

КИМ ЕН ДАР, д-р техн. наук, проф., УИПА, Славянск
В.И. СЫЧЕНКО, канд. техн. наук, НИИВН, Славянск
В.Л. КАЛМЫКОВ, инженер, НИИВН, Славянск
В.И. КИЗИМ, инженер, НИИВН, Славянск

ОПЫТ ИССЛЕДОВАНИЯ СТАРЕНИЯ ЛИНЕЙНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ

Представлено результати прискорених випробувань полімерних ізоляторів при дії високої температури, вологості і напруги, а також приведено залежності навантаження-час, що отримані при різних концентраціях кислотного середовища. Результати лабораторних досліджень в кліматичній камері зіставлені з даними експлуатації. Зроблено висновок щодо домінуючого чинника високої температури в процесі зниження міцності по межі оболонка-стержень.

Представлены результаты ускоренных испытаний полимерных изоляторов при воздействии высокой температуры, влажности и напряжения, а также приведены зависимости нагрузка – время, полученные при различных концентрациях кислотной среды. Сопоставлены результаты лабораторных исследований в климатической камере с данными опыта эксплуатации. Сделан вывод о доминирующем факторе высокой температуры в процессе снижения прочности по границе оболочка – стержень.

Введение. Основные требования, предъявляемые к линейным полимерным изоляторам в части методов испытаний и технических характеристик, регламентированы в международном стандарте МЭК 61109 [1], и они, в свою очередь, адаптированы в национальных стандартах с учетом особенностей эксплуатации изоляторов. По мере накопления опыта эксплуатации параметры этих требований корректировались, как правило, в более высокую сторону, предъявлялись новые виды испытаний. Условно отказы полимерных изоляторов в эксплуатации можно подразделить на три разновидности: внешнее перекрытие; внутренний пробой изолятора по границе защитная оболочка – стеклопластиковый стержень; механический излом стержня. Снижение наружной электрической прочности обуславливается загрязнением защитной оболочки и частичным повреждением оболочки под действием внешних факторов, в том числе, поверхностными электрическими разрядами. Пробою изолятора предшествует образование очагов внутренних электрических разрядов и их развитие вдоль границы обо-

лочка - стержень. Потеря механической прочности несущего элемента изолятора - стеклопластикового стержня, происходит в результате его разьедания электрическими разрядами в районе заделки, а также в результате коррозии стекловолокон, идентифицируемой как хрупкое разрушение стержня.

Цель работы – исследование факторов, вызывающих резкое ухудшение электрической и механической прочности полимерного изолятора.

Существующее состояние исследований. Устойчивость защитной оболочки к воздействиям эксплуатационных факторов оценивается проведением длительных испытаний на трекингоэрозионную стойкость в условиях соляного тумана. Рабочая группа CIGRE 22-10 рекомендует при испытаниях в камере соляного тумана ввести дополнительные циклические воздействия на изоляторы - такие как,: повышенная температура, высокая влажность, солнечная радиация, дождь. Эти рекомендации нашли применение в США, Канаде и в различных Европейских странах. Например, в Италии приемочные испытания изоляторов проводятся по еще более жесткой методике, разработанной Центральной электро – энергетической лабораторией CESI. Полагается, что при таких комбинированных режимах испытаний эффективнее контролируется не только качество материала и конструкция оболочки, но и ее защитная функция - сохранение монолитности контактных поверхностей со стержнем и металлическими оконцевателями.

Исследования, проведенные в [2, 3] показали, что в микропорах, характерных для используемых стеклопластиковых стержней, при рабочих напряжениях не могут возникать частичные разряды. Это означает, что снижение внутренней электрической прочности изолятора обусловлено внешними факторами, скорее всего, попаданием влаги на поверхность стержня. При этом возникает также условие хрупкого разрушения стержня, как следствие коррозии под действием активных ионов, содержащихся в жидкой среде. Вместе с тем, основываясь на опытах с высокодеионизированной водой авторы [3] считают, что хрупкое разрушение стержня является прямым следствием контактирования воды со стекловолокном, но не обязательным присутствием кислотообразующих солей в воде. Вода может достигнуть поверхности стекловолокон сквозь микротрещины в эпоксидной матрице, вступить реакцию со стеклом и ослабить кремний - кислородную связь. В работе [4] дается иное объяснение роли воды в процессе хрупкого разрушения, согласно которому влага, взаимодействуя с материалом эпоксидной матрицы, образует кислотную среду непосредственно в стерж-

не. По всей вероятности кислотная среда, как и механическая нагрузка, под воздействием которой находятся изоляторы, способствует проникновению влаги вглубь матрицы.

Для повышения устойчивости изоляторов к хрупкому разрушению рекомендуется применение стержней, изготовленных из стекловолокон типа *E-CR* с антикоррозионным покрытием. Но на практике из-за высокой стоимости таких стержней изготовителями предпочтение отдается стержням со стекловолокнами типа *E* без защитной грунтовки. В этой связи представляет интерес проведение, дополнительно к испытаниям на длительную механическую прочность стержней по МЭК 61109, ускоренных испытаний на их устойчивость к хрупкому разрушению. Так или иначе, как ухудшение внутренней электрической прочности изолятора, так и спонтанная потеря его механической прочности непосредственно связаны с явлением разгерметизации пограничных областей, что приводит к попаданию атмосферной влаги на поверхность стержня. Поэтому несомненный интерес представляет выявление тех основных эксплуатационных факторов, которые способствуют нарушению целостности границ раздела оболочка – стержень и оболочка – оконцеватель.

Термовлажностное старение. Объектом исследования были полимерные линейные изоляторы с кремнийорганической оболочкой на номинальное напряжение 27,5 кВ и на нормированную механическую прочность 120 кН, с диаметром стеклопластикового стержня, равным Ø22мм. Изоляторы были сборной конструкции, для которых на сегодня имеются данные более чем 25 летнего опыта эксплуатации.

Испытывались изоляторы в климатической камере в 3-х режимах:

– при повышенной температуре, $T = 80 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (режим *T*);

– при $T = 80 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и повышенной относительной влажности воздуха, $\eta=95-98\%$ (режим *TB*);

– при $T = 80 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $\eta=95-98\%$, повышенном напряжении, $U=30$ кВ и непрерывном слабом коронировании, создаваемом установленными на электродах металлическими иглами (режим *TBH*).

Длительность каждого режима испытаний составила 180 суток.

В ходе испытаний через каждые 10-20 суток демонтировались по два изолятора и проводились диагностические испытания: определялись электрическая прочность границы оболочка – стержень, $E_{пр}$ и адгезия этой границы, $P_{ад}$. Для этого изготавливались образцы из приэлектродных и срединных участков демонтированных изоляторов. Внешние виды образцов и их геометрические параметры для соответствующих испытаний приведены на рис. 1.

Испытания на пробой границы раздела проводились в трансформаторном масле с прочностью не менее 40 кВ в стандартной ячейке, адгезия определялась методом сдвига ребра вдоль стержня, поскольку данные опытов показали эквивалентность данного метода с альтернативным методом отрыва оболочки перпендикулярно оси стержня.

При осмотре в процессе испытаний было установлено в режимах *ТВ* и *ТВН* после 30 суток экспонирования в камере частичное отслоение оболочки от оконцевателей, а после $t \approx 60$ суток – разрушение верхнего слоя цинкового покрытия и, вместе с этим, практически полное отставание оболочки от оконцевателей. В случае режима *T* повышенной температуры, видимых нарушений контактных поверхностей границы оболочка – оконцеватель выявлено не было.

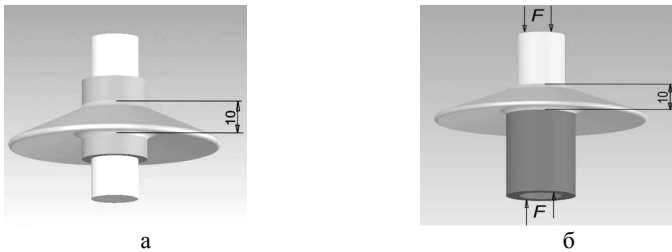


Рис. 1. Образцы для испытания на электрическую прочность (а) и адгезию (б).

Диагностические испытания показали, что независимо от принятых действующих факторов, существенное снижение измеряемых характеристик примерно на одинаковый уровень, имеет место в первые периоды испытаний, $t \approx 50-60$ сут. Далее процессы старения стабилизируются, кривые искомых зависимостей от времени располагаются близко друг к другу (рис. 2). Также отмечено отсутствие значимой разницы в величинах $E_{пр}$ и $P_{ад}$ образцов, изготовленных из различных участков изолятора.

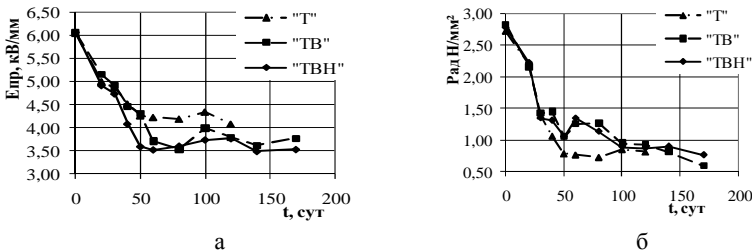


Рис. 2. Результаты диагностических испытаний образцов на электрическую прочность (а) и адгезию (б).

Как видно на рис.2, экспериментальные точки, соответствующие режимам *TB* и *TBH*, практически совпадают между собой, что указывает на отсутствие влияния напряжения на внутреннюю прочность изолятора на начальном этапе старения. Повышенная влажность проявилась в незначительном снижении электрической прочности (рис. 2,б). Таким образом, можно констатировать, что фактор высокой температуры оказывает доминирующее влияние на процессы старения внутренней изоляции полимерных изоляторов.

Длительная механическая прочность стеклопластиковых стержней. Эксперименты по оценке прочности стержней осуществлялись на стержнях $\varnothing 22$ мм производства "Тверьстеклопластик", наиболее широко применявшихся при производстве изоляторов. Зависимость растягивающая нагрузка – время определялась на образцах, изготавливаемых в виде гантели путем расточки исходного стержня до диаметра $\varnothing 10$ мм на рабочем участке, как рекомендовано в МЭК61109. Влияние среды на прочность изучалось при растягивающих и консольно изгибающих нагрузках стержней в исходном состоянии, $\varnothing 22$ мм. В качестве химически активной среды была взята азотная кислота [4] с различной концентрации *k*. Однонормальной концентрации *PH* (*k*=1нор) соответствовало 63 г концентрата HNO_3 , растворенного в 937 г дистиллированной воды. При испытаниях на изгиб емкость с воздействующей жидкостью располагалась у заземленного конца. Следует отметить, что механизм хрупкого разрушения стержня при изгибе сохраняется таким же, что и при растяжении [2, 3], однако значительно упрощается технология проведения испытаний.

Результаты испытаний даны на рис. 3, 4. Для того чтобы облегчить сопоставительный анализ на рис. 3 переменные параметры - нагрузки - приведены в процентах относительно кратковременных критических разрушающих величин, 93 кН и 305 кН соответственно для образцов $\varnothing 10$ мм и стержней $\varnothing 22$ мм. На рис. 3 видно, что нагрузки, которые могут выдержать испытываемые объекты, имеют линейную зависимость от логарифма продолжительности времени как в случае воздействия кислотной среды, так и без него.

Аппроксимация экспериментальных данных рис. 3 дает следующие соотношения между прилагаемой растягивающей нагрузкой $P_{\text{рас}}$ и продолжительностью жизни испытываемых объектов:

$$P_{\text{рас.1}} \approx 100 - 9,75 \times \lg t - \text{в } \%, \text{ для образцов } \varnothing 10 \text{ мм}; \quad (1)$$

$$P_{\text{рас.2}} \approx 100 - 26,6 \times \lg t - \text{в } \%, \text{ для образцов } \varnothing 22 \text{ мм и среды } \text{HNO}_3, \\ k = 1 \text{ нор} \quad (2)$$

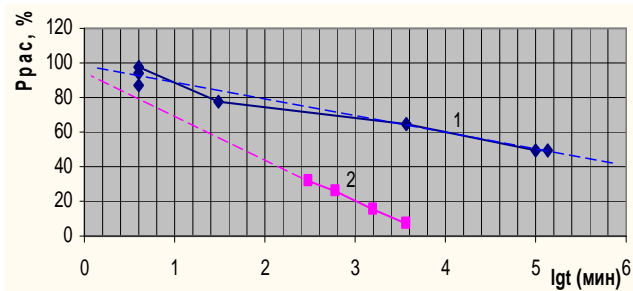


Рис. 3. Зависимости "растягивающая нагрузка- время":
1 – образцы $\varnothing 10$ мм; 2 – стержень $\varnothing 22$ мм и среда HNO_3 , $k=1$ нор.

Коэффициенты перед переменной времени lgt в соотношениях (1) и (2) являются показателями долговечности стержней и численно равны снижению прочности в % за одну декаду продолжительности воздействующей нагрузки. Полагая, что $P_{\text{рас.1}} = P_{\text{рас.2}}$, из (1) и (2) получаем соотношение, с помощью которого оцениваем химическое влияние среды на продолжительность жизни стержня:

$$\text{lgt}_1 = 2,73 \cdot \text{lgt}_2. \quad (3)$$

Например, при средней эксплуатационной нагрузке, равной 20% от критической кратковременной, стержень может находиться без разрушения более 50 лет (1), в присутствии же кислотной среды согласно (3) – не более одного дня.

Уместно здесь отметить, что испытания стержней на воздействие среды проводились в широком диапазоне концентрации кислоты в воде, $k=(1\pm 0,01)$ нор, однако, как видно из рис. 4, время до разрушения стержней существенно не отличалось между собой. В данном цикле испытаний на изгиб кратковременный критический момент стержней составил 1,05 кН/м.

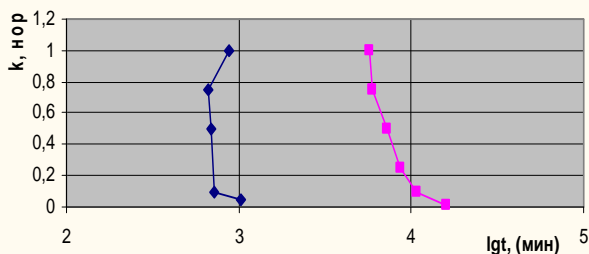


Рис. 4. Влияние концентрации HNO_3 на прочность стержня $\varnothing 22$ мм при изгибе: слева – при $M_{\text{из}} = 0,5$ кНм; справа – при $M_{\text{из}} = 0,3$ кНм.

Обсуждение результатов испытаний, сопоставление с данными опыта эксплуатации. Как правило, демонтаж изоляторов с действующих ВЛ осуществлялся на проблемных участках непосредственно после регистрации отказов изоляторов в виде перекрытия, пробоя или разрыва. В таблице даны результаты определения состояния изоляции снятых с эксплуатации изоляторов по границе стеклопластиковый стержень и защитная оболочка. Эти данные соответствуют отрезкам изоляторов без видимых повреждений.

Таблица 1

Тип изолятора	Длительность эксплуатации, t , лет	$E_{пр} / \sigma$, кВ/мм	$P_{ад} / \sigma$, Н/мм ²
ЛК70/330-7	2-3	5,68 / 0,44	0,67 / 0,12
ЛК70/110-3	13	4,76 / 0,24	0,45 / 0,14
ЛК70/220-7	15	5,00 / 0,55	0,23 / 0,06
ЛК70/220-7	15	2,56 / 0,61	0,22 / 0,14
ЛК70/220-7	15	1,79 / 0,18	0,29 / 0,04
ЛК70/220-7	15	1,57 / 0,04	0,17 / 0,06
ЛК70/330-7	16	2,95 / 0,77	0,25 / 0,06

Графическая иллюстрация результатов измерений приведена на рис. 5. Там же для сравнения представлены результаты ускоренных испытаний (рис. 2). Как видно на рис. 5, в условиях эксплуатации отмечается значительное снижение адгезии уже в первые годы их работы. В целом можно принять, что процессы старения пограничного слоя по параметру $P_{ад}$, как и в случае лабораторных испытаний, носят степенной характер и в полулогарифмическом масштабе удается аппроксимировать линейными функциями:

- по данным эксплуатации

$$P_{ад,1} \approx 2,75 - 0,68 \times \lg t - \text{в Н/мм}^2; \quad (4)$$

- по данным ускоренных испытаний

$$P_{ад,2} \approx 2,75 - 0,98 \times \lg t - \text{в Н/мм}^2. \quad (5)$$

Откуда получаем коэффициент ускорения теплового старения по адгезии, выполненного в климатической камере:

$$K_T \approx 10^{1,44} = 27,5. \quad (6)$$

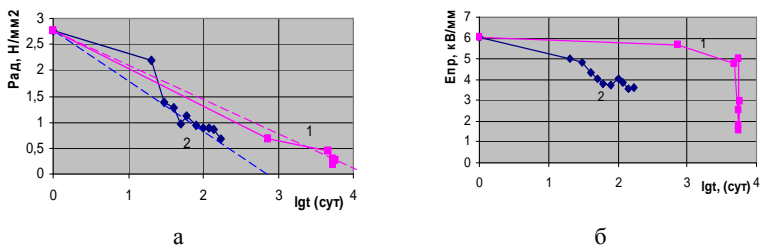


Рис. 5. Дрейф адгезии (а) и электрической прочности (б) в ходе старения изоляторов: 1 – на ВЛ; 2 – в климатической камере.

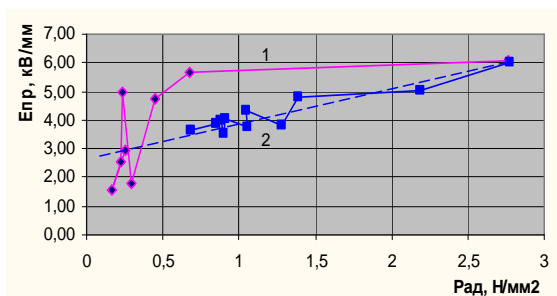


Рис. 6. Корреляционные зависимости между адгезией (по горизонтали) и электрической прочностью изоляторов (по вертикали): 1 – из эксплуатации; 2 – из климатической камеры.

Выводы. В нормальных условиях эксплуатации снижение адгезии между защитной оболочкой и несущим стеклопластиковым стержнем является следствием теплового старения, что, в свою очередь, может ускорить процессы разгерметизации пограничных областей и проникновения влаги на поверхность стержня, и, таким образом, инициировать резкое ухудшение электрической и механической прочности изолятора.

Можно предположить о существовании порогового снижения адгезии, ниже которого следует ожидать отказа изоляторов по причине внутреннего электрического пробоя.

Целесообразно продолжить исследования процессов старения внутренней изоляции, в том числе, изоляторов с новыми конструктивными и технологическими исполнениями, направленные на разработку методов прогнозирования эксплуатационной надежности полимерных изоляторов в лабораторных условиях. Рекомендуется в качестве ос-

нового фактора оценки устойчивости изоляторов к эксплуатационным воздействиям в лабораторных условиях принять повышенную температуру и ввести в практику контроля стеклопластиковых стержней испытания на их устойчивость к хрупкому разрушению.

Список литературы. 1. МЭК61109-92. Изоляторы полимерные для ВЛ переменного тока на номинальное напряжение свыше 1000В. 2. *J. Montesinos, R.S. Gorur, B. Mobasher, D. Kingsbury*. Mechanism of Brittle Fracture in Nonceramic Insulators // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. April 2002, – Vol. 9. – No. 2. p. 236-243. 3. *J. Montesinos, R.S. Gorur, B. Mobasher, D. Kingsbury*. Brittle Fracture in Nonceramic Insulators: Electrical Aspects of Microscopic Flaws in Glass Reinforced Plastics (GRP) Rods // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, April 2002. – Vol. 9. – No.2. – P. 244-252. 4. *C. Tourreil*. The Composite Insulator Brittle Fracture Puzzle: An Explanation // *INMR Quarterly Review*, 2000. –Vol. 8. – No. 6. – 11/12.

Поступила в редколлегию 10.09.2009