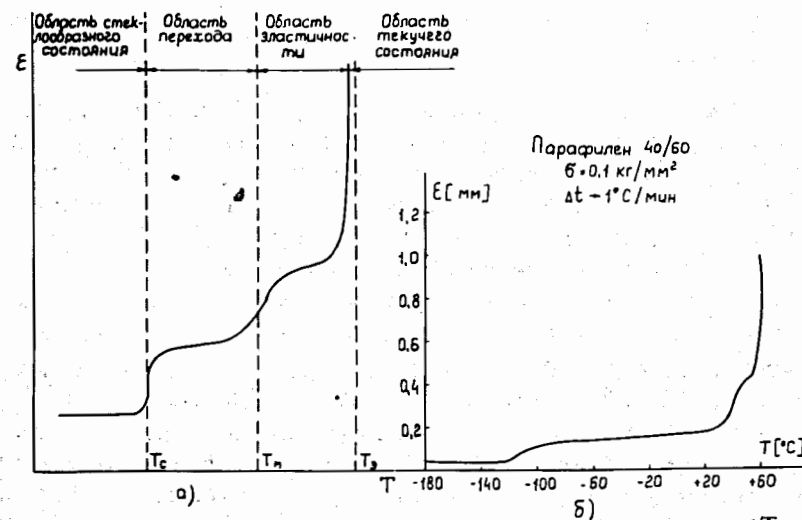


Рис. 6. Общий вид /а/ термомеханической кривой / T_C - температура стеклования, T_M - температура морозостойкости; T_Z - температура эластичности/. Термомеханическая кривая /б/ для парафина 40/60 при удельном давлении иглы $0,1 \text{ кг}/\text{мм}^2$ и скорости подъема температуры $1^\circ \text{C}/\text{мин}$.

на рис. 6а, пример реальной ТК для парафина 40/60 /40% полиэтилена, 60% - парафина/ приведен на рис. 6б¹⁴. Назначение данного вида испытаний - аналогично указанному в п. 2.

4. Для исследования статических механических свойств материалов применяются разрывные машины, снабженные криостатами для жидких газов. Испытываются прочность материалов и их относительное удлинение при изгибе и растяжении. Скорость деформации при испытаниях на растяжении целесообразно принимать равной 1; 2 или 5 мм/мин. Результаты таких испытаний на разрывной машине ZWICK /ФРГ/ / $P_{\text{макс}} = 5000$ кг/ для некоторых пленочных диэлектриков и кабельной бумаги советского производства /фторопласт 0,025 мм, лавсан 0,01 и 0,05 мм, бумага типа КВ-120/ и мелинекса /толщиной 0,1 мм/ английского производства приведены в табл. II. Аналогичные данные для других полимеров в широком температурном диапазоне приведены в^{13, 21}. Критерии для выбора материалов по этому виду испытаний связаны с расчетами конкретной конструкции устройства.

5. Аппаратура, применяемая в ВУКИ для определения температурной усадки материалов, аналогична используемой при снятии термомеханических кривых /см. п. 3/. При непрерывном снятии кривой $\Delta l/l = f(T)$ на самописец скорость изменения температуры /в зависимости от теплопроводности образца/ выбирается в пределах от 0,1 до 10 °С/мин. Причем, может измеряться как усадка /при снижении температуры от 300 К/, так и удлинение предварительно охлажденных образцов /при их нагреве/. В последнем случае необходимо предварительно создать дополнительный натяг образца силой 5 г. Знание температурной усадки особенно важно для эпоксидных компаундов, предназначенных для пропитки обмоток сверхпроводящих соленоидов /22,23,24/. Необходимым для нормальной работы соленоидов в этих случаях условием является равенство интегральных термических усадок при охлаждении до 4,2 К эпоксидного компаунда и металла обмотки. Из данных¹³ следует, что некоторые составы наполненных эпоксидных компаундов

типа Stycast; например, обладают таким качеством. Поскольку основная термическая усадка полимеров происходит при охлаждении до 77 К /90% от полной, т.е. при охлаждении до 4,2 К/, то вполне достаточным является определение интегральной усадки при охлаждении в жидком азоте. Результаты таких измерений, проведенных в ОИЯИ, для эпоксидных компаундов на основе смолы ЭД-5 /с 10% добавкой низкомолекулярной алифатической смолы ДЭГ-1/ в зависимости от концентрации различных наполнителей представлены на рис. 7. Для сравнения: интегральная термическая усадка

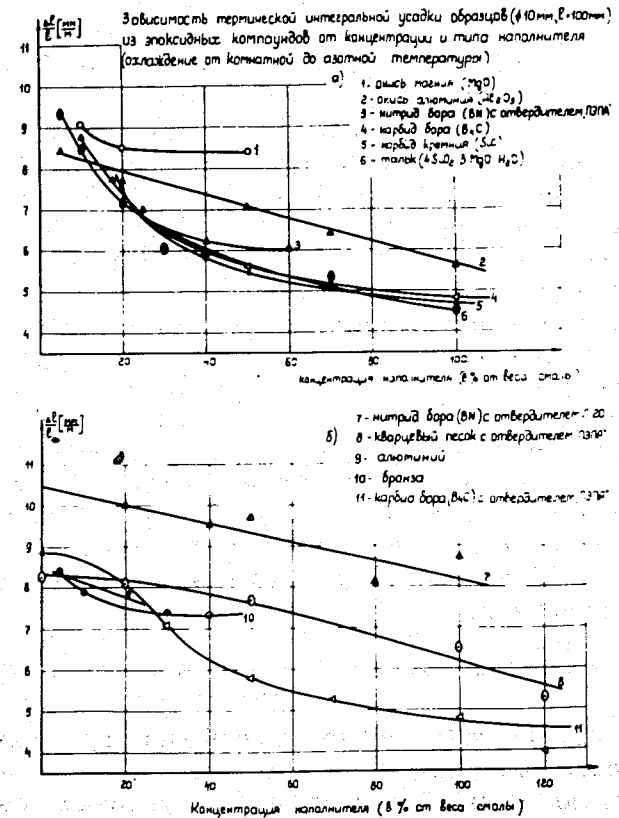


Рис. 7. Зависимость термической интегральной усадки образцов / $\phi 10$ мм, длина 100 мм/ из эпоксидных компаундов от концентрации и типа наполнителя /при охлаждении от комнатной до азотной температуры/.

при охлаждении до азотной температуры составляет для меди и стали X18H10T ~ 3,2 мм/м, для алюминия - 4,1 мм/м.

Кратковременные статические испытания по п.п. 1-5 позволяют достаточно быстро получить информацию о механических свойствах материалов и составить определенное мнение о применимости данного диэлектрика в криогенных условиях. Однако перед рекомендацией к широкому практическому использованию данного материала при низких температурах необходимы более тщательные и глубокие исследования свойств на уровне молекулярной структуры этих материалов. При таких исследованиях испытываются динамические механические и диэлектрические свойства материалов. Движение частей молекул /например, боковых цепей полимеров/ отражается как на диэлектрических свойствах материалов в переменном электрическом поле, так и на механических - при переменной нагрузке. Хаотическое температурное движение этих частей при наложении механического или электрического поля становится более определенным и направленным. Эти частицы молекул могут переходить скачком из одного в другое равновесное состояние, что и может быть зафиксировано и измерено при испытаниях динамических механических и диэлектрических свойств материалов. Причем, если в электрическом поле можно, как правило, измерить эти скачки только в материалах, молекулы которых обладают отличным от нуля дипольным моментом, то в "механическом поле" такие движения можно наблюдать и при нулевом значении этого момента.

6. Динамические механические свойства материалов

определяются либо при измерении динамических модулей упругости при кручении /G-модуль/ или растяжении /E-модуль/, либо динамических ударных свойств по методу Шарпи. В первом случае к образцу с помощью инерционного диска прикладывается импульсно момент кручения, и на самописце фиксируется затухание вращательных колебаний образца с помощью индуктивного

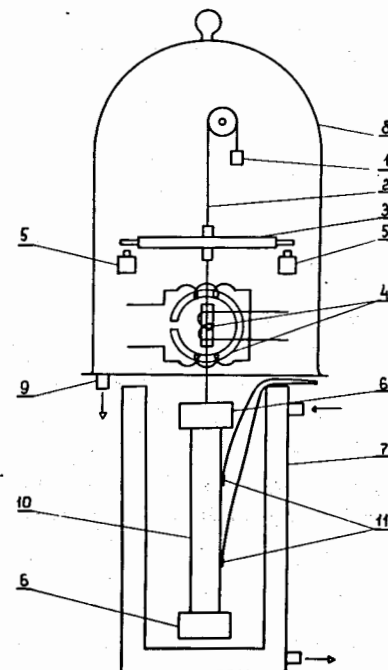


Рис. 8. Принципиальная схема прибора для измерения G-модуля /1 - противовес; 2 - нить; 3 - инерционный диск; 4 - индукционный датчик; 5 - магниты; 6 - верхний /подвижный/ и нижний /неподвижный/ захваты; 7 - криостат; 8 - вакуумный колокол; 9 - откачной вентиль; 10 - образец; 11 - термопары/.

датчика. Принципиальная схема прибора представлена на рис. 8 /назначение отдельных позиций ясно из чертежа, следует отметить только индукционный датчик 4 и магниты 5, создающие, взаимодействуя с инерционным диском 3, момент кручения, передаваемый через нить 2 образцу 10/. Измерения G-модуля на таком приборе производятся в области частот 0,05-10 Гц. По записанным на самописце колебаниям измеряется частота и логарифмический декремент их затухания Λ , а затем расчетным путем определяется G-модуль. На рис. 9а показан типичный вид кривых G-модуля и Λ и соответствующие им кривые - снятая на эргометре и термомеханическая /все кривые - для одного условного материала/.

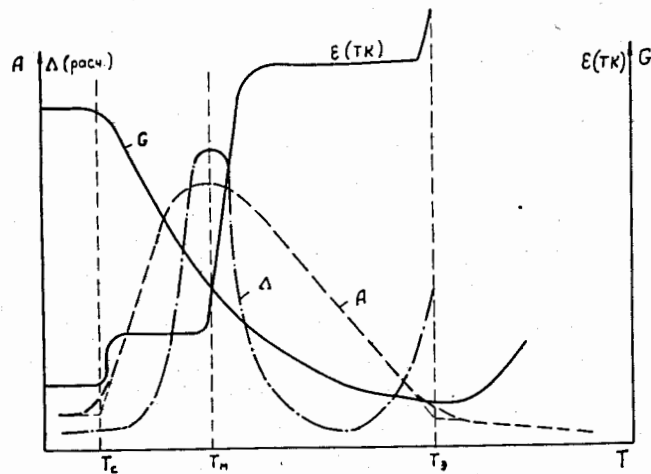


Рис. 9а. Общий вид кривых G-модуля, Δ, термомеханической и снятой на эргометре - в зависимости от температуры.

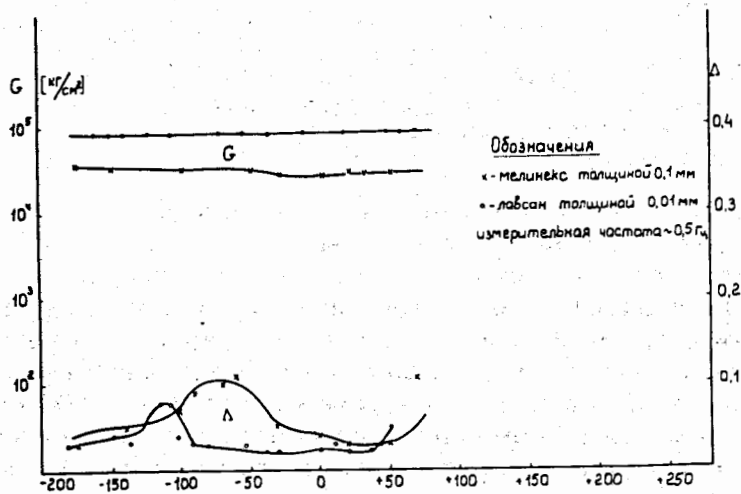


Рис. 9б. Кривые G-модуля и Δ в функции температуры для советского лавсана толщиной 10 мкм и английского мелинекса толщиной 100 мкм.

ла/. Видно, что значения T_C , T_M , T_g взаимно контролируются при снятии всех этих кривых. На рис. 9б приведены реальные кривые G-модуля и Δ для советского лавсана толщиной 10 мкм и английского мелинекса толщиной 100 мкм.

Предпочтительными для применения в криогенной технике являются материалы с незначительными и плавными изменениями в кривой $G=f(T)$ в области рабочих криотемператур: скачки в кривой $G=f(T)$ соответствуют пикам в кривой $\Delta \equiv \text{tg } \delta_{\text{мех}}$, что характеризует дополнительные тепловые потери в материале.

7. Исследования электрических свойств материала начинаются с определения его электрической прочности в различных криогенных средах или вакууме при низкой температуре /в зависимости от рабочих условий/. Можно применять те же электродные системы, которые обычно используют при нормальных температурах: диск /φ 25 мм/ - диск /φ 50 мм или φ 75 мм/; шар-шар /φ 20 мм/; игла /R закругления = 1 мм/ - плоскость. Описание установки криогенного отдела ОИЯИ для определения

Таблица II

Результаты испытаний статических механических свойств пленок фторопласта, лавсана (0,01 и 0,05 мм) и кабельной бумаги советского производства (а также мелинекса (0,1 мм) английского производства (ширина образцов 15 мм))

материал толщина [мм]	Температура испытаний [К]	Разрывная сила	Прочность при разрыве	Относительное удлинение при разрыве [%]
		[кг]	[кг/мм²]	
		среднее значение из пяти измерений		
фторопласт 0,025	296	1,44	3,86	138
	77	4,42	12	2,28
лавсан 0,01	296	2,06	13,8	169
	77	2,87	19,1	6
лавсан 0,05	296	14	19,8	131
	77	17,4	23,2	4,25
кабельная бумага 0,135	296	16,3	8,15	5,6
	77	15,9	7,9	1,44
мелинекс 0,1	296	29,7	19,7	103
	77	37,8	25,0	4,86

Таблица III

Влияние скорости подъема напряжения, среды, формы напряжения на кратковременную прочность слоистой изоляции.

материал	$E_{аз \sim ж N_2}$	$E_{ж N_2 \sim аз}$	$E_{аз \sim ж N_2}$	$E_{ж N_2 \sim аз}$
	$E_{25 \sim ж N_2}$	$E_{воздух \sim аз}$	$E_{аз \sim ж N_2}$	$E_{воздух \sim аз}$
ПИ 40 мкм x 1	$\frac{250}{310} = 0,8$	$\frac{250}{250} = 1,0$	$\frac{335}{250} = 1,3$	$\frac{335}{410} = 0,8$
ПЭТФ 10 мкм x 2	$\frac{235}{325} = 0,7$ 0,6*	$\frac{235}{275} = 0,8$ 0,9*	$\frac{400}{235} = 1,7$ 2*	$\frac{400}{370} = 1,1$ 1,3*
ПТФЭ 20 мкм x 1	$\frac{280}{290} = 0,9$	$\frac{280}{390} = 0,7$	$\frac{445}{280} = 1,6$	$\frac{445}{630} = 0,7$
КВ 90 мкм x 1	$\frac{90}{90} = 1,0$	$\frac{90}{17} = 5,4$	$\frac{175}{90} = 1,9$	$\frac{175}{20} = 8,6$

$E_{аз \sim ж N_2}$ - пробивная напряженность при скорости подъема аз кв/сек, 50 Гц, в жидком азоте, кв макс/мм.

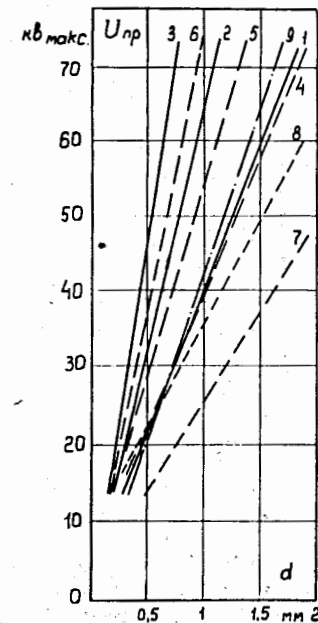
$E_{воздух \sim аз}$ - пробивная напряженность в воздухе при напряжении постоянного тока, скорость подъема напряжения 0,3 кв/сек, кв/мм.

* - средой являлся жидкий гелий, а не жидкий азот.

электрической прочности материалов и различных электроизоляционных конструкций в жидких азоте и гелии приведено в¹⁶. Основные части установки / $U_{ном} = 65$ кв дей. / - металлический криостат ϕ 300 мм и источники постоянного и переменного напряжения до 90 кв. Там же приведены данные по электрической прочности некоторых пленочных материалов в различных криогенных средах. Например, при переменном напряжении 50 Гц прочность двух слоев советского лавсана толщиной по 10 мкм в среде жидких и газообразных азота и гелия составила 240 ± 80 кв макс/мм. При испытаниях напряжением постоянного тока - 460 ± 90 кв/мм. При проведении этих исследований следует особое внимание обращать на одинаковость удельного давления электродов на обра-

зец /рекомендуется 100 г/см²/ во время всей серии измерений.

В табл. III отражены полученные в ОИЯИ результаты исследований по влиянию вида испытательного напряжения и скорости его подъема на электрическую прочность в криогенных условиях полиимидной /ПИ/, лавсановой /ПЭТФ/ и фторопластовой /ПТФЭ/ пленок и кабельной бумаги /КВ/ советского производства. Полученные данные в принципе можно объяснить действием частичных разрядов /ЧР/, с наличием которых связывают механизм пробоя диэлектриков /16,17,20/. ЧР при испытаниях твердой изоляции в среде криогенных жидкостей или газов могут возникать как вследствие меньшей электрической прочности криогенных сред /по сравнению



	№ зависимости		
	1 бар.	3 бар.	5 бар.
азот	1	2	3
водород	4	5	6
гелий	7	8	
трансформаторное масло	9	-	-

Шар-шар ϕ 62,5 мм, 50 гц.
[л9]

Рис. 10. Электрическая прочность сжиженных газов в зависимости от расстояния между электродами и давления.

с твердой изоляцией/, так и из-за неравномерного распределения напряжения между компонентами такой слоистой изоляции. Именно воздействие ЧР на изоляцию приводит к ее электрическому старению.

8. Электрическое старение под напряжением в криогенных условиях проводится с целью определения допустимого уровня напряженности электрического поля при заданном сроке службы исследуемого материала. Результаты таких исследований в криогенных условиях для лавсановой и фторопластовой пленок советского производства приведены на рис. 11^{/25/}

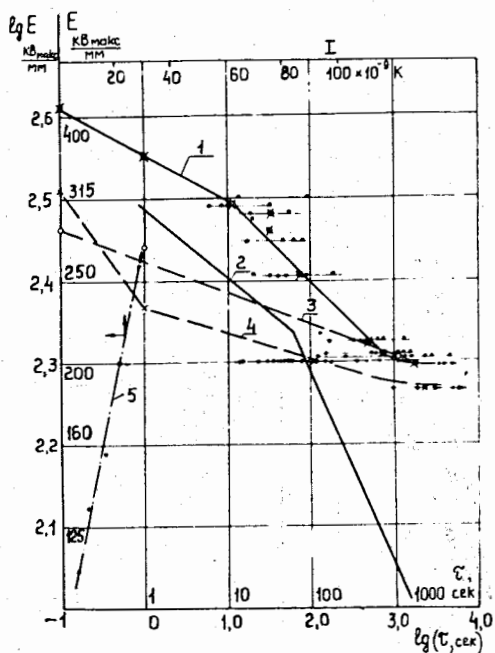


Рис. 11. Зависимость срока службы (τ) от напряженности электрического поля пленок лавсана /кривые 1,2,4/ и фторопласта /3/ в жидких гелии /1/, азоте /3,4/ и воздухе /2//20/ при комнатной температуре; электроды /для 1,3,4/ - плоские диски. Напряжение 50 Гц. Кривая 5 - кажущаяся интенсивность частичных разрядов /1/ в жидком гелии /в Кулонах/.

9. Основные трудности при измерении в криогенных условиях удельного объемного сопротивления (ρ_V) материалов связаны с весьма высокими /по чувствительности/ требованиями к измерительным приборам, т.к. значения ρ_V при температуре жидкого гелия возрастают до $10^{17} \div 10^{19}$ ом.см. В ВУКИ, как правило, применяется трехэлектродная система напыленных в вакууме золотых электродов. Результаты измерений $\rho_V = f(T)$ для образцов поливинилхлорида, полиэфирного и кремнийорганического лаков были приведены выше на рис. 1^{/15/}.

10 и 11. Измерения диэлектрической проницаемости (ϵ) и коэффициента диэлектрических потерь ($\text{tg}\delta$) материалов в криогенных условиях требуют особой тщательности /учет термической усадки образцов, всемерное снижение теплопритока к охлажденным образцам/ и повышенной чувствительности измерительных приборов /например, до $1 \cdot 10^{-6}$ при измерении $\text{tg}\delta$ /. Некоторые результаты измерений / $f=50$ Гц; $U_{\text{дисп}} = 100 \div 500$ В/ также были приведены выше на рис. 2 и 3.

Известно, что величина потерь в диэлектрике, находящемся в переменном электрическом поле, зависит от структуры материала. неполярные диэлектрики, для которых характерна только электронная и атомная поляризации, обладают сравнительно низкими диэлектрической проницаемостью и коэффициентом потерь / $\sim 1 \cdot 10^{-4}$ при нормальной температуре/. Кривая $\text{tg}\delta = f(T)$ для них, как правило, имеет один максимум в области T_c . Полярные же диэлектрики, которым свойственны и другие виды поляризации, отличаются тем, что эта зависимость для них может иметь несколько максимумов. Однако, ниже T_c характер кривых $\text{tg}\delta = f(T)$ для полярных и неполярных диэлектриков одинаков.

Знание температурной зависимости $\text{tg}\delta$ позволяет, с одной стороны, определить для данного материала область рабочих криогенных температур с наименьшими диэлектрическими потерями, а с другой - оценить в данных температурных условиях величину тепловыделений в электрической изоляции. Такая оценка для высоковольтных сверхпроводящих устройств переменного тока необходима. Уместно здесь напомнить об очень низкой

теплоемкости как самого жидкого гелия /15 дж/моль.град/^{126/}, так и металлов обмотки и конструкции устройств при гелиевых температурах /для меди, например, при 20 К С= 0,0245 ккал/кг.град/.

12. Материалы, отобранные по результатам испытаний 1÷11, подвергаются тепловому старению:

а/ при продолжительной выдержке в жидком азоте /или гелии/;

б/ при циклах "жидкий азот - воздух" /или " жидкий азот - горячая вода"/;

в/ при циклах, как в п. б/ и одновременном наложении механического напряжения;

г/ то же, что и в п. в/, но в электрическом поле.

Выбор одного из этих способов испытаний связан с необходимостью промоделировать тепловые режимы реальных устройств. Во время старения /между циклами/ проводятся повторные испытания свойств материалов по п.п. 2,3 или 4 /в зависимости от материала/. В случае резких изменений результатов этих промежуточных испытаний по сравнению с первоначальными проводятся также испытания по п.п. 6,9,10,11. При незначительных отличиях последние испытания повторяются только после полного окончания циклов.

Естественно, положительным показателем для данного материала является незначительная разница результатов испытаний до и после теплового старения. По данным /13/ предел прочности на разрыв некоторых полимеров /полиамида, например/ снижался после 6-недельной выдержки в жидком азоте на 30%. Циклическое же тепловое старение /2-минутные циклы 300 К-77К/ полиамида приводило к снижению этого параметра /после 400 циклов/ на 41%.

13 и 14. Для непосредственного конструирования криогенных устройств с применением выбранных изоляционных материалов необходимо знать результаты испытаний их удельных теплоемкости и теплопроводности. Основная методика этих испытаний - калориметрический метод. Температурные зависимости этих параметров для некоторых полимеров приведены, например, в /13,21/.

По указанным выше методикам в ВУКИ и ОИЯИ проведены исследования целого ряда различных диэлектриков, из которых для применения в криогенных условиях можно рекомендовать, например, следующие:

а/ пленочные материалы - лавсан, фторопласт, полиимид;

б/ лаки полиимидный и полиэфирный;

в/ заливочные и пропиточные материалы - парафилен /производства ЧССР/, эпоксидные компаунды, например, на основе смолы ЭД-5 с наполнителем тальк-кварцевый песок или нитрид бора;

г/ конструкционные материалы - стеклотекстолит на специальных кремнийорганических смолах, полипропилен-оксид, специально обработанный в реакторе γ -лучами.

ВЫВОДЫ

1/ Выбор новых электроизоляционных материалов для криогенной и сверхпроводящей техники может быть осуществлен только по результатам многочисленных и довольно сложных испытаний на дорогостоящем оборудовании.

2/ В данной работе приведены методики и последовательность проведения таких испытаний, включающих и исследования свойств материалов на уровне их молекулярной структуры.

3/ Сообщаются полученные в ВУКИ /г. Братислава/ и ОИЯИ результаты испытаний в криогенных условиях некоторых диэлектриков, на основании чего делается вывод о применимости их в криогенной и сверхпроводящей технике.

4/ В связи с многообразием специфики работы электроизоляционных материалов при низких температурах, а также для обеспечения надежной и безопасной работы криогенных и сверхпроводящих устройств, необходимо разрабатывать новые электроизоляционные материалы с заранее заданными свойствами, предназначенные специально для криогенной техники.

Авторы выражают благодарность Н.И.Павлову и А.Г.Зельдовичу - за поддержку работ и постоянный интерес к проводимым исследованиям, В.Ф.Минеину и М.Попелишу - за большую помощь в проведении исследований и участие в обсуждениях результатов, Ю.А.Шишову - за полезные дискуссии, Л.А.Дмитриеву, А.С.Хлебушкину и П.Г.Смирнову - за добросовестный труд при монтаже установки и подготовке экспериментов, а также В.А.Васильеву и Г.И.Долбиловой - за организацию и проведение экспериментов по термической усадке эпоксидных компаундов.

Литература

1. F.T.Stone, R.McFee. Dielectric Strength of Some Common Electrical Insulators in Liquid Helium and Nitrogen. *The Rev.Sci. Instr.*, Vol. 32, No. 12, 1961, p. 1400-1401.
2. J. Bobo, M. Perrier. Propriétés des isolants solides aux températures cryogéniques. *Rev.Gén.Electr.*, vol. 77, No. 6, 1968, p. 605-609.
3. P. Burnier. Propriétés des matériaux aux basse températures. *Entropie*, No. 28, 1969, p. 17-29.
4. M.J.Chant. Dielectric Properties of Some Insulating Materials over the Temperature Range 4.2-300 K. *Cryogenics*, vol.7, No.6, 1967, p. 351-354.
5. Ю.Ф.Гедич. Исследование свойств электроизоляционных материалов и систем изоляции электрических машин при низких температурах /до -196°C /. Автореферат диссертации, Москва, 1973.
6. Дж.Мик, Дж. Крэгс. Электрический пробой в газах. Москва. Изд-во иностранной лит-ры, 1960.
7. И.М.Бортник, М.В.Соколова. Доклады научно-технической конференции по итогам НИР за 1966-67 г.г. МЭИ, Москва, 1967.
8. Г.И.Сканава. Физика диэлектриков /Область сильных полей/. Москва, Изд-во физ.-мат. лит-ры, 1958.
9. J.-P.Lehmann. Mesures diélectriques dans les fluides cryogéniques jusqu'à 200 kV-50 Hz. *Rev.Gén.Electr.*, No. 1, v. 79, 1970, p. 15-22.
10. B.Fallou et al. Dielectric Breakdown of Gaseous Helium at Very Low Temperatures. *Cryogenics*, vol. 10, No. 2, 1970, p. 142-146.
11. Б.М.Тареев, Ю.П.Филимонов. Свойства электротехнических материалов при криогенных температурах. Москва, 1972.

12. Ю.Ф.Гедич, С.А.Яманов. Свойства диэлектриков при низких температурах. Информстандартэлектро, Москва, 1967.
13. M. Van de Voorde. Results of Physical Tests on Polymer Materials at Cryogenic Temperatures. CERN ISR-MA/73-13, Geneva, 1973.
14. E.Javorský. Physical Properties of Electrical Insulating Materials at Cryotemperatures. Proc. of the IV Intern. Cryog. Eng. Conf., May 24-26, 1972, Eindhoven, The Netherlands.
15. E.Javorský, M.Popeliš. Kryotechnica a elektroizolačné materiály. *Elektroizolačná a kábelová technika*, No. 2, 25, 1972, 91-96.
16. Н.Г.Анищенко, В.Ф.Минеин. ОИЯИ; P8-6987, Дубна, 1973. ПТЭ, 6, 1973, стр. 176-179.
17. Н.Г.Анищенко, В.Ф.Минеин. Электрическая прочность слоистой изоляции в сжиженных азоте и гелии. Труды МЭИ, вып. 114, Москва, 1972.
18. Ю.Т.Борзунов, Л.Б.Голованов и др. ОИЯИ, 8-5418, Дубна, 1970.
19. Ю.Т.Борзунов, Л.Б.Голованов и др. ОИЯИ, P2-5212, Дубна, 1970.
20. С.Н.Койков, А.Н.Цикин. Электрическое старение твердых диэлектриков и надежность диэлектрических деталей. Изд. "Энергия", 1968.
21. R.P.Reed et al. Mechanical, Thermal and Electrical Properties of Selected Polymers. *Cryogenics*, vol. 13, No. 2, 1973, p. 67-82.
22. B.Colyer. The Impregnation of Superconducting Windings with Epoxy Resins. Part I: Theoretical Considerations. RHEL/R-264, 1972.
23. A.J.Middleton et al. The Impregnation of SC Windings with Epoxy Resins. Part 2, Resin Data, RHEL/R-265, XII, 1972.
24. D.Evans et al. Epoxy Resins for SC Magnet Encapsulation, RHEL/R-251, IX, 1972.
25. В.Ф.Минеин, Ю.С.Пинталь, Н.Г.Анищенко. Длительная электрическая прочность синтетических пленок в криогенных условиях. Материалы Всесоюзной конференции "Физика диэлектриков и перспективы ее развития". Том II, стр. 222-223. X.1973, Ленинград.
26. М.П.Малков и др. Справочник по физико-техническим основам криогеники. Изд. "Энергия", Москва, 1973.

Рукопись поступила в издательский отдел
17 мая 1974 года.