

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА



С 3935  
М-616

14/11-75  
Р8 - 8592

В.Ф.Минеин, Н.Г.Анищенко

2484/2-75

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАЗРЯД  
ВДОЛЬ ПОВЕРХНОСТИ ПРОХОДНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ  
В ЖИДКОМ ГЕЛИИ

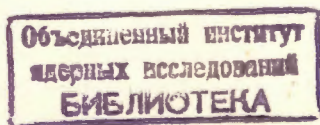
**1975**

P8 - 8592

В.Ф.Минеин, Н.Г.Анищенко

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАЗРЯД  
ВДОЛЬ ПОВЕРХНОСТИ ПРОХОДНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ  
В ЖИДКОМ ГЕЛИИ

*Направлено в ЦТЭ*



## S U M M A R Y

The flashover along the surface of the bushing model made of monolithic teflon has been investigated in liquid boiling helium and nitrogen depending on the thickness ( $\Delta$ ) and length ( $L$ ) of the insulator when a voltage of 50 Hz was smoothly increasing. Comparative tests have been carried out in warm gas helium, oil and air. The dependence of the flashover voltage ( $U_{fl}$ ) on the insulator length in liquid helium was found to be qualitatively different from similar dependences in other media. Thus, when  $L$  changes from 0 to 40 mm in liquid helium, an increase of the flashover voltage is not observed. Moreover, the samples with  $L < 0$ , i.e., with the length of a grounded electrode (external tubes-electrodes) larger than that of the isolation itself, have mean values of  $U_{fl}$  higher than at  $L \geq 0$ . For example, for the samples with  $\Delta = 5$  mm at  $L = -15$  mm,  $U_{fl}$  increases, on an average, by 40%. A similar effect is not observed in liquid nitrogen. The dependence of  $U_{fl}$  on  $\Delta$  (within 3-20 mm) is in liquid helium approx. the same as in oil. The data obtained are probably an evidence for a decisive influence of the voltage, when gliding discharges appear, upon  $U_{fl}$  in liquid helium. We indicate possible reasons for reduction of the gliding discharge voltage along the insulator surface in liquid helium in comparison to other media. In connection with this, it may turn out that the increase in the isolation length of the bushing is not worthwhile to rise its electrical strength in liquid helium.

Важным критерием для выбора конструкции проходных изоляторов, работающих в обычных условиях, является возрастание напряжения перекрытия ( $U_{пер}$ ) с увеличением разрядного расстояния  $L$ /см. эскиз на рис. 1/. Так, для газов и жидкостей эмпирические зависимости  $U_{пер}(L)$  при нормальной температуре имеют вид<sup>1/</sup>:

$$\begin{aligned} U_{пер} &= A \cdot L^m \quad / \text{для малых } L / \text{ или} \\ U_{пер} &= U_{ск} + B \cdot L^n \quad / \text{для больших } L / , \end{aligned}$$

где  $U_{ск} = C \cdot \Delta^k$  - напряжение появления скользящих разрядов;  $\Delta$  - толщина диэлектрика изолятора;  $A, B, C, m, n, k$  - коэффициенты, зависящие от материала и конструкции изолятора, среды у его поверхности, формы воздействующего напряжения.

Для установления связи  $U_{пер}$  с  $L$  и  $\Delta$  проходных изоляторов, погруженных в свободно кипящий жидкий гелий /4,2 К, 1 ат/, были выполнены серии испытаний на моделях таких изоляторов.

Изоляционные остовы /рис. 1/ моделей проходных изоляторов /всего испытано свыше 30 образцов различных размеров/ изготавливались из монолитного фторопласта - 4, а заземленные втулки и токоведущие стержни - из дюралевых трубок. Оба электрода напрессовывались на изоляционный остов с натягом, так что при испытаниях в вертикальном положении они не сдвигались относительно него /при  $\Delta$  до 5 мм/.

При испытаниях измерялись  $U_{пер}$  при изменении  $L$  от 0 до 40 мм и  $\Delta$  от 2 до 20 мм. Различные серии испытаний /заливки/ на одних и тех же или одинаковых образцах проводились разными испытателями. В одной серии

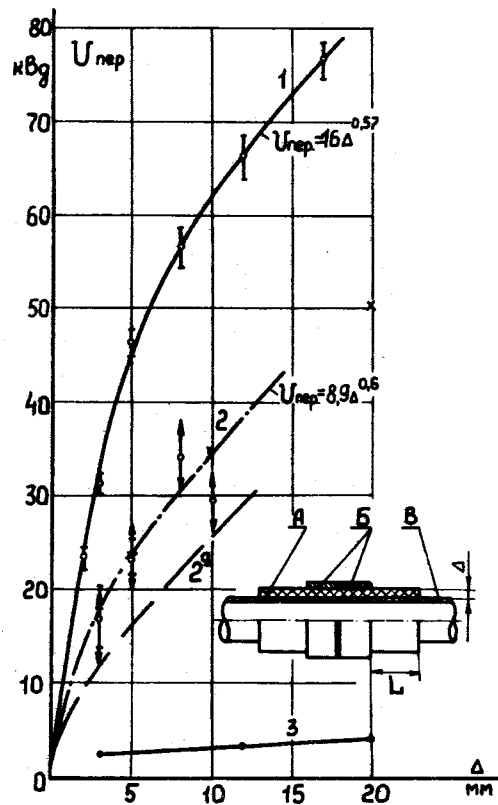


Рис. 1. Зависимость напряжения перекрытия ( $U_{пер}$ ) моделей проходного изолятора от толщины изоляционного остова в разных средах: 1 - жидком азоте, 2 - жидком гелии, 2а - минимальные значения  $U_{пер}$  в жидком гелии, 3 - газообразном гелии /293 К/. Крестиком отмечены данные испытаний в трансформаторном масле /45 кВд/ /2,5 мм/; для всех кривых, кроме 3, длина изоляционного остова  $L=0$ ; кривая 3 - для образцов с  $L=10$  мм. Стрелками отмечен разброс экспериментальных значений, прямыми черточками - доверительный интервал с коэффициентом надежности  $\alpha = 0,95$ . А - изоляционный остов модели проходного изолятора, Б - заземленная ступка, В - токоведущий стержень.

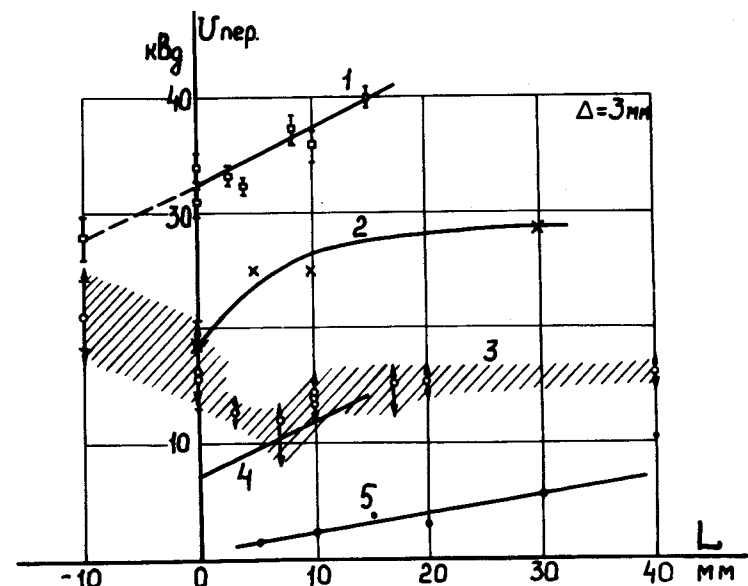


Рис. 2. Зависимость напряжения перекрытия образцов с  $\Delta = 3$  мм от расстояния  $L$  в разных средах: 1 - жидком азоте; 2 - трансформаторном масле /45 кВд/ /2,5 мм/; 3 - жидком гелии /заштрихованная область/; 4 - воздухе; 5 - газообразном гелии /293 К/ гелии.

испытаний  $\Delta$  и  $L$  образцов подбирались так, чтобы по результатам этой серии можно было судить о характере зависимости  $U_{пер}(\Delta, L)$ , так как известно, что электрическая прочность жидкого гелия заметно меняется от заливки к заливке <sup>/2/</sup>. В каждой серии испытывалось до десяти моделей изоляторов. С учетом того, что разрядные характеристики жидкого гелия подвержены большому разбросу <sup>/3,4/</sup>, были предусмотрены повторные испытания. Очередность испытаний образцов с разными  $L$  была случайной, каждый образец подвергался перекрытию до  $10 \div 30$  раз за одну заливку. Модели изоляторов размещались в криостате как горизонтально, так и вертикально. Для сравнения результатов образцы изоляторов испытывались в воздухе, трансформаторном масле, газообразном гелии /293 К/ и жидком кипящем азоте /77 К/.

Испытания проводились на высоковольтной установке с гелиевым криостатом  $\phi 300 \text{ мм}^3$ , снабженным специальной электромеханической частью: в середине крышки криостата установлен проходной изолятор  $\phi 30 \text{ мм}$ , образованный десятью изолированными проводами марки ПВВ, которые совместно с фланцем из нержавеющей стали залиты эпоксидным компаундом. Напряжение  $50 \text{ Гц}$ , подаваемое на образцы от испытательного трансформатора, плавно увеличивалось со скоростью  $0,3 \div 1,0 \text{ кВ} \cdot \text{с}^{-1}$ . При разряде вдоль поверхности образца срабатывало тиратронное устройство быстрого отключения низковольтной обмотки трансформатора.

Результаты испытаний в жидком гелии на образцах с  $L=0$  подтвердили известную зависимость  $U_{\text{пер}}(\Delta)$ : напряжение перекрытия возрастает с увеличением толщины изоляционного остова, как  $\Delta^k$  /в наших условиях  $k \approx 0,6$ /. На рис. 1 представлены средние значения, величины разброса экспериментальных данных и доверительные интервалы /с коэффициентом надежности  $\alpha = 0,95$ / напряжений перекрытия, полученные при трех заливках. Для сравнения приведены данные испытаний в жидком азоте, трансформаторном масле и теплом /293 К/ газообразном гелии. Интересно отметить, что значения  $U_{\text{пер}}$ , полученные на одинаковых образцах в жидком гелии и сухом трансформаторном масле, близки между собой.

Однако при всех испытаниях в жидком гелии не было обнаружено увеличения  $U_{\text{пер}}$  с ростом  $L$  /рис. 2 и 3/. Более того, во всех случаях было отмечено, что средние значения  $U_{\text{пер}}$  при  $L=0$  несколько выше, чем при  $L>0$ . Показательны в этом отношении результаты, полученные на образцах, у которых расстояния  $L$  были неодинаковы. Например, при испытании образца с  $\Delta=5 \text{ мм}$  и  $L=0$  и  $10 \text{ мм}$  все перекрытия происходили по поверхности диэлектрика со стороны образца с  $L=10 \text{ мм}$ , а не по торцу изолятора с  $L=0$ . Об этом можно было с уверенностью судить по четким тонким следам-“дорожкам”, которые оставлял разряд в жидком гелии на изоляционной поверхности образцов. Причем число “дорожек” от фланца к стержню всегда соответствовало числу перекрытий.

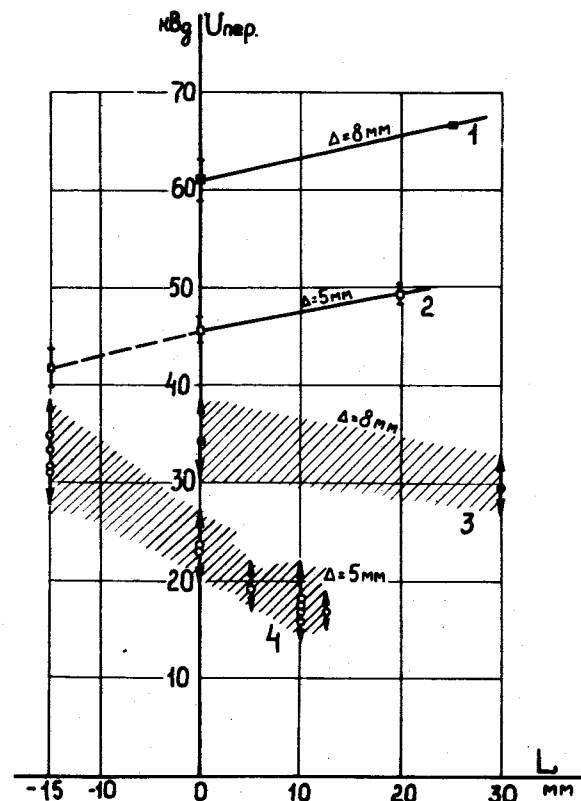


Рис. 3. Зависимость напряжения перекрытия образцов с  $\Delta=5$  и  $8 \text{ мм}$  от расстояния  $L$  в жидких гелии /области 3, 4/ и азоте /кривые 1, 2/.

В остальных испытательных средах разряд по поверхности не оставлял таких четких следов. В другом случае, при испытаниях образца с  $\Delta=3 \text{ мм}$  и  $L=2$  и  $3 \text{ мм}$  перекрытия шли по части изолятора с  $L=3 \text{ мм}$ . Таким образом, из этих серий экспериментов можно заключить, что наличие расстояния  $L$  отрицательно влияет на  $U_{\text{пер}}$ . Такое поведение проходных изоляторов в среде жидкого гелия качественно отличается от известных представлений для других сред.

В литературе отсутствуют сведения о поверхностной электрической прочности диэлектриков в жидком гелии. На основании проведенных нами исследований можно дать такое объяснение наблюдаемых особенностей электрического разряда вдоль поверхности диэлектрика в жидком гелии.

Во-первых, вследствие значительного увеличения в криогенных условиях поверхностного и объемного сопротивлений /6/ на поверхности изолятора /при возникновении частичных разрядов у краев электродов/ скапливается заряд высокой концентрации.

Во-вторых, поверхность изолятора с большой нормальной составляющей напряженности электрического поля загрязняется твердыми частицами, скапливающимися в местах концентрации силовых линий электрического поля. Как результат, напряжение появления скользящих разрядов ( $U_{ск}$ ) вдоль такой поверхности снижается, что приводит к уменьшению и  $U_{пер}$ . Можно далее предположить, что изолятор без такой поверхности должен иметь более высокое  $U_{пер}$ . Это было проверено экспериментально на образцах с  $L < 0$ , т.е. с длиной заземленной втулки /наружных трубок-электродов/ большей, чем длина изоляционного остова.

Образцы с  $\Delta = 3$  мм и  $L = -10$  мм имели минимальные экспериментальные и средние значения  $U_{пер}$  почти в 1,5 раза выше, чем модели с  $L \geq 0$  /рис. 2/. У изоляторов с  $\Delta = 5$  мм и  $L = -15$  мм средние значения  $U_{пер}$  оказались на 40%, а минимальные - на 60% выше, чем у образцов с  $L \geq 0$  /рис. 3/. Увеличение  $U_{пер}$  связано, видимо, также и с тем, что у образцов с  $L \leq 0$  отсутствует составляющая напряженности электрического поля, нормальная к поверхности диэлектрика, а радиальная и аксиальная составляющие электрического поля у края заземленной втулки воспринимаются жидким гелием. Своего рода "навес", образуемый удлиненной заземленной втулкой у образцов с  $L < 0$ , экранирует торцевую часть поверхности изоляционного остова, повышая в этом месте однородность электрического поля. Действительно, на торцах изоляционного остова этих образцов после испытаний было обнаружено не более 2-3 следов

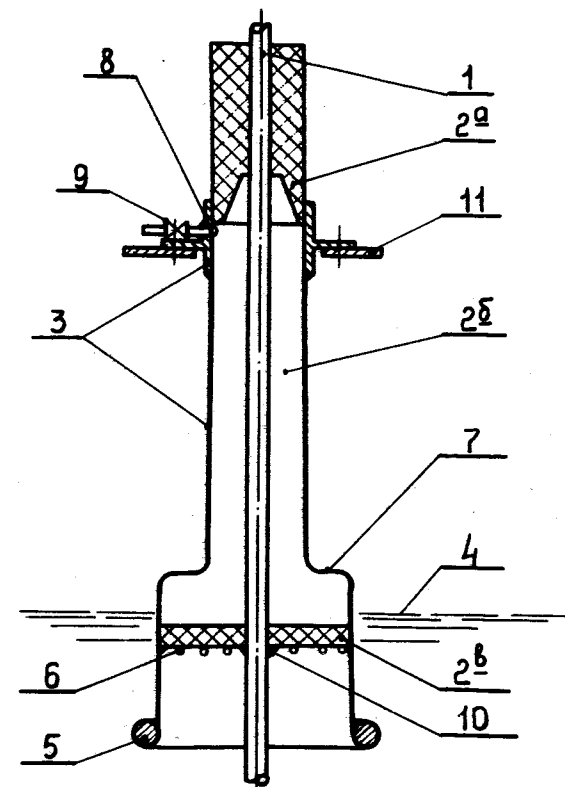


Рис. 4. Высоковольтный вакуумный ввод в ванну с жидким гелием: 1 - токоведущий стержень; 2 - составной изоляционный остов /2а и 2в - твердая изоляция, 2б - вакуум/; 3 - заземленный фланец с удлиненной в сторону жидкого гелия стенкой из нержавеющей стали; 4 - уровень жидкого гелия; 5 - экранирующее кольцо; 6 - отверстия для выхода газообразного гелия, скапливающегося у холодного торца изоляционного остова; 8 - отверстие для откачки вакуумного пространства 2б; 9 - вакуумный вентиль; 10 - вакуумное уплотнение; 11 - крышка гелиевого криостата.

перекрытий /из 20-30 перекрытий за серию испытаний/. Следует отметить /рис. 2, кривая 1 и рис. 3, кривая 2/, что подобный эффект повышения  $U_{пер}$  для образцов с  $L < 0$  в жидком азоте не наблюдался.

Выявленная особенность перекрытия по поверхности диэлектрика в жидком гелии в большой степени должна повлиять на конструирование проходных изоляторов и высоковольтных вводов для сверхпроводящих устройств. В качестве примера на рис. 4 приведен один из вариантов конструкции высоковольтного ввода в ванну с жидким гелием. Изоляционный остов этого ввода выполнен составным: в средней части, воспринимающей основной перепад температур, в качестве электрической изоляции используется вакуум, нижняя часть изоляционного остова может быть изготовлена, например, из ситалла, уплотненного эпоксидным клеем. Холодный конец ввода выполнен с "навесом", оканчивающимся экранирующим кольцом.

В заключение авторы приносят благодарность А.Г.Зельдовичу, В.П.Ларионову и Ю.А.Шишову за полезные обсуждения и А.С.Хлебушкину - за помощь при проведении экспериментов.

#### Литература

1. М.А.Грейсх и др. Бумажно-масляная изоляция в высоковольтных конструкциях. Госэнергоиздат. М. - Л., 1963.
2. J.M.Goldschvartz, B.S.Blaisse. *Brit. J. Appl. Phys.*, vol. 17, p. 1083-1089 /1966/.
3. V.Fallou et J.Galand. *Rev. Gen. Electr.*, t. 77, No. 6 594-599 /1968/.
4. J.Gerhold. *Cryogenics*, vol. 12, No. 5, p. 370-376 /1972/.
5. Н.Г.Анищенко, В.Ф.Минеин. ПТЭ, №6, стр. 176-179 /1973/; *Cryogenics*, vol. 14, No. 7, p. 409-410 /1974/.
6. Н.Г.Анищенко, Э.Яворский. ОИЯИ, P8-7663, Дубна, 1974.

Рукопись поступила в издательский отдел  
7 февраля 1975 года.

Минеин В.Ф., Анищенко Н.Г.

P8 - 8592

Электрический разряд вдоль поверхности проходных изоляторов в жидком гелии

Исследовался электрический разряд вдоль поверхности моделей проходных изоляторов из монолитного фторопласта в жидких кипящих гелии и азоте в зависимости от толщины и длины изолятора при плавном подъеме напряжения 50 Гц. Приводятся данные сравнительных испытаний образцов изоляторов в газообразном гелии (293 К), трансформаторном масле и воздухе. Отмечается качественное отличие кривой изменения напряжения перекрытия изолятора в зависимости от его длины в среде жидкого гелия по сравнению с другими испытанными средами. Приводится возможное объяснение наблюдаемых особенностей поверхностного разряда в жидком гелии.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований  
Дубна 1975

Minein V.F., Anishchenko N.G.

P8 - 8592

Electrical Discharge along the Bushing  
in Liquid Helium

See the Summary on the reverse side of the title-page.

The investigation has been performed at the  
Laboratory of High Energies, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research  
Dubna 1975