

В. Л. ЧУЛЕЕВ, ведущий инженер НТЦ ПАО «ЗАВОД «ЮЖКАБЕЛЬ», Харьков;

В. М. ЗОЛОТАРЕВ, д-р техн. наук, Генеральный директор ПАО «ЗАВОД «ЮЖКАБЕЛЬ», Харьков;

Е. В. ЧУЛЕЕВА, канд. техн. наук, главный специалист по полимерным материалам НТЦ ПАО «ЗАВОД «ЮЖКАБЕЛЬ», Харьков;

С. Ю. АНТОНЕЦ, начальник лаборатории электрических испытаний и пожарной безопасности ЦЗЛ ПАО «ЗАВОД «ЮЖКАБЕЛЬ», Харьков.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИЙ НА ОСНОВЕ ПОЛИВИНИЛХЛОРИДА ДЛЯ ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ НИЗКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований по определению электрофизических свойств полимерных композиций на основе поливинилхлорида (ПВХ). Изучены влияния ингредиентов на технологические свойства ПВХ композиций. Определены основные отличия электрофизических свойств материалов изоляции в зависимости от водопоглощения.

Ключевые слова: поливинилхлорид (ПВХ), удельное объемное электрическое сопротивление, диэлектрическая проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь, время выдержки в воде, водопоглощение, изоляция, полимерная композиция.

Поливинилхлорид (ПВХ) является одним из наиболее известных многотоннажных и практически важных полимерных продуктов. На его основе получают полумягкие и мягкие (пластифицированные) полимерные композиции, используемые в производстве кабелей и проводов.

Основной проблемой ПВХ является его весьма низкая стабильность. Поэтому при хранении, переработке и эксплуатации ПВХ, а также при получении, хранении и использовании полимерных композиций и кабельно-проводниковой продукции (КПП) на его основе необходимо применять совокупность методов, приводящих к повышению устойчивости ПВХ к действию различных факторов, к его стабилизации [1].

В [2] показана эффективность использования сочетания солей

© Чулеев В. Л., Золотарев В. М., Чулеева Е. В., Антоненц С. Ю., 2014

органических кислот Ca и Zn при получении нетоксичных материалов из ПВХ для изоляции кабельной продукции.

Целью настоящей работы являлось исследование электрофизических свойств вышеуказанных поливинилхлоридных изоляционных композиций для низковольтных силовых кабелей.

Электрофизические свойства характеризуются величинами удельного электрического сопротивления, электрической прочности (прочности на пробой), диэлектрической проницаемости и диэлектрических потерь. Значение этих характеристик и их зависимости от агрессивных факторов (в частности влагопоглощение), температуры и частоты электрического поля определяют выбор ПВХ изоляционных композиций.

Удельное электрическое сопротивление определяется наличием свободных зарядов (электронов и ионов) и их подвижностью.

Электрическая прочность – напряженность электрического поля, при которой происходит пробой – мера электрической прочности данного материала.

Диэлектрическая проницаемость композиционного материала определяется отношением емкости электрического конденсатора, заполненного диэлектриком к емкости того же конденсатора в вакууме.

Под диэлектрическими потерями понимают часть энергии электрического поля, которая необратимо рассеивается в диэлектрике в форме теплоты.

Требования к полимерным композициям для низковольтных силовых кабелей низкого напряжения определяется [3, 4].

Максимальная температура эксплуатации полимерных композиций (максимальная температура токопроводящей жилы в нормальном режиме работы) 343 К.

Материалы предназначены для использования при изготовлении низковольтных силовых кабелей и подразделяются на:

- общего назначения;
- для гибких кабелей (в том числе с прозрачной изоляцией);
- для использования при низких температурах;
- гибкие, общего назначения, которые используют при низких температурах.

Для исследований использовались образцы ПВХ композиций для изоляции, состав которых приведен в [2].

Промышленные партии изготавливались на линии компаундирования ПВХ пластикатов фирмы X-Compound. Наложение изоляции на КПП производили на линиях изолирования ME 160, ME

90. Регулирование свойств осуществлялось также использованием оптимального количества пластификаторов в соответствии с [5]. Свойства исследуемых композиций приведены в таблице.

Таблица. Свойства исследуемых композиций

№ п/п	Наименование показателей	Тип композиции			
		1	2	3	4
1	Тип	Для гибких кабелей (в том числе с прозрачной изоляцией)	Для использования при низких температурах	Общего назначения	Гибкие, общего назначения для использования при низких температурах
2	Показатель текучести расплава, г/10мин, T = 463 К, 10 кг	15,3	10,7	14,3	14,7
3	Время выдержки до появления черной окраски, мин, при T = 463 К	90	120	120	135
4	Максимальный крутящий момент, T = 463 К, v = 30 об/мин	39,0	32,0	46,8	38,2
5	Равновесный крутящий момент, Н·м, T = 463 К, v = 30 об/мин	28,8	23,8	30,1	26,4
6	Удельное объемное электрическое сопротивление при T = 293 К, Ом·см	$1,6 \cdot 10^{14}$	$3,0 \cdot 10^{14}$	$2,1 \cdot 10^{14}$	$2,2 \cdot 10^{14}$
7	Прочность при разрыве, МПа	265,5	270,6	267,0	268,5
8	Относительное удлинение при разрыве, %	314,6	317,3	324,0	340,0
9	Потеря массы при T = 433 К в течение 6 ч, %	2,2	1,7	1,6	1,4
10	Сохранение прочности при разрыве после выдержки при T = 373 ± 2 К в течение 168 ч, МПа (%)	264,8 (99,8)	232,9 (86,0)	274,2 (92,6)	247,8 (92,3)
11	Сохранение относительного удлинения при разрыве после выдержки при T = 373 ± 2 К в течение 168 ч, % (%)	260 (82,6)	260 (82,0)	268 (82,7)	280 (82,3)

Сравнительный анализ разработанных полимерных композиций показывает, что во всех случаях присутствие в полимерных

композициях эпоксидированного соевого масла (ЭСМ), приводит к повышению текучести расплава и увеличению термостабильности. Одновременно более высокие значения термостабильности наблюдаются при введении в полимерные композиции антиоксидантов фенольного типа и серосодержащих соединений.

Вместе с тем ПТР и термостабильность полимерных композиций при 463 К не позволяет однозначно делать вывод о поведении ПВХ композиций при переработке. Для определения технологических свойств ПВХ композиций близких к переработке (при тепловом воздействии и условиях деформаций сдвига одновременно) определяли максимальный крутящий момент и равновесный крутящий момент на приборе «Brabender Plasticorder» при температуре 463 К и скорости вращения 30 об/мин.

Результаты этих исследований показывают высокие максимальный и равновесный крутящие моменты для композиции № 3, более низкие – для композиции № 2. Это свидетельствует о необходимости переработки материала соответственно при высоких и низких напряжениях сдвига.

Физико-механические характеристики исследуемых полимерных композиций значительно превышают требования нормативной документации [3].

Подготовку образцов для исследований электрофизических свойств проводили в соответствии с [6 – 9].

Измерение объемного электрического сопротивления осуществляли с помощью кабельного измерителя сопротивления изоляции «КИСИ-1» при напряжении 1000 В с допускаемой основной погрешностью ± 10 %.

Измерение тангенса угла диэлектрических потерь и электрической емкости (для дальнейшего расчета диэлектрической проницаемости среды) осуществляли с помощью моста переменного тока Р 589 при напряжении 24 В частотой 1 кГц с допускаемой основной погрешностью ± 0,1 % при измерении емкости и ± $(0,02 \cdot \text{tg}\delta + 3 \cdot 10^{-4})$ при измерении тангенса угла диэлектрических потерь.

Обработка результатов осуществлялась при помощи стандартной компьютерной программы Microsoft Excel. Графические зависимости строились с помощью программы Graph 3D.

Измерение электрофизических показателей ПВХ композиций производились на образцах толщиной $1,0 \pm 0,1$ мм изготовленных вальцево-прессованным методом по [7] при T = 293 К.

Расчеты вышеуказанных параметров проводили по формулам:

1. Удельное объемное электрическое сопротивление

$$\rho_v = \frac{\pi \cdot \left(\frac{d_1 + d_2}{2}\right)^2}{4 \cdot t} \cdot R_v,$$

где d_1 – диаметр измерительного электрода, м;
 d_2 – внутренний диаметр охранного электрода, м;
 t – толщина образца;
 R_v – измеренное сопротивление, Ом.

2. Диэлектрическая проницаемость среды

$$\varepsilon = 0,144 \cdot C_x \cdot \frac{t}{\left(\frac{d_1 + d_2}{2}\right)^2},$$

где d_1 – диаметр измерительного электрода, м;
 d_2 – внутренний диаметр охранного электрода, м;
 t – толщина образца;
 C_x – измеренная емкость, пФ.

3. Тангенс угла диэлектрических потерь

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{\omega \cdot C_{\text{пар}} \cdot R_{\text{пар}}} = \omega \cdot C_{\text{посл}} \cdot R_{\text{посл}},$$

где ω – угловая частота, рад/с;

$C_{\text{пар}}$ – измеренная емкость в эквивалентной параллельной схеме замещения, пФ;

$R_{\text{пар}}$ – измеренное сопротивление в эквивалентной параллельной схеме замещения, Ом;

$C_{\text{посл}}$ – измеренная емкость в эквивалентной последовательной схеме замещения, пФ;

$R_{\text{посл}}$ – измеренное сопротивление в эквивалентной последовательной схеме замещения, Ом.

Представляет интерес изменения электрофизических свойств полимерных композиций после воздействия воды.

Зависимость водопоглощения от времени выдержки образцов в воде представлена на рис. 1.

Определение электрофизических показателей полимерных композиций проводили после выдержки в воде.

По полученным результатам строили графики зависимости удельного объемного электрического сопротивления, диэлектрической проницаемости, тангенса угла диэлектрических потерь от времени выдержки в воде при $T = 293 \text{ K}$ (рис. 2, 3, 4).

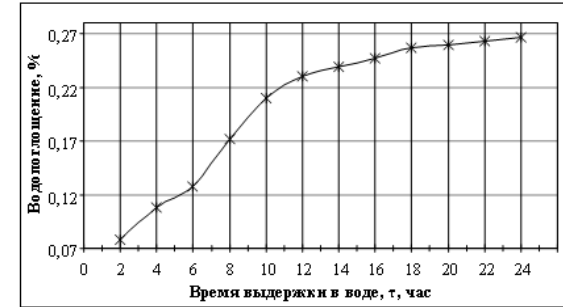


Рис. 1 – Зависимость водопоглощения от времени выдержки в воде

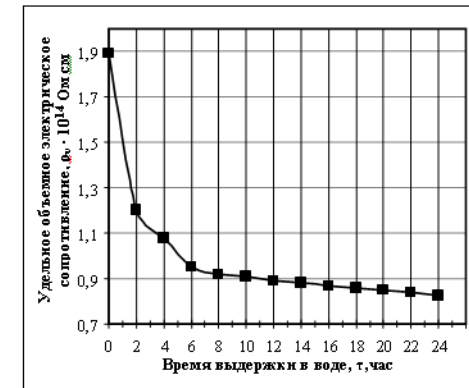


Рис. 2 – Зависимость удельного объемного электрического сопротивления от времени выдержки в воде при $T = 293 \text{ K}$

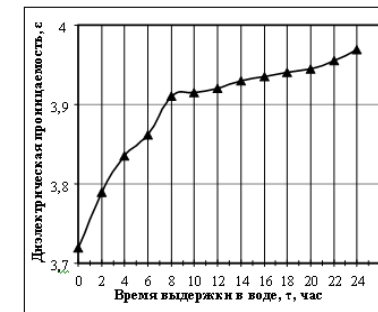


Рис. 3 – Зависимость диэлектрической проницаемости от времени выдержки в воде при $T = 293 \text{ K}$

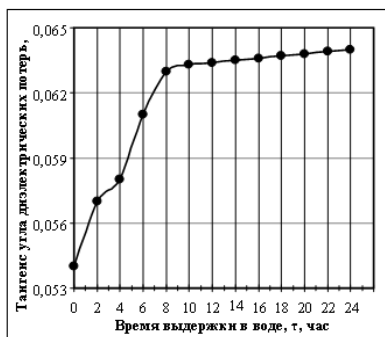


Рис. 4 – Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь от времени выдержки в воде при $T = 293 \text{ K}$

Анализ полученных результатов позволяет определить те участки на шкале времени, на которых наблюдается наиболее динамичное изменение электрофизических параметров. Наиболее выражено происходит снижение параметров ρ_v (удельное объемное электрическое сопротивление), а также рост параметра $\text{tg}\delta$ (тангенса угла диэлектрических потерь) и ϵ (диэлектрическая проницаемость), до 8 ч. пребывания в воде.

Дальнейший процесс выдержки образцов в воде мало влияет на изменение вышеуказанных характеристик полимерных композиций.

Данные исследований и проведенных расчетов подтверждаются высокими значениями корреляции вышеуказанных характеристик на всем участке времени $|K| = [0,883; 0,981]$.

Таким образом, разработанные композиции на основе ПВХ для изоляции силовых кабелей низкого напряжения имеют высокие технологические, физико-механические, а также электрофизические характеристики.

Список литературы: 1. Горение, деструкция и стабилизация полимеров под редакцией д-ра хим. наук Заикова Г. Е. NOT. Санкт-Петербург, 2008; 2. Чулеева Е. В., Чулеев В. Л., Золотарев В. М., Василец Л. Г. Композиционные материалы на основе поливинилхлорида. Теплофизические, реологические и электрофизические свойства // Хімічна промисловість України. 2011., № 6., С 48–54; 3. DSTU EN 50363-3:2010 Матеріали для ізоляції, оболонки і зовнішніх покривів низьконапружних силових кабелів. Частина 3. ПВХ ізоляційні композиції (EN 50363-3:2005, IDT); 4. EN 50395:2005 Electrical test methods for low voltage energy cables; 5. Золотарев В. М., Чулеева Е. В., Чулеев В. Л. Регулирование свойств композиций на основе поливинилхлорида с использованием стабилизаторов, не содержащих свинец, для изоляции кабельной

продукции // Електротехніка і електромеханіка. 2013., № 2013/4., С 54–59; 6. ГОСТ 5960-72 Пластикат поливинилхлоридный для изоляции и защитных оболочек проводов и кабелей. Технические условия; 7. ГОСТ 6433.1 – 71 (СТ СЭВ 2121-80) Материалы электроизоляционные твердые. Условия окружающей среды при нормализации, кондиционировании и испытании; 8. ГОСТ 6433.2 – 71 (СТ СЭВ 2121-80) Материалы электроизоляционные твердые. Методы определения электрических сопротивлений при постоянном напряжении; 9. ГОСТ 6433.4 – 71 (СТ СЭВ 3164-80) Материалы электроизоляционные твердые. Методы определения тангенса угла диэлектрических потерь и диэлектрической проницаемости при частоте 50 Гц.

Bibliography (transliterated): 1. Gorenje, destrukcija i stabilizacija polimerov pod redakciej d-ra him. nauk Zaikova G. E. NOT. Sankt-Peterburg, 2008; 2. Chuleeva E. V., Chuleev V. L., Zolotarev V. M., Vasilec L. G. Kompozicionnye materialy na osnove polivinilhlorida. Teplofizicheskie, reologicheskie i jelektrofizicheskie svojstva. *Himichna promislovist' Ukraini*. 2011. No 6. 48–54 Print. 3. DSTU EN 50363-3:2010 Materiali dlja izoljacii, obolonok i zovnishnih pokriviv niz'konapruzhnih silovih kabeliv. Chastina 3. PVH izoljacijni kompozicii (EN 50363-3:2005, IDT); 4. EN 50395:2005 Electrical test methods for low voltage energy cables; 5. Zolotarev V. M., Chuleeva E. V., Chuleev V. L. Regulirovanie svojstv kompozicij na osnove polivinilhlorida s ispol'zovaniem stabilizatorov, ne sodержashhh svinec, dlja izoljacii kabel'noj produkcii. *Elektrotehnika i elektromehanika*. 2013. No 4. 54–59 Print. 6. GOST 5960-72 Plastikat polivinilhlordnyj dlja izoljacii i zashhitnyh obolochek provodov i kabelej. Tehnicheskie uslovija; 7. GOST 6433.1 – 71 (ST SJeV 2121-80) Materialy jelektroizoljacionnye tverdye. Uslovija okružhajushhej sredy pri normalizacii, kondicionirovanii i ispytanii; 8. GOST 6433.2 – 71 (ST SJeV 2121-80) Materialy jelektroizoljacionnye tverdye. Metody opredelenija jelektricheskikh soprotivlenij pri postojannom naprjazhenii; 9. GOST 6433.4 – 71 (ST SJeV 3164-80) Materialy jelektroizoljacionnye tverdye. Metody opredelenija tangensa ugla dijelektricheskikh poter' i dijelektricheskoi pronicemosti pri chastote 50 Gc.

Надійшла (received) 08.03.2014