

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

*А. Н. Грибов, Е. В. Грабовский*

ГНЦ РФ «Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований»  
г. Троицк Московской области, Россия

Работа посвящена экспериментальному исследованию электрической прочности изолятора покрытого тонким слоем ( $1\div 2$  мм) жидкого диэлектрика в вакууме при давлении  $10^{-4}$ – $10^{-5}$  торр и длительности высоковольтного импульса  $\sim 100$  нс. Исследования проводились на экспериментальном наносекундном генераторе ПГ-1 с выходным напряжением до 500 кВ при нагрузке до 40 Ом. В результате экспериментов установлено, что покрытие твердого изолятора 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

Критическим узлом при создании мощных генераторов с длительностью импульса  $\sim 100$  нс является вакуумный разделительный изолятор. Его размер, который определяется предельной величиной электрической прочности поверхности изолятора в вакууме, а также связанная с ним индуктивность вакуумного тракта от изолятора до нагрузки, влияет на величину фронта импульса тока нагрузки и сильно ограничивает 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. Даже после одного полного или частичного пробоя изолятора продолжение его работы бывает невозможно без очистки поверхности от образовавшихся следов пробоя.

Традиционный подход на основе формулы Мартина к оценке электрической прочности вакуумной поверхности изолятора позволяет работать мощным установкам, таким как Ангара-5 (Россия), Стенд-300 (Россия), Сатурн (США) и Z (США), с вероятностью пробоя изолятора не более 1 % при напряженности поля до 80–90 кВ/см [1]. В тоже время напряженность электрического поля на изоляторе со стороны воды может составлять 150 кВ/см и бо-

лее. Последние исследования, проведенные в лабораториях США, повысили оценку электрической прочности изолятора из Rexolite примерно на 30 % [2] по сравнению с формулой Мартина [3].

Применение жидкого диэлектрика, покрывающего изолятор в области тройных точек у катода и анода, позволяет существенно изменить условия эмиссии, а смачиваемость жидкостью электрода управлять распределением поля в тройной точке. Такое управление затруднительно при использовании твердого изолятора из-за зазора между изолятором и металлическим электродом, который определяется точностью механического изготовления и деформацией под действием механической нагрузки при вакуумной откачке. Идеально гладкая поверхность жидкого диэлектрика и быстрое восстановление его изолирующих свойств после пробоя дает ему неоспоримое преимущество перед твердым изолятором. При использовании жидкого диэлектрика исключено развитие дендритов, как на поверхности, так и внутри диэлектрика, в отличие от твердого изолятора. Для увеличения предельной величины электрического поля в качестве диэлектриков должны использоваться электроотрицательные жидкости с низким уровнем давления паров.

Подобная работа по исследованию предельной электрической прочности жидкого диэлектрика в вакууме для высоковольтных импульсов длительностью несколько микросекунд [4] проводилась в 70-х годах прошлого века, но в наносекундном диапазоне дальнейшего развития не имела.

### Экспериментальный стенд

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

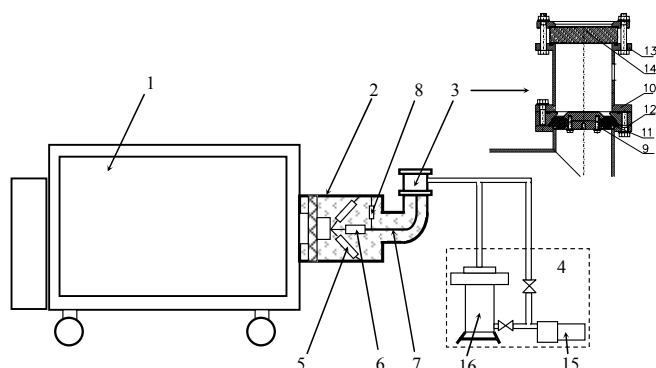


Рис. 1. Общий вид экспериментального стенда: 1 – высоковольтный генератор, 2 – узел нагрузки, 3 – узел с исследуемым изолятором, 4 – вакуумный поста, 5 – нагрузка генератора, 6 – гасящее сопротивление, 7 – соединительный провод, 8 – омический делитель напряжения, 9 – катод, 10 – анод, 11 – изолятор, 12 – датчик тока, 13 – труба вакуумной камеры, 14 – окно, 15 – форвакуумный насос, 16 – диффузионный насос

Стенд состоит из высоковольтного генератора (1), узла нагрузки (2), узла с исследуемым изолятором (3) и вакуумного поста (4). На выходе генератора располагаются омический делитель напряжения и датчик тока. Узел нагрузки имеет цилиндрической корпус диаметром 300 мм и длиной 400 мм. Внутренний объем узла нагрузки до исследуемого изолятора заполнен трансформаторным маслом. Внутри этого узла располагается омическая нагрузка (5), состоящая из двух резисторов ТВО-60, включенных параллельно, с суммарным сопротивлением 39,5 Ом. Нагрузка включена между центральным выходным электродом генератора и корпусом. К выходному электроду генератора, также подключено гасящее сопротивление (6) величиной 12,3 Ом, второй конец которого проводом (7) соединен с катодом (9) узла с исследуемым изолятором. Гасящее сопротивление предназначено для ограничения величины выходного тока генератора при пробое исследуемого изолятора. Омический делитель напряжение для регистрации напряжения на изоляторе (8) своим высоковольтным плечом соединен с проводом (7) и гасящим сопротивлением (6). Узел с исследуемым изолятором состоит из цилиндрического катода (9), анода (10), исследуемого изолятора (11),

датчика тока пробоя изолятора в вакууме (12), трубы (13) и окна (14) для оптической регистрации пробоя. Изолятор изготовлен из оргстекла. Катод и анод изготовлены из нержавеющей стали. Угол между поверхностью электродов и поверхностью изолятора составляет для анода 45° и катода 135°. В этом случае электрическая прочность изолятора выше [6], чем для угла 90° между поверхностью изолятора и одним из электродов. Вакуумный пост (4) состоит из форвакуумного (15) и диффузионного насосов (16), соединительных патрубков и диагностических ламп и обеспечивает откачку в рабочей камере, где расположен исследуемый изолятор, до  $10^{-5}$  торр.

### Расчет электрического поля

Расчет электрического поля для области вблизи исследуемого изолятора из оргстекла ( $\epsilon = 4$ ) проводился при напряжении между катодом и анодом 100 кВ для чистого изолятора и изолятора покрытого слоем касторового масла с  $\epsilon = 4,2$  и трансформаторного масла с  $\epsilon = 2,2$ .

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

Результаты расчета в виде картины распределения эквипотенциальных линий и график величины напряженности электрического поля вдоль поверхности изолятора представлены на рис. 2.

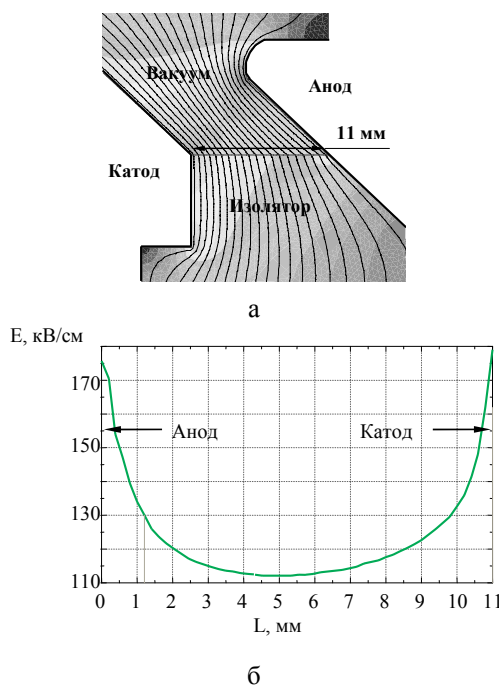


Рис.2. Картина распределения электрического поля и эквипотенциальных линий в области исследуемого изолятора (а) и график величины напряженности электрического поля вдоль поверхности изолятора (б)

На рис. 3 показаны графики величины напряженности электрического поля вдоль поверхности касторового и трансформаторного масла. Высота масляного слоя составляла около 1,5 мм.

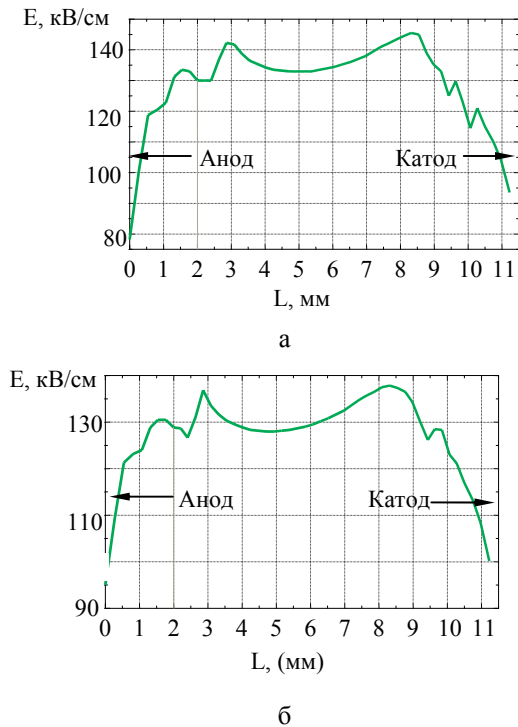


Рис. 3. График величины напряженности электрического поля вдоль поверхности касторового (а) и трансформаторного масла (б)

Среднее значение электрического поля вдоль всей поверхности изолятора составляет 126 кВ/см, а у катода и анода максимум величины электрического поля достигает 178 и 179 кВ/см, соответственно. Для изолятора покрытого касторовым маслом величина электрического поля на поверхности масла у катода и анода составляет 95 и 80 кВ/см, соответственно. Для изолятора покрытого трансформаторным маслом величина электрического поля на поверхности масла у катода и анода составляет 100 и 95 кВ/см, соответственно. Расчеты сделаны с учетом смачивания поверхности электродов маслом. Уменьшение величины электрического поля у катода и анода при использовании масляного покрытия 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 использованием масел цели-

ком покрывающих изолятор. В процессе экспериментов давление в рабочей камере составляло  $5 \div 8 \cdot 10^{-5}$  мм. рт. ст. При покрытии изолятора маслом, в качестве которого использовалось касторовое или трансформаторное масло, осуществлялась предварительная дегазация в течение суток рабочей камеры с помощью форвакуумного насоса.

Импульсы напряжения между катодом и анодом для чистого изолятора показаны на рис. 4 для двух случаев без пробоя и с пробоем по поверхности изолятора.

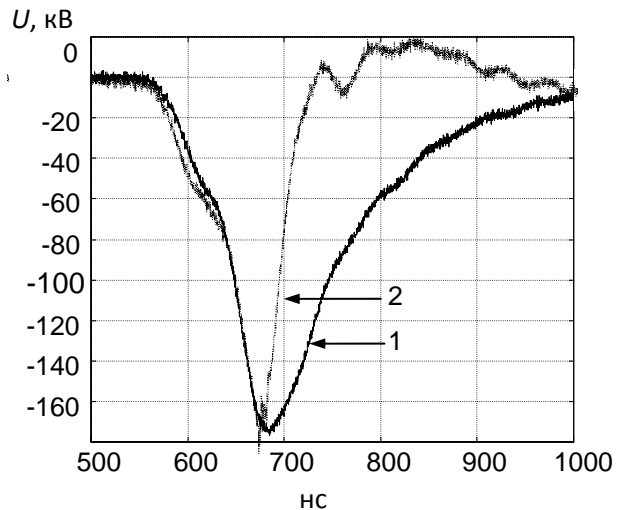


Рис. 4. Импульсы напряжения между катодом и анодом для чистого изолятора без пробоя (1) и с пробоем (2) по поверхности изолятора

Амплитуда импульса напряжения между электродами для чистого изолятора, 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 составляет 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) составляет 202 кВ/см. А вычисленная по формуле Мартина [3] напряженность электрического поля, при которой существует 50 % 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 и трансформаторным маслом, показаны на рис. 5. Амплитуда импульса напряжение между электродами изолятора покрытого слоем масла, при которой пробой по поверхности изолятора происходил с вероятностью 50 %, составила 300 кВ для касто-

рового масла и 340 кВ для трансформаторного масла. Таким образом, при покрытии поверхности изолятора слоем касторового масла можно увеличить амплитуду выходного импульса напряжения генератора в 1,76 раза, а с помощью трансформаторного масла в 2 раза.

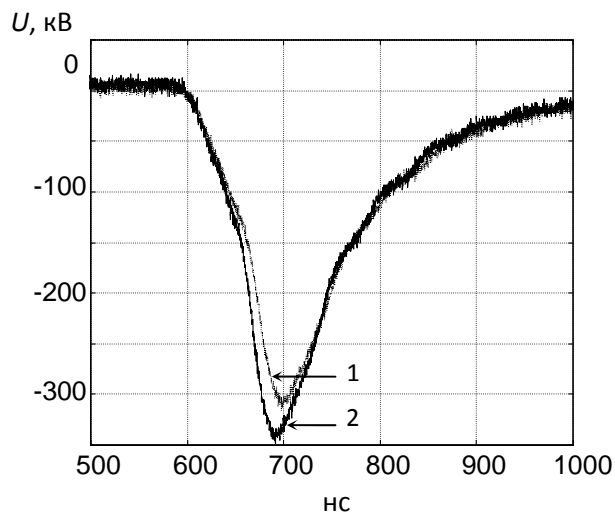


Рис. 5. Импульсы напряжения между катодом и анодом для изолятора, покрытого слоем касторового (1) и трансформаторного масла (2)

### Заключение

В результате проведенной серии экспериментов с изолятором из оргстекла без покрытия и с покрытием вакуумной поверхности изолятора слоем масла толщиной  $\sim 1,5$  мм были зарегистрированы импульсы напряжения генератора с дли-

тельностью  $\sim 100$  нс, при которых существует 50 % вероятность пробоя по поверхности изолятора. Покрытие изолятора маслом обеспечило увеличение в  $1,7\div 2$  раза амплитуды выходного импульса напряжения генератора, подаваемого на электроды, между которыми расположен изолятор, по сравнению с «чистым» изолятором. Дальнейшая работа по исследованию электроизоляционных свойств вакуумного изолятора покрываемого жидким диэлектриком будет связана с изменением геометрии электродов и расширением диапазона используемых электроотрицательных жидкостей.

Работа выполнена при финансовой поддержке «Фонда научный потенциал».

### Список литературы

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