

В.В.РУДАКОВ, докт.техн.наук; **Ю.В.КРАВЧЕНКО**; НТУ «ХПИ»

РЕСУРС ПЛЕНОЧНОЙ ПОЛИПРОПИЛЕНОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ, ПРОПИТАННОЙ ТРАНСФОРМАТОРНЫМ МАСЛОМ, В ИМПУЛЬСНОМ РЕЖИМЕ

Наведені результати випробувань секцій високовольтних імпульсних конденсаторів з поліпропіленової плівки. Секції просочені трансформаторним маслом, на короткострокову електричну міцність та ресурс

The results of testing the short-term strength and resource of the high voltage pulse capacitor gangs made of polypropylene film impregnated with transformer oil have been given.

Постановка задачі. В високовольтній імпульсній техніці широке застосування отримала бумажно-пліночній і комбінована ізоляція. Однак, в нинішнє час, в зв'язі з прогресом, досягнутим в створенні нових якісних конденсаторних полімерних плінок (в частині, поліпропіленової) з'явилася можливість створення чисто пліночних імпульсних конденсаторів. Поліпропіленова плівка вже завоювала надійні позиції при створенні силових конденсаторів перемінного напруги [1,2]. В той же час застосування плівки для імпульсних конденсаторів практично не досліджено.

Існуючі експериментальні дані [3,4] в одному випадку [3] свідчать про ефективність застосування пліночної ізоляції для імпульсних конденсаторів, в іншому [4] – при пропитці поліпропіленової ізоляції касторовим маслом, що володіє великою в'язкістю – отримані дуже низькі значення ресурсу. Тому логічно застосувати для пропитки діелектричну рідину з меншою в'язкістю і меншим кутом смачування. З великої кількості розповсюджених і доступних рідинних діелектриків найбільш підходящим є нафтяне масло.

Ціль даної роботи є дослідження ресурсних характеристик чисто пліночного діелектрика, пропитанного трансформаторним маслом в імпульсному режимі.

Конструкція образців. Для проведення експерименту були виготовлені секції з односторонньо шорховатої поліпропіленової плівки типу TERFILM RER товщиною 12 мкм з різною кількістю шарів: 2,3,4 і 5 шарів (24,36,48 і 60 мкм відповідно) по 80 образців кожної конструкції (рис. 1).

Шари плівки укладалися таким чином, щоб гладка сторона плівки торкалася до шорховатої стороною сусіднього шару плівки. Тем са-

мым улучшались условия пропитки за счет повышения возможности проникновения жидкого диэлектрика между соседними слоями пленки.

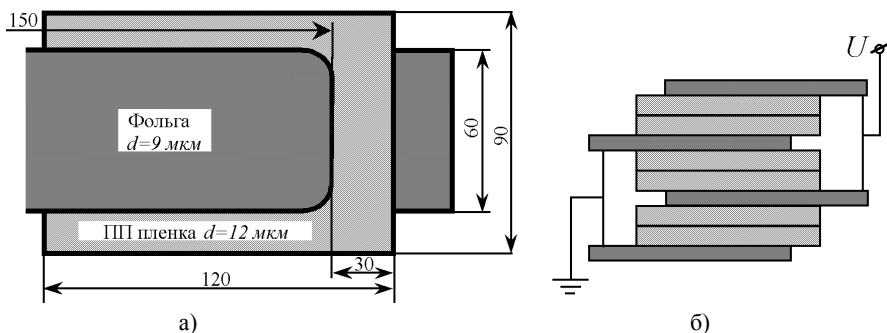


Рисунок 1 – Конструкция секций из полипропиленовой (ПП) пленки, изготовленных для проведения эксперимента

Каждая секция состояла из трех параллельно включенных емкостных промежутков (рис. 1, б) для обеспечения условий создания конфигурации электрического поля, близкой к реальной. Активная площадь обкладки секции составила 60 x 90 мм. Друг от друга секции отделялись при помощи 4 - 10 слоев кабельной бумаги толщиной 120 мкм во избежание пробоя между соседними секциями. После сборки образцы сушились в вакуумной камере при температуре 80 °С и вакууме 6,5 Па в течение 6 дней. Далее производилась заливка в бак с образцами предварительно отвакуумированного жидкого диэлектрика, в качестве которого использовалось трансформаторное масло. Пропитка происходила в течение 3 дней при температуре 70 °С и вакууме 6,5 Па.

Методика проведения эксперимента. До и после пропитки проводилось измерение емкости образцов мостом E7-8. Результаты измерений приведены в табл. 1. Значения тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg } \delta$ образцов находились в пределах $(3-5) \cdot 10^{-4}$. Следует заметить, что увеличение емкости образцов после пропитки незначительно (как и в работе [4]), поэтому значение диэлектрической проницаемости жидкого диэлектрика не является ключевым фактором при его выборе.

В ходе проведения эксперимента секции испытывались на кратковременную электрическую прочность и на ресурс в стандартном режиме (частота разрядного тока контура 100 кГц и декремент колебаний 1,38).

Испытание образцов на кратковременную электрическую прочность производилось путем скачкообразной подачи на испытуемый образец напряжения, соответствующего уровню напряженности для данного количества слоев пленки $E = 250$ кВ/мм. Далее подъем напряжения осуществлялся с шагом по времени $\Delta t = 30$ с и по напряженности $\Delta E = 25$ кВ/мм.

Таблица 1 – Результаты измерения емкости образцов до и после пропитки

Толщина изоляции, мкм	Количество измеренных образцов, ед.	Средняя емкость образцов до пропитки, нФ	Средняя емкость образцов после пропитки, нФ	Относительное увеличение емкости после пропитки
24	37	12,37	12,99	1,05
36	39	8,39	8,76	1,044
48	39	5,58	5,99	1,074
60	39	4,75	5,06	1,065

Ресурсные испытания образцов проводились с использованием генератора поджигающих импульсов, который генерировал импульсы с частотой $f = 2$ Гц. Подаваемое на образец напряжение контролировалось при помощи электростатического киловольтметра С196.

Результаты испытаний. Результаты испытания секций на кратковременную электрическую прочность приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Кратковременная электрическая прочность образцов

Толщина изоляции, мкм	Количество испытанных образцов, ед.	Среднее напряжение пробоя, кВ	Средняя напряженность пробоя, кВ/мм
24	15	12,77	531,94
36	16	19,11	530,73
48	19	21,15	440,57
60	19	27,17	452,89

Следует отметить, что из испытанных на кратковременную прочность образцов ни на одном из них напряженность пробоя не составила менее 350 кВ/мм. Коэффициент вариации результатов пробоя 2-х слойных образцов составил $K = 0,145$; 3-х слойных – $K = 0,12$; 4-х слойных – $K = 0,05$; 5-ти слойных – $K = 0,09$.

Результаты ресурсных испытаний на 6 уровнях напряженности для образцов с различной толщиной пленочного диэлектрика даны в табл. 3.

На рис. 2 приведено распределение образцов по ресурсу в координатной сетке, соответствующей закону распределения Вейбулла.

После окончания испытаний образцы были разобраны для определения расположения точек пробоя секций. Подавляющее большинство точек пробоя (от 70% для 2-х слойных образцов до 90% для 5-ти слойных) для образцов, которые испытывались на ресурс, находились на краю обкладок. В тоже время для образцов, которые испытывались на кратковременную прочность,

значительная часть точек пробы лежала в области однородного поля (от 40% для 5-ти слойных до 80% для 2-х слойных образцов).

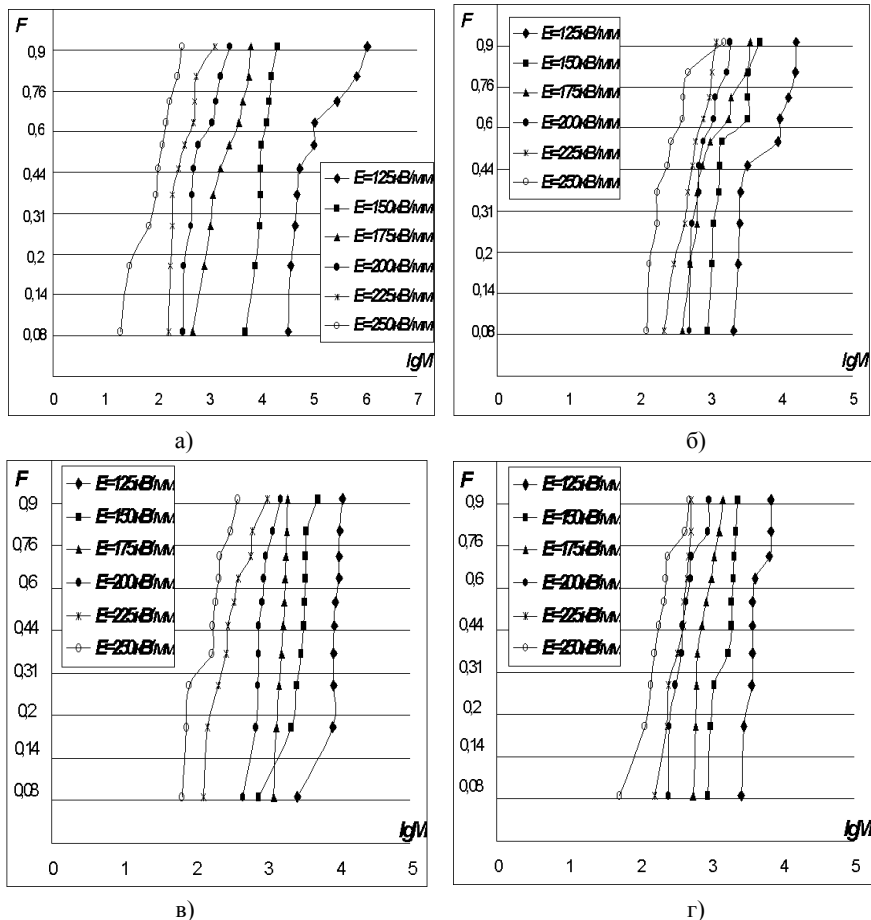


Рисунок 2 – Распределение образцов по ресурсу: а) 2-х слойных (24 мкм); б) 3-х слойных (36 мкм); в) 4-х слойных (48 мкм); г) 5-ти слойных (60 мкм).

Анализ результатов. Анализ результатов ресурсных испытаний (табл. 3) показывает, что при напряженностях электрического поля более 200 кВ/мм не наблюдается закономерности уменьшения ресурса с увеличением числа слоев пленки. Это свидетельствует о резком ослаблении «краевого эффекта» и изменении механизма разрушения изоляции.

Необходимо отметить, что ресурс образцов в 4-6 раз больше ресурса пленочных образцов, пропитанных касторовым маслом [4].

Таблица 3 – Средние значения наработки образцов с различными толщинами пленочного диэлектрика и различных значениях напряженности эл. поля

Толщина изоляции, мкм	Средний ресурс при различных уровнях напряженности, импульсов					
	E , кВ/мм					
	125	150	175	200	225	250
24	252244	11465	2800	938	426	132
36	7543	2212	1459	958	662	400
48	8774	3076	1662	900	406	190
60	4472	1720	884	492	378	227

Определение показателя степени в формуле «жизни» – зависимости ресурса от напряженности поля по данным, приведенным в табл. 3, по формуле:

$$n = \frac{\ln \frac{M_i}{M_j}}{\ln \frac{E_j}{E_i}}, \quad (1)$$

где M_i (M_j) – ресурс i -той (j -той) секции на напряженности E_i (E_j), показало, что значения показателя степени n находится в пределах 2,5 – 17. Наибольшие значения показателя степени соответствуют варианту с двухслойным диэлектриком, так как разрушение диэлектрика обусловлено двумя механизмами пробоя одновременно (как в области равномерного электрического поля, так и на краях обкладок). На рис. 3 приведены зависимости удельной энергии испытанных образцов от ресурса. Также приведена зависимость удельной энергии бумажно-касторовых секций по данным работы [5]. Последняя в 2-3 раза превышает энергию испытанных образцов. Видимо применение стандартной технологии пропитки, принятой для бумажно-касторовых диэлектриков, является некорректным для чисто пленочных конденсаторов, несмотря на то, что электрическая прочность пленки выше до 1,5 раз. Следует отметить, что и ресурс бумажно-касторовой изоляции на напряженностях 125-150 кВ/мм в несколько раз превышает (по данным [6]) ресурс испытанных секций из полипропиленовой пленки, пропитанных нефтяным маслом.

К преимуществам применения пленочной изоляции можно отнести низкий тангенс угла диэлектрических потерь, что дает возможность применять пленочные конденсаторы в частотных режимах (от 10 до 100 Гц), где применение бумажно-касторовых конденсаторов невозможно. Также преимуществом является возможность сокращения времени сушки. При создании специальных малогабаритных конденсаторов с рабочей напряженностью электрического поля более 150 кВ/мм и небольшим ресурсом применение бумажно-касторовой изоляции практически невозможно из-за большой доли отказов при первом же подъеме напряжения [6]. Поэтому при $E_p > 150$ кВ/мм приме-

нение пленочного диэлектрика является оправданным. В тоже время полученные значения ресурса меньше значений ресурса для конденсаторов с другим набором пленок, указанных в работе [3]. Этот факт свидетельствует о необходимости продолжения исследований пленочной изоляции.

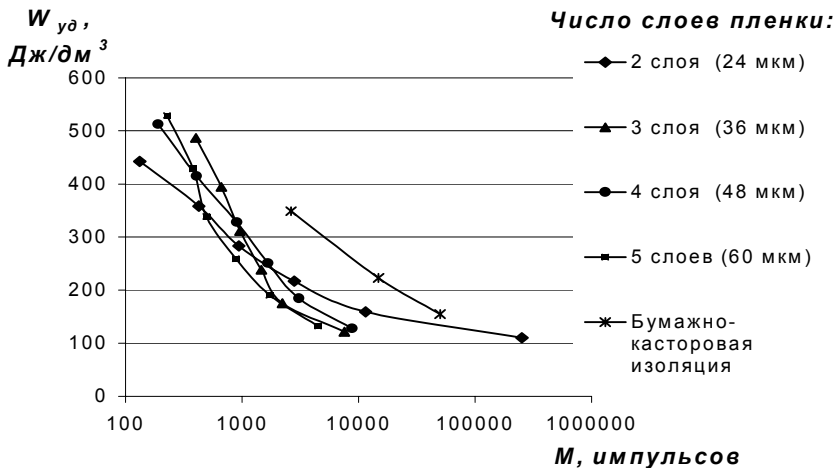


Рисунок 3 – Удельная энергия образцов с пропитанной полипропиленовой изоляцией и с бумажно-касторовой изоляцией

Изменение среднеквадратического отклонения и коэффициента вариации значений ресурсов (вычисленных в предположении, что закон распределения образцов по ресурсу является нормально-логарифмическим) испытанных образцов в зависимости от толщины пленочного диэлектрика представлено на рис. 4.

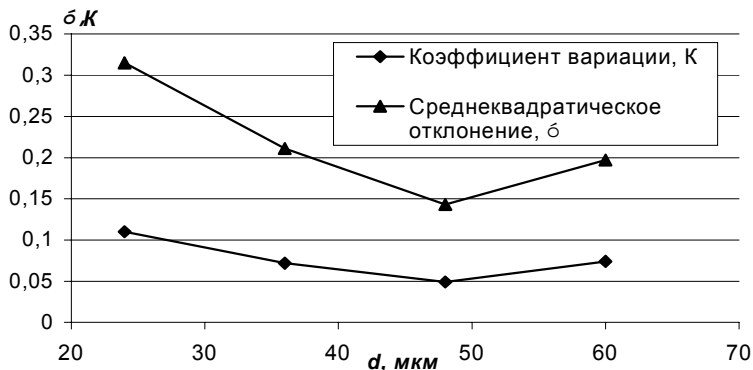


Рисунок 4 – Среднеквадратическое отклонение и коэффициент вариации ресурса испытанных образцов (при $E = 200$ кВ/мм)

Анализ кривых (рис. 4) показывает, что минимальные значения коэффициента вариации и среднеквадратического отклонения достигаются при числе слоев пленки, равном 4, в то время как для бумажного диэлектрика – при 6-ти слоях бумаги.

Выводы:

1. С увеличением числа слоев полипропиленовой пленки ресурс образцов при одинаковом уровне напряженности электрического поля снижается. При 4-х слоях пленки коэффициент вариации имеет минимальное значение.
2. Увеличение емкости пленочных образцов после пропитки незначительно (как и в работе [4]), поэтому значение диэлектрической проницаемости жидкого диэлектрика не является ключевым фактором при его выборе.
3. Кратковременная прочность пленочной полипропиленовой изоляции в 2 раза превышает соответствующую характеристику бумажно-касторового диэлектрика.
4. Ресурс образцов пропитанных трансформаторным маслом в 4-6 раз выше ресурса пленочных образцов с идентичной конструкцией, технологией изготовления и сушки, пропитанных касторовым маслом [4].
5. Ресурс и удельная энергия пропитанной полипропиленовой пленочной изоляции, изготовленной по технологии сушки и пропитки бумажно-касторовой изоляции, в импульсном режиме при напряженности электрического поля 125-150 кВ/мм меньше, чем у бумажно-касторовых секций. Необходимо провести дальнейшие исследования по изменению технологии изготовления.
6. Несмотря на худшие показатели, пропитанные полипропиленовые конденсаторы, можно использовать в частотных режимах, так как они имеют тангенс угла диэлектрических потерь на порядок ниже, а также при создании конденсаторов с высокой напряженностью электрического поля более 150 кВ/мм (с высокой удельной энергией).

Список литературы: 1. Г.С.Кучинский, Н.И.Назаров, Г.Т.Назарова, И.Ф.Переселенцев Силовые электрические конденсаторы. – М., «Энергия», 1975. – 248 с. 2. Бржезицкий В.О., Исакова А.В., Рудаков В.В. та ін. Техніка і електрофізика високих напруг: Навч. посібник / За ред. В.О.Бржезицького та В.М.Михайлова. – Харків: НТУ «ХП»-Торнадо, 2005. – 930 с. 3. Гребенников И.Ю. Гунько В.И., Дмитришин А.Я. и др. Прогнозирование ожидаемого среднего ресурса высоковольтных импульсных конденсаторов с пленочным диэлектриком в зависимости от режимов эксплуатации //Физика импульсных разрядов в конденсированных средах: Материалы XII Межд.научн.школы. – Николаев: КП «Николаевская областная типография», 2005. – С. 125-126. 4. В.В.Рудаков, Ю.В.Кравченко, Д.А.Доценко Ресурс пленочной полипропиленовой изоляции, пропитанной касторовым маслом, в импульсном режиме // Вісник НТУ «ХП». Збірник наукових праць. Тематичний випуск. Техніка і електрофізика високих напруг. – Харків: НТУ

«ХП». – 2006. – № 37. – С. 113-118. 5. В.В.Рудаков, О.Ю.Дубийчук, В.П.Кравченко Предельные удельные характеристики высоковольтных импульсных конденсаторов // Вестник НТУ «ХП». Збірник наукових праць. Тематичний випуск. Електроенергетика і перетворююча техніка. – Харків: НТУ «ХП». – 2004. – № 7. – С. 142-147. 6. Дубийчук О.Ю., Рудаков В.В. Экспериментальное определение показателей надежности секций конденсаторов с бумажно-касторовой изоляцией // Электротехника і електромеханіка. – 2006. – № 1. – С. 71-75.

Поступила в редколлегию 15.05.2007

УДК 622.24.537.528

О.Н.СИЗОНЕНКО, докт.техн.наук, Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины

О ВЛИЯНИИ УДАРНО-ВОЛНОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА НА РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УГЛЕВОДОРОДНЫХ ФЛЮИДОВ

Наведено результати експериментальних досліджень впливу ударно-хвильової електророзрядної дії на нафтову дисперсну систем. Встановлено закономірності зв'язку параметрів дії зі зміною реологічних характеристик вуглеводневого флюїда.

The results of experimental researches of influencing of shock-waving electric discharge on the oil dispersion syste. For the regularities of connection of the electric discharge impact parameters with time dependence of the change of rheological characteristics of hydrocarbon fluid have been determined.

Постановка задачи. Нефть характеризуется довольно обширным комплексом свойств, которые определяют ее поведение при первичной подготовке, транспортировке, в ходе переработки, и существенно влияют на свойства продуктов ее переработки, являющихся то ли полуфабрикатами, то ли конечными материалами, используемыми в различных отраслях производства, в транспорте, в быту. В сложных по составу многокомпонентных нефтяных системах происходят коллективные взаимодействия низко- и высокомолекулярных соединений, в результате чего происходит формирование структурных элементов разных типов.

В частности, аномалии вязкости наблюдаются из-за присутствия в нефти кристалликов высокомолекулярных парафиновых углеводородов или мицелл асфальтенов. Аномалии вязкости усиливаются с увеличением концентрации твердой фазы в нефти и оказывают отрицательное влияние на фильтрацию в пористых средах.

Поэтому разработка научных основ метода изменения структуры угле-