

**ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ЖИДКИХ
ДИЭЛЕКТРИКОВ В ВАКУУМЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ
ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИМПУЛЬСОВ НАНОСЕКУНДНОГО ДИАПАЗОНА**

© 2012 г. А. Н. Грибов, Е. В. Грабовский

ГНЦ РФ «Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований»

Россия, 142190, Троицк Московской обл., ул. Пушкиновых, владение 2

Поступила в редакцию 05.12.2011 г.

Представлены результаты экспериментального исследования электрической прочности изолятора, покрытого тонким слоем (1–2 мм) жидкого диэлектрика. Исследования проводились в вакууме при давлении 10^{-4} – 10^{-5} Торр и длительности высоковольтного импульса ~ 100 нс на экспериментальном стенде, созданном на базе высоковольтного наносекундного генератора ПГ-1 с выходным напряжением до 500 кВ при нагрузке до 40 Ом. Установлено, что покрытие изолятора из оргстекла касторовым или трансформаторным маслом позволяет увеличить амплитуду импульса напряжения, подаваемого на изолятор, без его пробоя по поверхности в вакууме не менее чем в 1.7 раза по сравнению с чистым изолятором.

ВВЕДЕНИЕ

При создании мощных генераторов с длительностью импульса ~ 100 нс наиболее критическим узлом является вакуумный разделительный изолятор. Его размер, определяемый предельной величиной электрической прочности поверхности изолятора в вакууме, а также связанная с ним индуктивность вакуумного тракта от изолятора до нагрузки влияют на длительность фронта импульса тока нагрузки, существенно ограничивая развитие генераторов с током свыше 20 МА.

Причиной пробоя изолятора по поверхности является эмиссия электронов, возникающая из тройной точки у катода, и газы, абсорбированные на поверхности изолятора. Для уменьшения вероятности пробоя электрическое поле в тройной точке уменьшают до величины значительно ниже порога автоэмиссии, а поверхность изолятора полируют и очищают от загрязнений. Продолжение работы изолятора бывает невозможным, даже после одного полного или частичного пробоя, если его поверхность не очистить от образовавшихся следов пробоя.

Традиционный способ оценки электрической прочности вакуумной поверхности изолятора на основе формулы Мартина позволяет обеспечить работу таких мощных установок, как Ангара-5 (Россия), Стенд-300 (Россия), Сатурн (США) и Z (США), с вероятностью пробоя изолятора $< 1\%$ при напряженности поля до 80–90 кВ/см [1]. Однако напряженность электрического поля на изоляторе со стороны воды может составлять ≥ 150 кВ/см. Согласно последним исследованиям, проведенным в лабораториях США, использование материала Rexolite для изготовления изоляторов позволило

повысить уровень электрической прочности изолятора примерно на 30% [2] относительно уровня, оцениваемого по формуле Мартина [3].

Применение жидкого диэлектрика, покрывающего поверхность изолятора в области тройных точек у катода и анода, позволяет существенно изменить условия эмиссии, а путем смачиваемости жидкостью электрода – управлять распределением поля в тройной точке. Такой способ управления затруднителен при использовании твердого изолятора из-за наличия между изолятором и металлическим электродом зазора вследствие неточности механического изготовления и деформации смежных деталей под действием механической нагрузки при вакуумной откачке.

Жидкий диэлектрик, обладая идеально гладкой поверхностью и способностью к быстрому восстановлению изолирующих свойств после пробоя, имеет неоспоримое преимущество перед твердым изолятором. При использовании жидкого диэлектрика исключено развитие дендритов как на поверхности, так и внутри диэлектрика, что отличает его от твердого изолятора. Для увеличения предельной напряженности электрического поля в качестве диэлектриков должны использоваться электроотрицательные жидкости с низким уровнем давления паров.

Работа по исследованию предельной электрической прочности жидкого диэлектрика в вакууме для высоковольтных импульсов длительностью несколько микросекунд [4] проводилась еще в 70-х годах прошлого века, однако для наносекундного диапазона такие исследования не выполнялись.

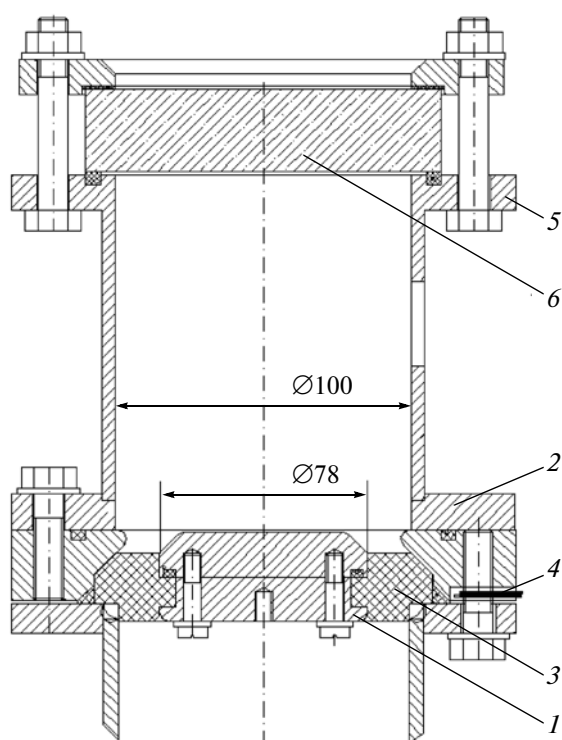


Рис. 1. Общий вид узла с исследуемым изолятором. 1 – катод; 2 – анод; 3 – изолятор; 4 – датчик тока; 5 – труба вакуумной камеры; 6 – окно.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД

Экспериментальные исследования проводились на стенде, созданном на базе высоковольтного наносекундного генератора ПГ-1 [5] с длительностью импульса ~ 100 нс. Общий вид узла с исследуемым изолятором показан на рис. 1.

Внутренний объем линии до исследуемого изолятора заполнен трансформаторным маслом. Между выходным электродом генератора и катодом 1 узла с исследуемым изолятором включено гасящее сопротивление 12.3 Ом для ограничения выходного тока генератора при пробое исследуемого изолятора. Узел с исследуемым изолятором состоит из цилиндрического катода 1, анода 2, изолятора 3, датчика тока пробоя изолятора в вакууме 4, цилиндрического корпуса 5 и окна 6 для оптической регистрации пробоя. Изолятор изготовлен из оргстекла, катод и анод – из нержавеющей стали. Угол между поверхностями электрода и изолятора составляет 45° для анода и 135° для катода. Электрическая прочность изолятора при этом выше [6], чем при угле 90° между поверхностями изолятора и одного из электродов. Вакуумный пост обеспечивает откачку воздуха в рабочей камере, где расположен исследуемый изолятор, до 10^{-5} Торр.

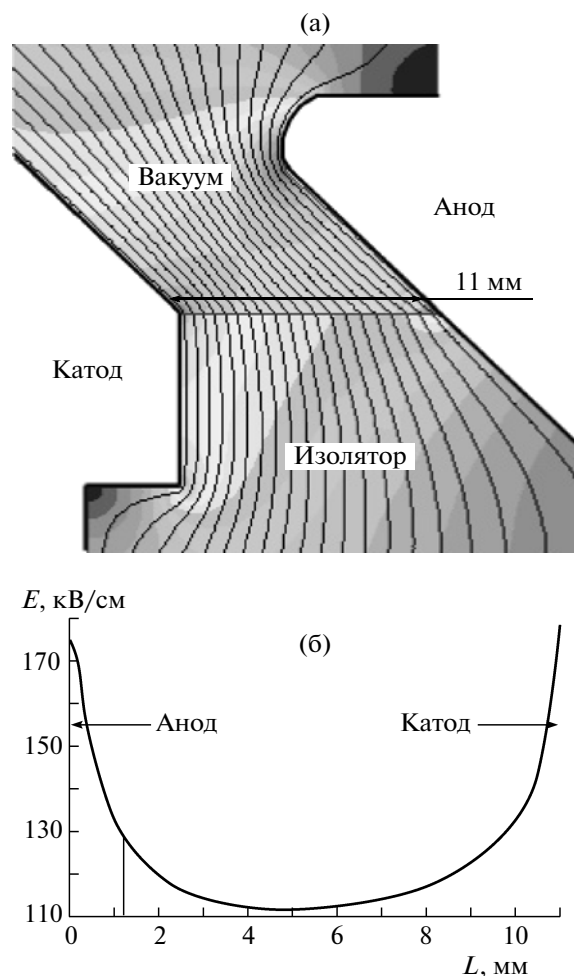


Рис. 2. Картина распределения электрического поля и эквипотенциальных линий в области исследуемого изолятора (а) и график напряженности электрического поля вдоль поверхности изолятора (б).

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Расчет электрического поля в области вблизи исследуемого изолятора из оргстекла ($\epsilon = 4$) проводился при напряжении между катодом и анодом 100 кВ как для чистого изолятора, так и для изолятора, покрытого слоем касторового масла с $\epsilon = 4.2$ либо трансформаторного масла с $\epsilon = 2.2$.

Расстояние между катодом и анодом по поверхности изолятора составляло 11 мм.

Результаты расчета в виде картины распределения эквипотенциальных линий и график напряженности электрического поля вдоль поверхности изолятора представлены на рис. 2. На рис. 3 показаны графики напряженности электрического поля вдоль поверхности касторового и трансформаторного масел. Высота масляного слоя составляла ~ 1.5 мм.

Среднее значение напряженности электрического поля вдоль всей поверхности изолятора со-

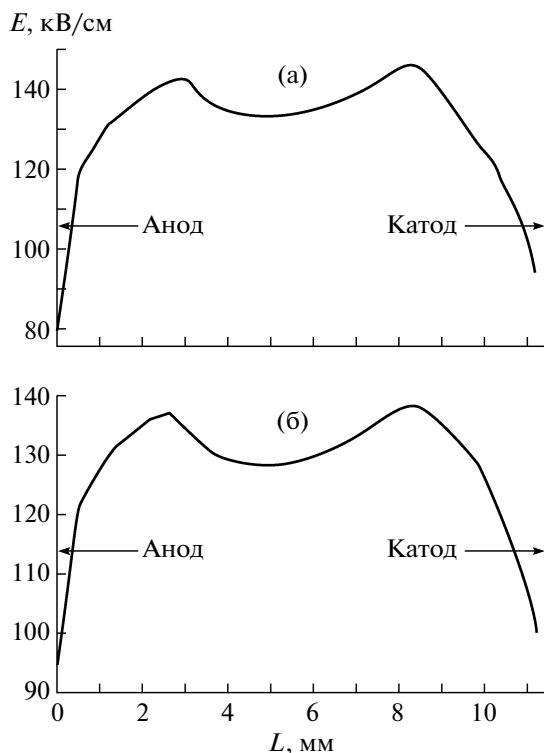


Рис. 3. График напряженности электрического поля вдоль поверхности касторового (а) и трансформаторного (б) масел.

ставляет 126 кВ/см, а ее максимум у катода и анода достигает 178 и 179 кВ/см соответственно. Для изолятора, покрытого касторовым маслом, напряженность поля на поверхности масла у катода и анода составляет 95 и 80 кВ/см соответственно, а для изолятора, покрытого трансформаторным маслом, — 100 и 95 кВ/см соответственно. Расчеты сделаны с учетом смачивания поверхности электродов маслом. Уменьшение напряженности электрического поля у катода и анода при использовании масляного покрытия поверхности изолятора связано с выравниванием эквипотенциальных линий поля в масле и наклоном поверхности масла вблизи электродов за счет поверхностного натяжения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперименты на стенде проводились с чистым изолятором и с изолятором, целиком покрытым маслом. В процессе экспериментов давление в рабочей камере составляло $(5-8) \cdot 10^{-5}$ Торр. При испытаниях с покрытым маслом изолятором осуществлялась дегазация рабочей камеры в течение суток с помощью форвакуумного насоса.

Импульсы напряжения между катодом и анодом для чистого изолятора показаны на рис. 4 для

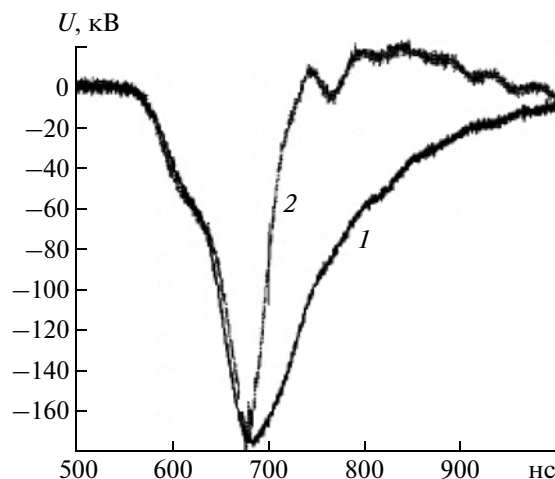


Рис. 4. Импульсы напряжения между катодом и анодом для чистого изолятора: 1 — без пробоя, 2 — с пробоем по поверхности изолятора.

двух случаев — без пробоя и с пробоем по поверхности изолятора.

Для чистого изолятора амплитуда импульса напряжения между электродами, при которой пробой происходит с вероятностью 50%, составляла 175 кВ при длительности импульса на полувысоте 120 нс. На уровне 0.89 от максимума ширина импульса равна 50 нс. При амплитуде напряжения на зазоре катод–анод 175 кВ минимальная напряженность поля в средней части поверхности изолятора (от 2 до 9 мм, см. рис. 2) составляла 202 кВ/см. При этом вычисленная по формуле Мартина [3] напряженность электрического поля для 50%-ной вероятности пробоя по поверхности изолятора равна 206 кВ/см, что близко к результату, полученному в эксперименте.

Импульсы напряжения между катодом и анодом для изолятора, покрытого касторовым или трансформаторным маслом, показаны на рис. 5. Амплитуда импульса напряжения между электродами изолятора, покрытого слоем масла, при которой пробой по поверхности изолятора происходил с вероятностью 50%, составила 300 кВ для касторового масла и 340 кВ для трансформаторного масла. Таким образом, покрытие поверхности изолятора слоем касторового масла позволяет увеличить амплитуду выходного импульса напряжения генератора в 1.76 раза, а трансформаторным маслом — в 2 раза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных экспериментов с изолятором из оргстекла были зарегистрированы импульсы напряжения генератора с длительностью ~ 100 нс, при которых существует 50%-ная вероятность пробоя по поверхности изолятора.

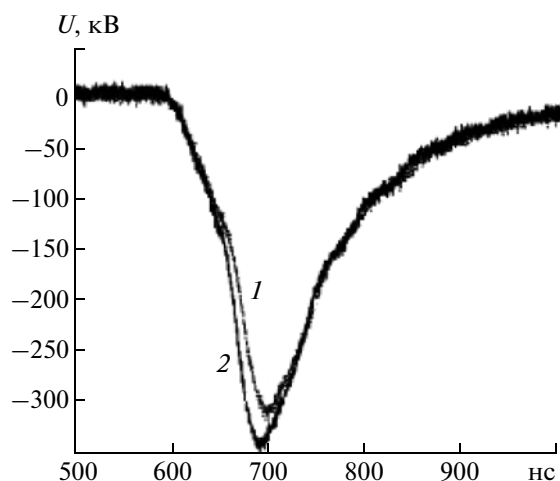


Рис. 5. Импульсы напряжения между катодом и анодом для изолятора, покрытого слоем касторового (1) или трансформаторного (2) масла.

По сравнению с “чистым” изолятором покрытие поверхности изолятора в вакууме слоем масла толщиной 1.5 мм позволило увеличить в 1.7–2 раза амплитуду выходного импульса напряжения генератора, подаваемого на электроды, между которы-

ми расположен изолятор. Дальнейшие исследования электроизоляционных свойств вакуумного изолятора, покрываемого жидким диэлектриком, будут связаны с изменением геометрии электродов и расширением диапазона используемых электроотрицательных жидкостей.

Работа выполнена при финансовой поддержке фонда “Научный потенциал”, грант по физике на 2011 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Spielman R.B., Long F., Martin T.H. et al. // Proc. 10th IEEE International Pulsed Power Conference. USA, New Mexico, Albuquerque, 1995. P. 396.
2. Stygar W.A., Spielman R.B., Anderson R.A. et al. // Proc. 12th IEEE International Pulsed Power Conference. USA, California, Monterey, 1999. P. 454.
3. Martin J.C. // JCM. 1971. № 157. P. 713.
4. Yablokov B.N. // Proc. VII International Symposium Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. USSR, Novosibirsk, 1976. P. 274.
5. Bulan V.V., Gribov A.N., Grabovskii E.V. et al. // Proc. 11th International Conference on High Power Particle Beams. Prague. Czech Republic. Printed by Tiskarna “K” Ltd., 1996. P. 942.
6. Watson A.J. // J. Appl. Phys. 1967. V. 38. Issue 5. P. 2019.