

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ НАНОМОДИФІКОВАНИХ ПОЖЕЖОБЕЗПЕЧНИХ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙ КОПОЛІМЕРУ ЕТИЛЕНУ З ВІНІЛАЦЕТАТОМ

Чулєєва О. В.

1. Вступ

До теперішнього часу у кабельній промисловості широко застосовувалися галогеновмістні полімерні композиції. За останні роки підвищилися технічні вимоги щодо кабельних виробів та, як слідство, необхідність розробки нових прогресивних матеріалів, в тому числі пожежобезпечних полімерних композиційних матеріалів. Композиційні пожежобезпечні матеріали поліолефінів є дуже перспективними. Це пов'язано зі зростаючим використанням проводів та кабелів для енергетичної галузі, атомної енергетики, залізничного транспорту, будівництва тощо. У цих галузях вимоги до матеріалів кабелів з пожежної безпеки значно вищі, ніж для кабелів загального призначення. Матеріали ізоляції та оболонки мають відповідати рівню Європейських стандартів. Необхідно створювати матеріали спеціального призначення, які задовольняють специфічним експлуатаційним потребам – не розповсюдження горіння та відсутність в складі матеріалу галогенів, зниження диму та токсичності продуктів горіння.

Створення безгалогенних рецептур досягається за рахунок введення в базовий полімер антипіренів – гідроксидів металів. Промислове використання отримали гідроксиди алюмінію $Al(OH)_3$ та магнію $Mg(OH)_2$, синтетичного та природного походження, гідромагнезити. Переробка таких матеріалів викликає складнощі, що зумовлено великим вмістом наповнювачів-антипіренів. Для регулювання реологічних властивостей полімерних композицій використовують модифікатор [1].

Основними технічними характеристиками для пожежобезпечних полімерних композицій впродовж експлуатації є електрофізичні показники. Однак, дослідження їх проведено недостатньо. Тому дослідження залежності електрофізичних властивостей від складу полімерних композицій, враховуючи модифікатор, хімічний склад, дисперсність наповнювачів-антипіренів, є актуальною проблемою.

2. Об'єкт дослідження та його технологічний аудит

Об'єктом дослідження є електрофізичні властивості пожежобезпечних композиційних матеріалів етилену з вінілацетатом, до складу яких входять наповнювачі-антипірени та модифікатори. З метою забезпечення показників негорючості полімерні композиції мають високий ступень наповнення до 60 % мас. Використовували полімерну матрицю – кополімер етилену з вінілацетатом. Неорганічні наповнювачі-антипірени – тригідрати оксиду алюмінію, дигідрати оксиду магнію та гідромагнезит.

Одним з найбільш проблемних місць є отримання стабільних електрофізичних властивостей за такого високого рівня наповнення полімерної композиції. Для

забезпечення рівня електрофізичних показників, який відповідає нормативній документації, в полімерні композиції вводили модифікатори – аміносилани.

3. Мета та задачі дослідження

Метою досліджень є вивчення зміни електрофізичних властивостей пожежобезпечних композиційних матеріалів кополімеру етилену з вінілацетатом в залежності від концентрації модифікатора, типу та дисперсності наповнювача-антипірену.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати наступні задачі:

1. Дослідити електричну міцність полімерних композицій.
2. Дослідити питомий об'ємний електричний опір полімерних композицій.
3. Дослідити тангенс кута діелектричних втрат та діелектричну проникність полімерних композицій.

4. Дослідження існуючих рішень проблеми

Аналіз літературних даних демонструє, що одним із засобів зниження горючості полімерних матеріалів поліолефінів є введення до полімерної композиції наповнювачів-антипіренів [2]. З цією метою використовують неорганічні наповнювачі-антипірени [3]. В умовах реальної пожежі –пластикати полівінілхлориду (ПВХ), що є елементами кабелів, які мають значення кисневого індексу (КІ) до 40 одиниць, є джерелом виділення корозійноактивних газів хлористого водню (HCl) та значного задимлення. Тому, з метою вирішення проблем, що пов'язані з виділенням HCl та задимленням, було створено полімерні композиції, які не виділяють корозійноактивних газів та мають значно нижчий рівень виділення диму [4]. Ці матеріали не тільки збільшують вогнестійкість за рахунок поглинання більшої кількості тепла, але й нейтралізують кислі гази, що призводить до зниження димоутворення [5]. В якості полімерної бази цих матеріалів зазвичай використовують поліолефіни, а в якості антипіренів – тригідрати оксиду алюмінію, дигідрати оксиду магнію, магnezити. Даному напрямку присвячується значна кількість досліджень. Вивчалися механічні та вогнестійкі властивості композиційних матеріалів кополімеру етилену з вінілацетатом (КЕВ) та тригідрату оксиду алюмінію з різним діаметром часточок, та визначено зміну цих властивостей в залежності від дисперсності наповнювача [6]. Показано ефективність використання гідроксиду кальцію з метою підвищення вогнестійкості поліетилену середньої густини [7]. Вивчали вогнетривкі властивості композиційних матеріалів, базовим полімером в яких є поліетилен низької густини/кополімер етилену з вінілацетатом (LDPE/EVA). В якості наповнювачів-антипіренів використовували гідроксиди металів (гідроксид магнію та тригідрат оксиду алюмінію). Вогнетривкі властивості оцінювали за горизонтальним горінням та за кисневим індексом [8]. За допомогою методів термогравіметричного аналізу (TGA) та диференційної скануючої калориметрії (DSC) проводились дослідження полімерних композицій з використанням в якості антипірену діоксиду магнію. Визначали теплоємність цих матеріалів [9].

Досліджено вогнестійкість кополімеру етилену з вінілацетатом, який наповнювали гідроксидами металів (тригідратом оксиду алюмінію та дигідратами оксиду магнію) та діоксидом кремнію. Було відзначено, що

кремнезем забезпечує перевагу, якщо кількість та інші властивості наповнювачів сприяють утворенню захисного мінерального шару [10].

Встановлено, що задля забезпечення пожежобезпечних властивостей композиційних матеріалів для ізоляції та оболонок кабелів та кращої безпеки електричного обладнання та пристроїв, має бути дуже високий ступень наповнення полімерної матриці гідратами металів. Це може призвести до втрати гнучкості та низьким механічним властивостям з одночасними проблемами під час переробки [11].

Вивчали можливість використання гідроксиду магнію, борату цинку та їх сумісну дію як інгібітору горіння поліпропіленового волокна. Показана ефективність використання борату цинку. Використання гідроксиду магнію є малоефективним. Перевірялись теплові, механічні та морфологічні властивості [12].

Показано ефективність використання аміноалкоксисиланів як апретів [13] для поліпшення контактів полімер-наповнювач в композиційних матеріалах та обробки неорганічних субстратів для підвищення адгезії різних полімерів і покриттів [14, 15].

Інформація з використання аміноалкоксисиланів для модифікації пожежобезпечних полімерних композицій, зокрема на основі кополімерів етилену з вінілацетатом, в літературі практично відсутні.

Наведені дослідження показують, що властивості полімерних композицій змінюються в залежності від складу. Рівень електрофізичних властивостей пожежобезпечних полімерних композиційних матеріалів впродовж експлуатації кабельної продукції має важливе значення. Однак, багато запитань, які пов'язані зі створенням пожежобезпечних полімерних композицій все ще недостатньо вивчені. Особливо це стосується впливу модифікатора, наповнювачів-антипіренів та полімерної матриці на електрофізичні властивості.

5. Методи дослідження

Досліджували кополімери етилену з вінілацетатом (КЕВ-1, КЕВ-2), характеристики яких наведено в табл. 1, а також наповнювачі-антипірени, в якості яких використовували тригідрати оксиду алюмінію, дигідрати оксиду магнію, суміш магнезиту і гідромагнезиту.

Таблиця 1

Характеристики кополімерів етилену з вінілацетатом (КЕВ)

Показник	КЕВ-1	КЕВ-2
Густина, кг/м ³	939	951
Показник плинності розплаву, 2,16 кг, г/10 хв	2,5	5
Вміст вінілацетату, %	18	28

Характеристики наповнювачів-антипіренів наведено в табл. 2. Модифікатор 1 – аminosилан (3-аминопропил-триетоксисилан); модифікатор 2 – аminosилан (N-(3-триметоксисилан) пропілбутіламін). Характеристики наведено в табл. 3.

Таблиця 2

Характеристики наповнювачів-антипіренів

Показник	Al(OH) ₃		Mg(OH) ₂		Mg ₅ (CO ₃) ₄ (OH) ₂ ·4H ₂ O; Mg ₃ Ca(CO ₃) ₄
	Зразок № 1	Зразок № 2	Зразок № 3	Зразок № 4	Зразок № 5
Масова доля, %:					
– Mg(OH) ₂	–	–	>93	>93,2	98,96
– Al(OH) ₃	>99,2	>99,5	–	–	–
– SiO ₂	<0,05	<0,1	<0,05	2,2±0,2	0,67
– Fe ₂ O ₃	<0,035	<0,03	<0,3	0,12±0,02	0,04
– Na ₂ O	<0,6	<0,4	<0,05	–	<0,05
– CaO	–	–	–	2,2±0,2	–
Медіанний діаметр часточок, мкм:					
– середній (D ₅₀)	1,5	3	3	3,7	1,4
– максимальний (D ₉₈)	3,6	18	20	12,5	8,35
– мінімальний (D ₁₀)	0,5	1	1	1,1	1,02

Таблиця 3

Характеристики аміносилану

Показник	Значення	
	Аміносилан 1	Аміносилан 2
Густина, кг/м ³ , 20 °С	950	947
Динамічна в'язкість, мПа·с, 20 °С	2	2,5
pH	11,3	10,9

Інгредієнти полімерних композицій зважували на вагах з точністю до 0,001 г та послідовно завантажували на вальці. Температура робочого валка (443±5) К. Температура холодного валка (438±5) К. Зразки вальцювали 3 хв на зазорі 0,4–0,5 мм. Потім зазор корегували до 2 мм. В процесі вальцювання періодично підрізали не менше ніж 2 рази за хвилину. Останню хвилину вальцювали без підрізів.

Зразки кондиціювали за температури (293±2) К не менше ніж 24 години.

Вальці мають фрикцію 1,5.

Вимірювання електрофізичних показників полімерних композицій проводилися на зразках товщиною (1,0±0,1) мм, виготовлених вальцево-пресовим методом за $T=448$ К.

Серію експериментів з визначення електричної міцності, питомого електричного опору, діелектричної проникності, тангенса кута діелектричних втрат було проведено з використанням апарату типу АІІІ-70 (Росія), вимірювача електричного опору КІСІ-1 (Росія), мосту змінного струму Р589 (Росія).

Питомий електричний опір визначається наявністю вільних зарядів (електронів та іонів) і їх рухливістю. Електрична міцність – напруженість електричного поля, за значення якої відбувається пробій, – міра електричної міцності даного матеріалу.

Діелектрична проникність композиційного матеріалу визначається відношенням ємності електричного конденсатора, який заповнено діелектриком до ємності того ж конденсатора у вакуумі.

Під діелектричними втратами розуміють частину енергії електричного поля, яка незворотно розсіюється в діелектрику в формі теплоти.

Обробку результатів та побудову графіків виконували за допомогою програмного забезпечення Microsoft Office Excel 2007.

Адекватність рівняння регресії проводили перевіркою статистичної значимості коефіцієнта детермінації R^2 по F -критерію, визначеному за формулою [16]:

$$F_p = \frac{R^2}{1-R^2} \cdot \frac{n-m-1}{m},$$

де n – кількість спостережень; m – кількість факторів у рівнянні регресії.

6. Результати досліджень

Вимірювання електричної міцності полімерних композицій проводили змінною напругою до 50 кВ та частотою 50 Гц. Результати досліджень наведено на рис. 1, 2.

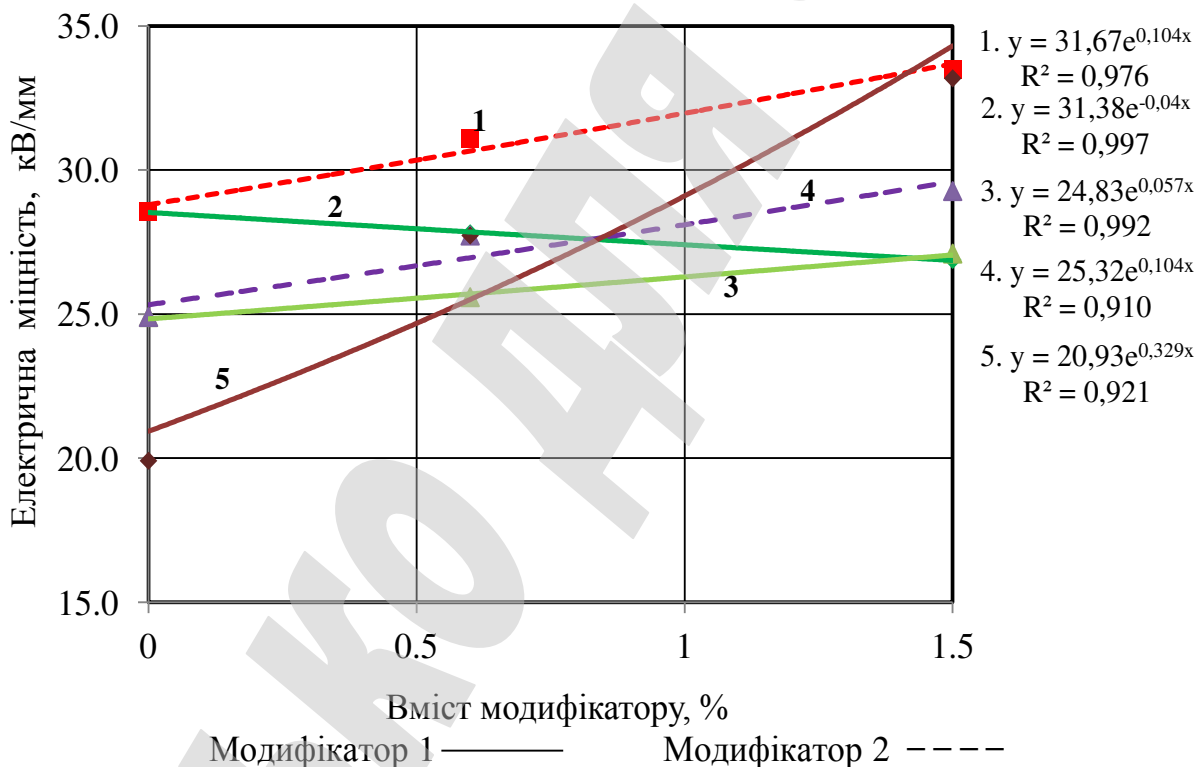


Рис. 1. Залежність електричної міцності від вмісту модифікатору для полімерних композицій на основі КЕВ-1 та антипіренів (1, 4, 5):
1, 2 – антипірен 1; 3, 4 – антипірен 4; 5 – антипірен 5

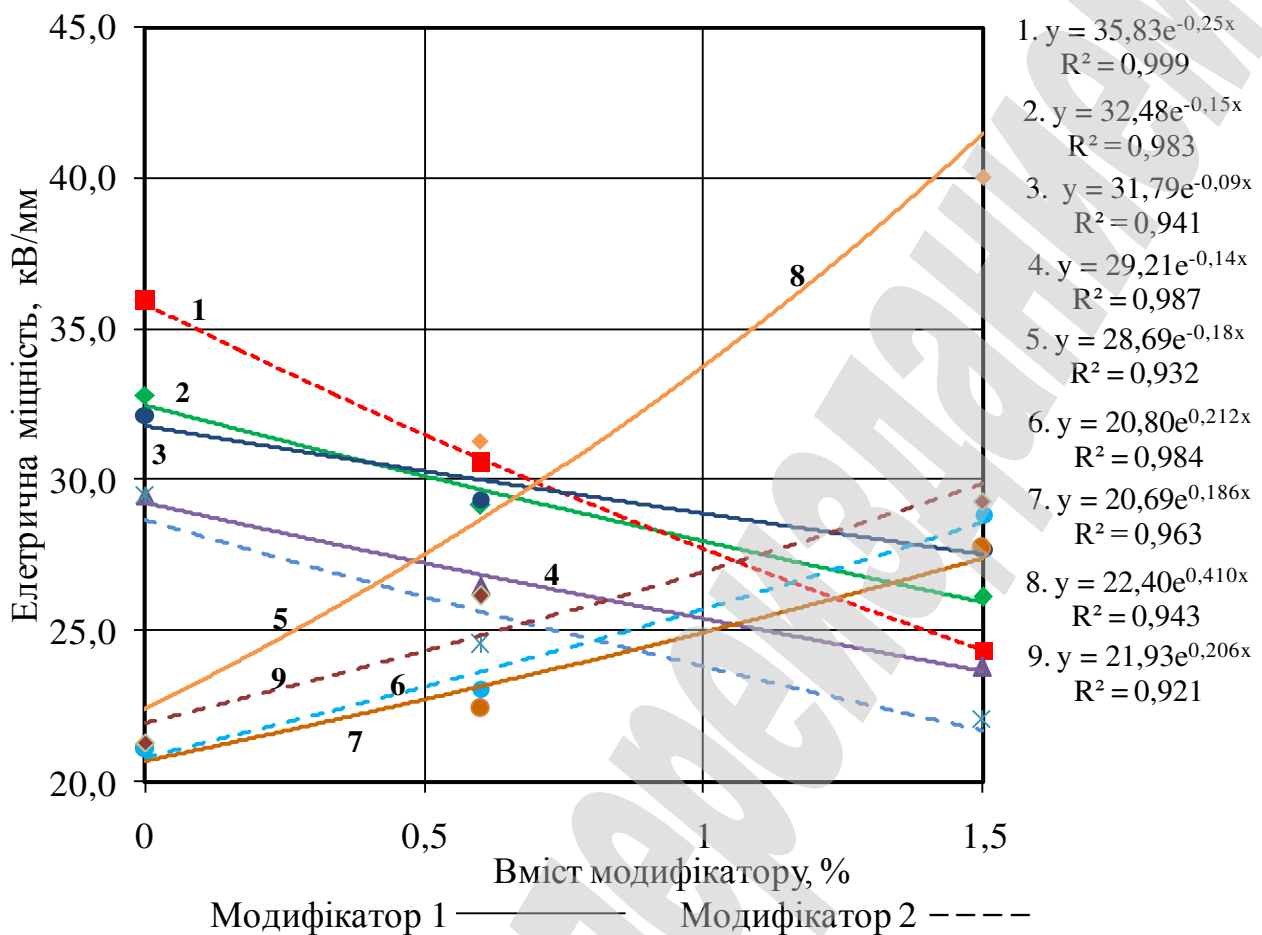


Рис. 2. Залежність електричної міцності від вмісту модифікатора для полімерних композицій на основі КЕВ-2 та антипіренів (1–5): 1, 2 – антипірен 1; 3 – антипірен 2; 4, 5 – антипірен 3; 6, 7 – антипірен 4; 8, 9 – антипірен 5

Вимірювання об'ємного електричного опору здійснювалися за допомогою кабельного вимірювача опору ізоляції КИСИ-1 за напруги 1000 В.

Розрахунок питомого об'ємного електричного опору проводили за формулою:

$$\rho_v = \frac{\pi \cdot \left(\frac{d_1 + d_2}{2}\right)^2}{4 \cdot t} \cdot R_v, \quad (1)$$

де d_1 – діаметр вимірювального електроду, м; d_2 – внутрішній діаметр охоронного електроду, м; t – товщина зразка; R_v – виміряний опір, Ом.

Результати досліджень наведено на рис. 3, 4.

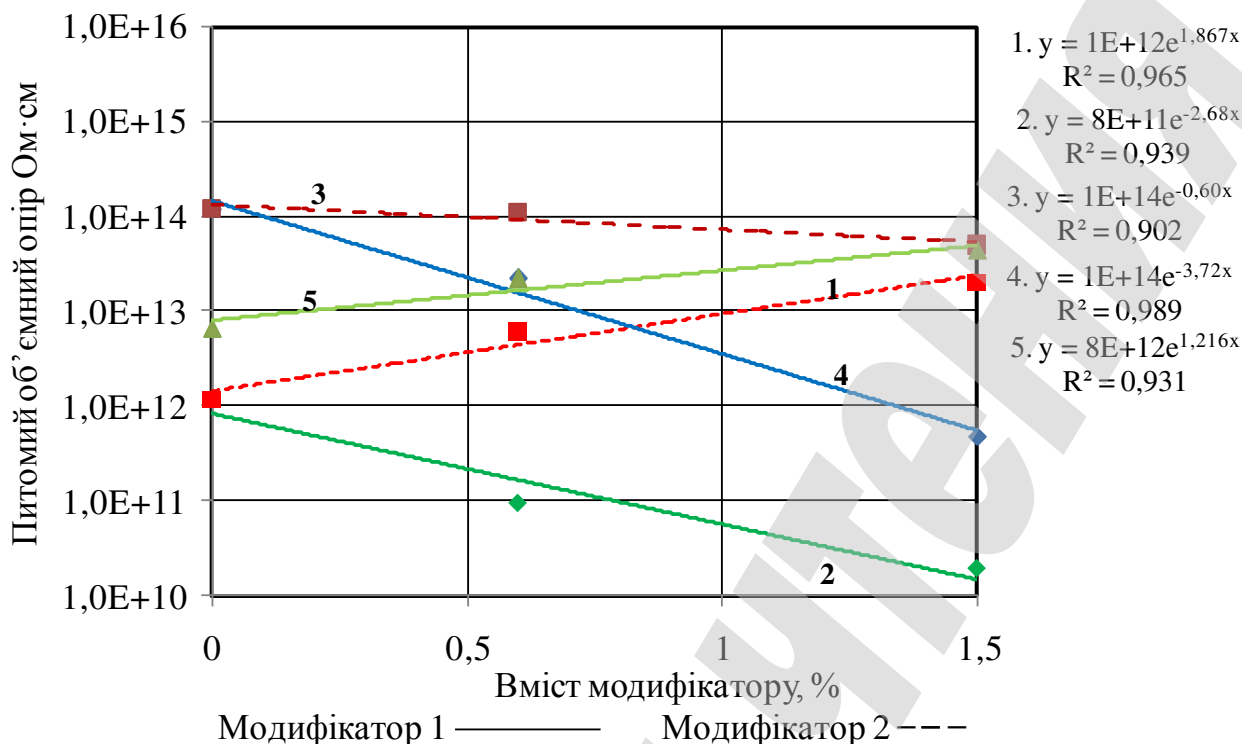


Рис. 3. Залежність питомого об'ємного опору від вмісту модифікатору полімерних композицій на основі КЕВ-1 з антипіренами (1, 4, 5):
 1, 2 – антипірен 1; 3, 4 – антипірен 4; 5 – антипірен 5

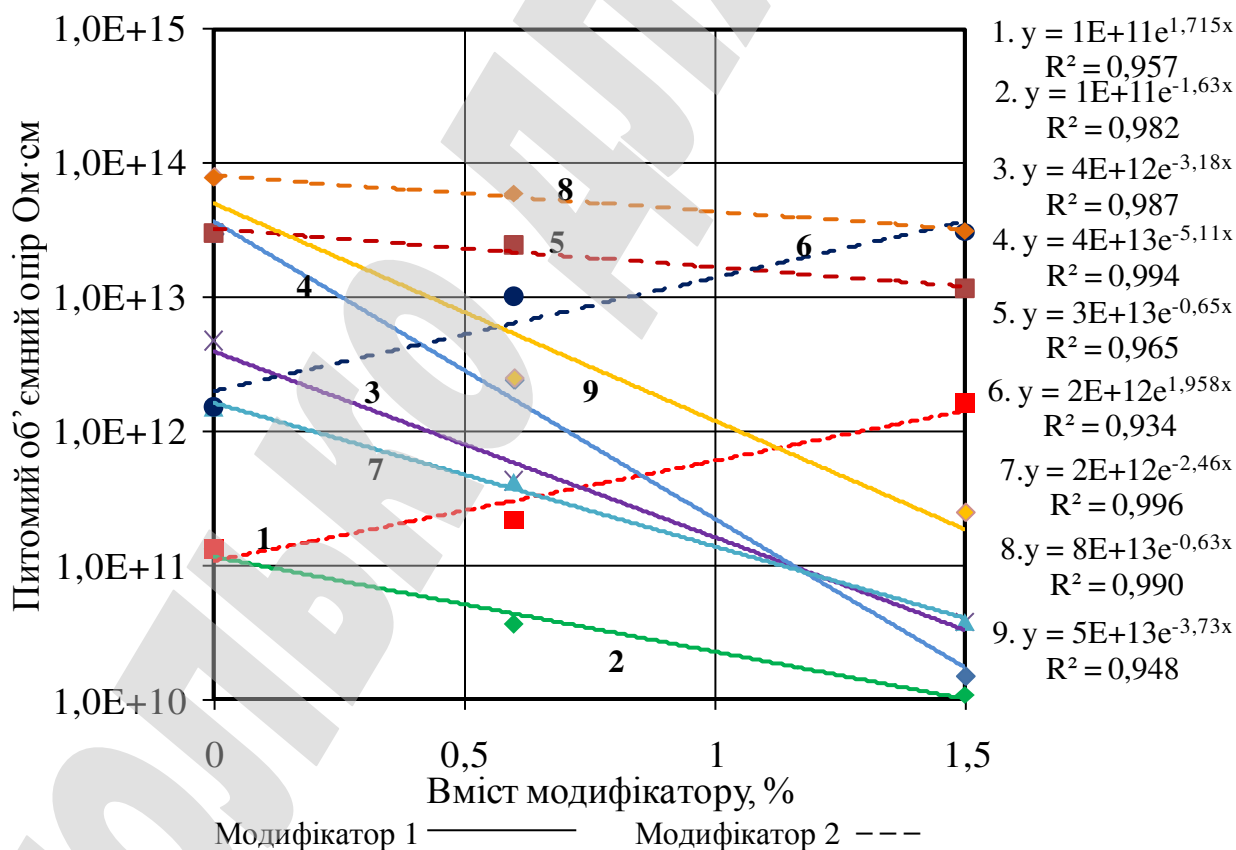


Рис. 4. Залежність питомого об'ємного опору від вмісту модифікатору полімерних композицій на основі КЕВ-2 з антипіренами (1–5): 1, 2 – антипірен 1; 3 – антипірен 2; 4, 5 – антипірен 3; 6, 7 – антипірен 4; 8, 9 – антипірен 5

Полімерні композиції містять неоднорідності і домішки у вигляді другої фази, результатом чого є зміна діелектричних властивостей – ефект Максвелла-Вангера. Найпоширеніший вид неоднорідностей – наявність пустот. За цих умов діелектрична проникність просто зменшується на значення, що залежить від обсягу і розподілу повітря, яке розміщено в них. Набагато більшого ефекту можна очікувати від наявності в ізоляційному матеріалі включень води. Подібні матеріали поведуться як тривимірні сітки, що викликає появу вкладу в діелектричну проникність, який залежить від частоти і втрати від струмів, що виникають в струмопровідних ізольованих зразках. Тому перспективним є дослідження питомого об'ємного опору полімерних композицій після впливу води, в результаті чого підвищується вміст вологи. Результати досліджень наведено на рис. 5–9.

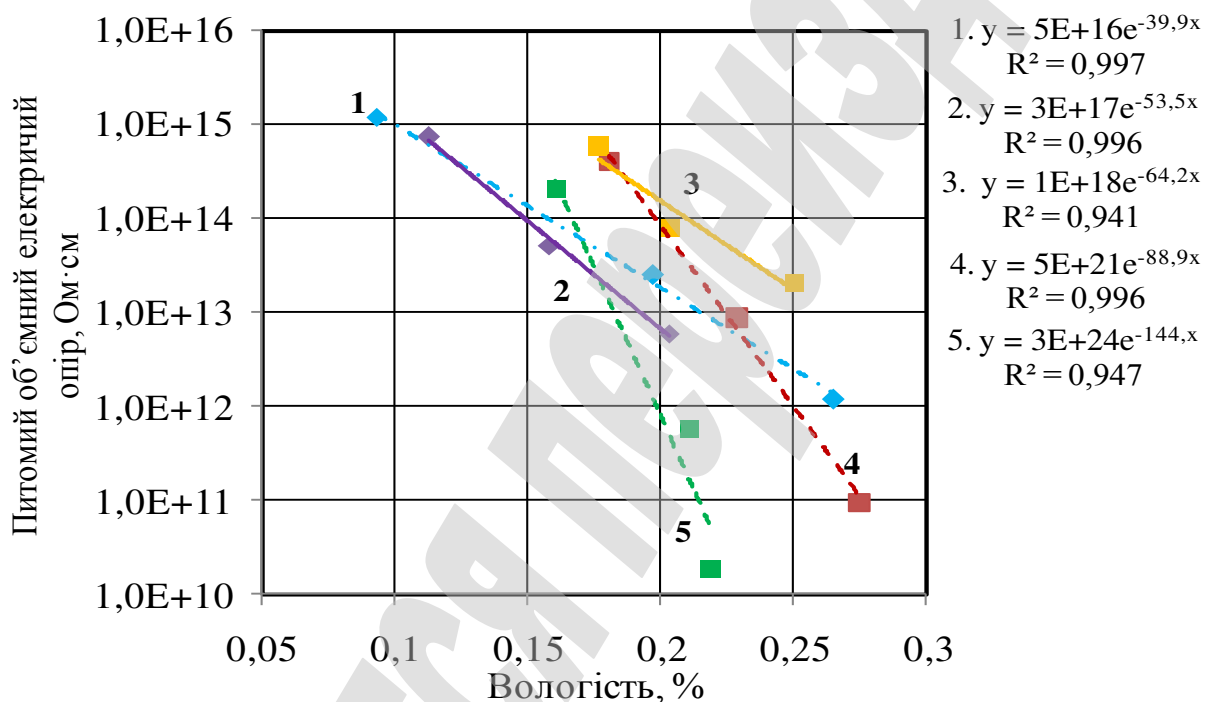


Рис. 5. Залежність питомого об'ємного електричного опору від вологості полімерних композицій на основі КЕВ-1 антипірену (зразок 1) та модифікаторів: 1 – без модифікатора; 2 – 0,6 % модифікатора 1; 3 – 1,5 % модифікатора 1; 4 – 0,6 % модифікатора 2; 5 – 1,5 % модифікатора 2

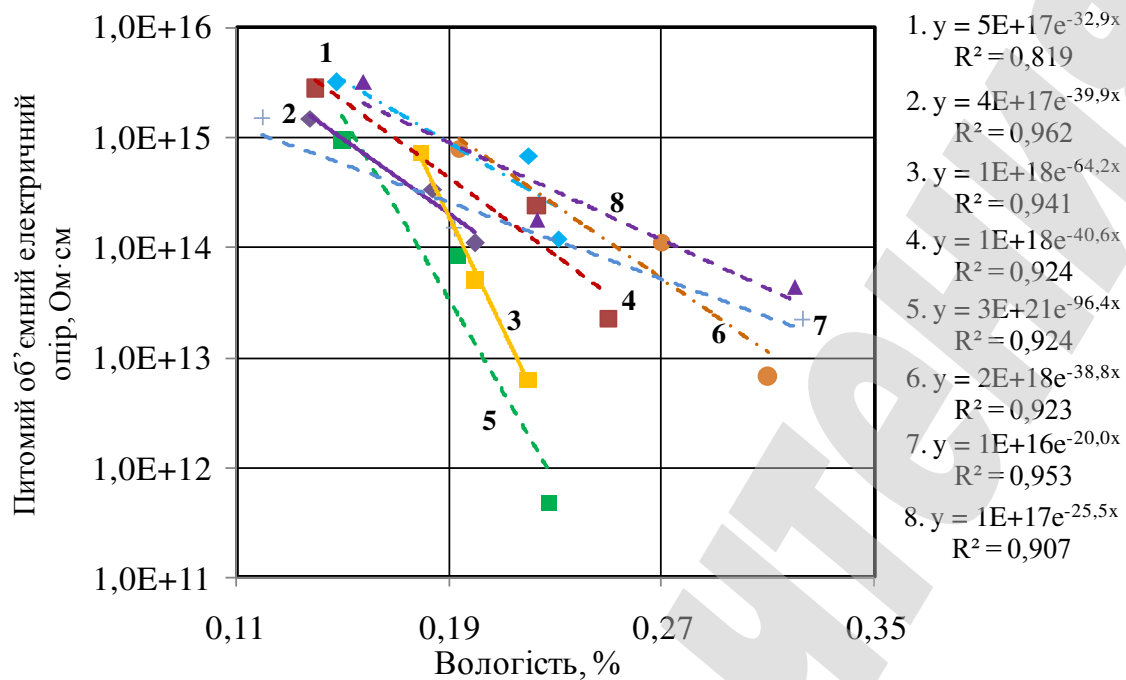


Рис. 6. Залежність питомого об'ємного електричного опору від вологості полімерних композицій на основі КЕВ-1 та антипірену (зразок 4) і модифікаторів:
1 – без модифікатора; 2 – 0,6 % модифікатора 1; 3 – 1,5 % модифікатора 1;
4 – 0,6 % модифікатора 2; 5 – 1,5 % модифікатора 2; антипірену (зразок 5) і модифікатору 2: 6 – без модифікатора; 7 – 0,6 %; 8 – 1,5 %

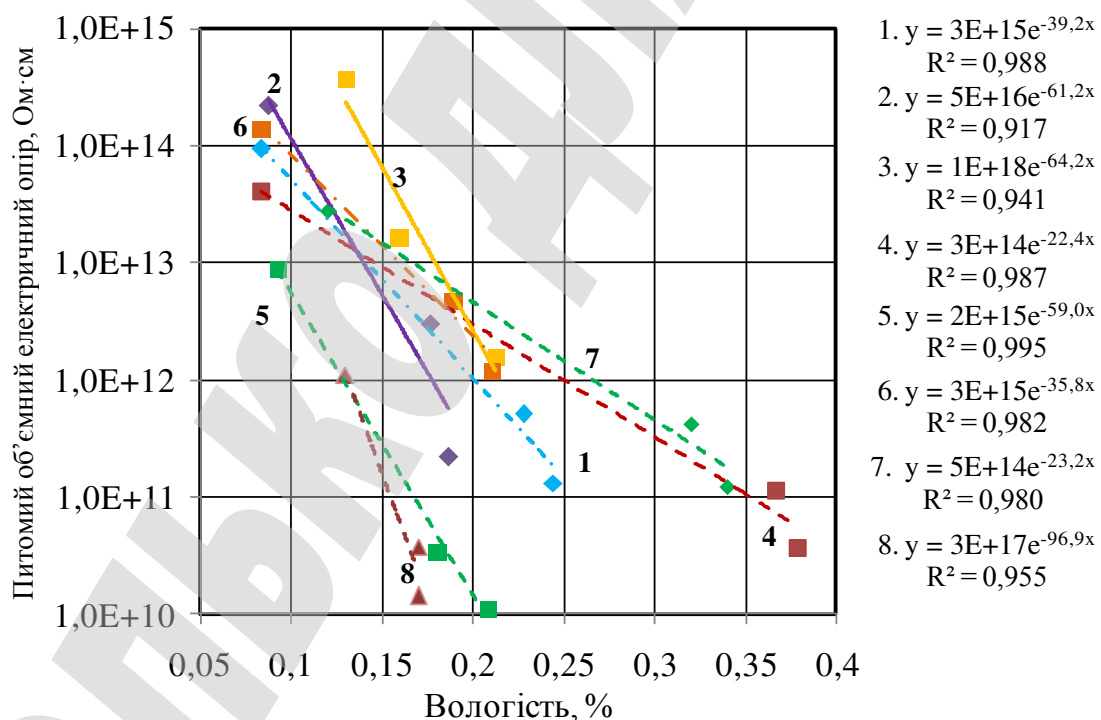


Рис. 7. Залежність питомого об'ємного електричного опору від вологості полімерних композицій на основі КЕВ-2 та антипірену (зразок 1) і модифікаторів:
1 – без модифікатора; 2 – 0,6 % модифікатора 1; 3 – 1,5 % модифікатора 1;
4 – 0,6 % модифікатора 2; 5 – 1,5 % модифікатора 2; антипірену (зразок 2) і модифікатору 2: 6 – без модифікатора; 7 – 0,6 %; 8 – 1,5 %

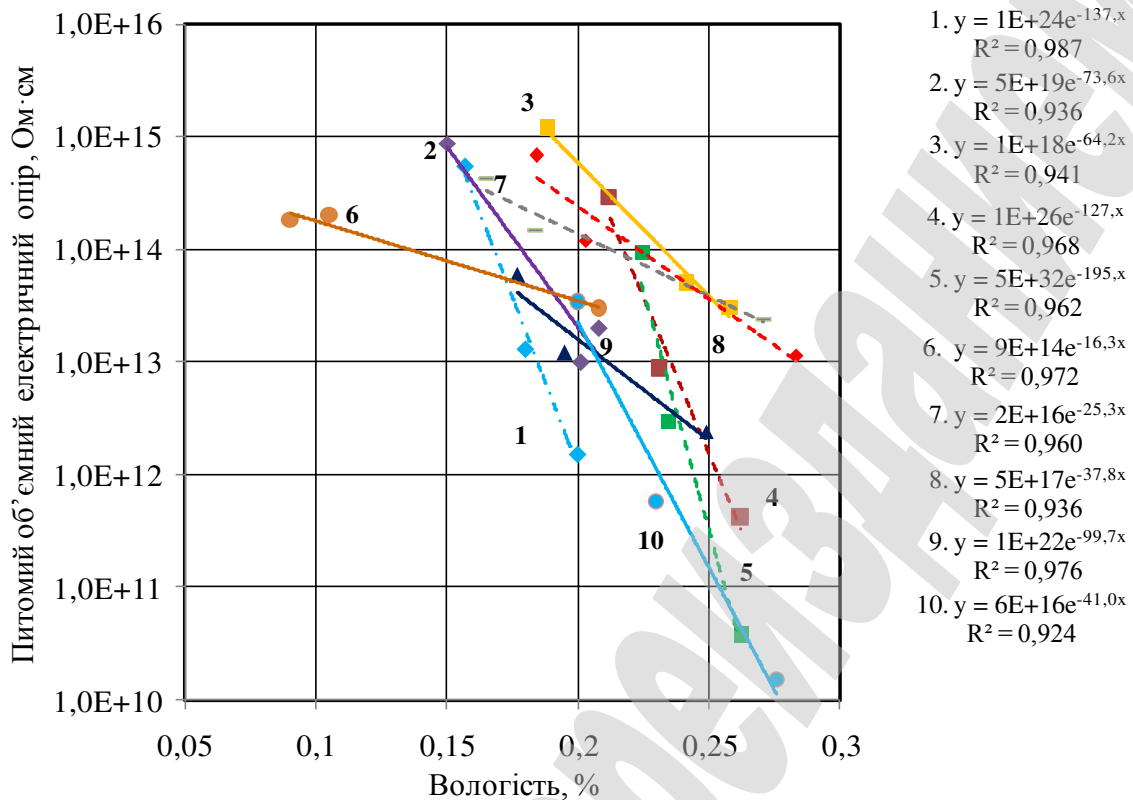


Рис. 8. Залежність питомого об'ємного електричного опору від вологості полімерних композицій на основі КЕВ-2 та модифікаторів 1, 2 антипірену (зразок 3) і модифікаторів: 1 – без модифікатора; 2 – 0,6 % модифікатора 1; 3 – 1,5 % модифікатора 1; 4 – 0,6 % модифікатора 2; 5 – 1,5 % модифікатора 2; антипірену (зразок 4) і модифікаторів: 6 – без модифікатора; 7 – 0,6 % модифікатора 1; 8 – 1,5 % модифікатора 1; 9 – 0,6 % модифікатора 2; 10 – 1,5 % модифікатора 2

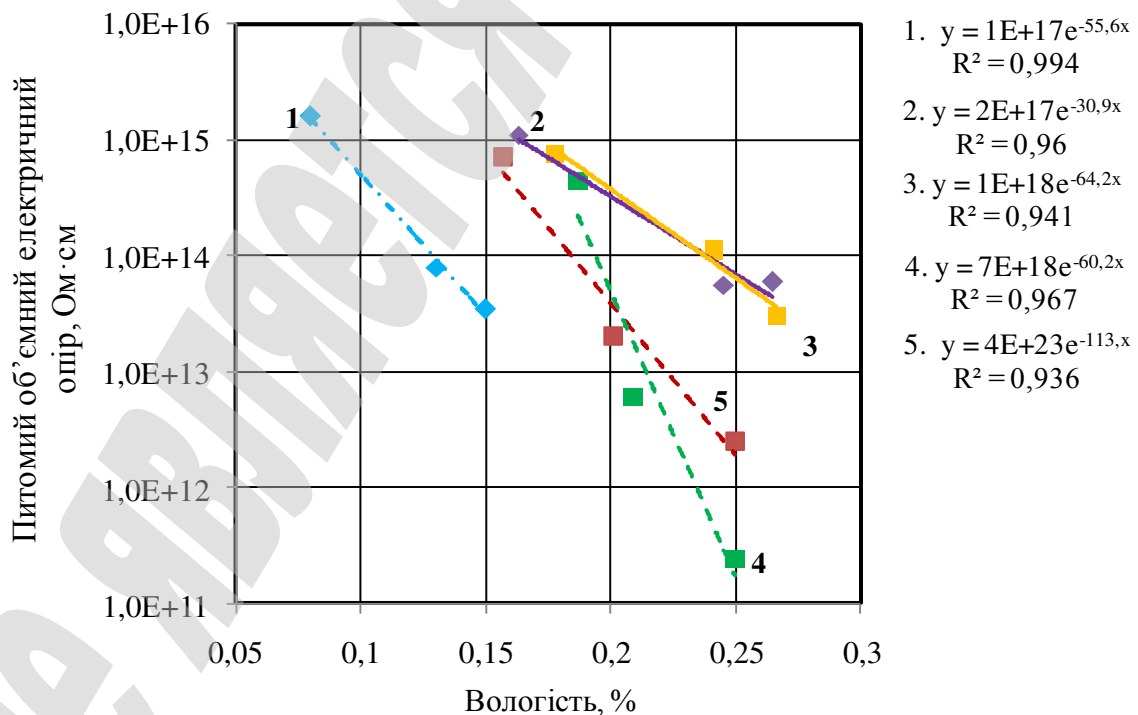


Рис. 9. Залежність питомого об'ємного електричного опору від вологості полімерних композицій на основі КЕВ-2 та антипірену (зразок 5) і модифікаторів: 1 – без модифікатора; 2 – 0,6 % модифікатора 1; 3 – 1,5 % модифікатора 1; 4 – 0,6 % модифікатора 2; 5 – 1,5 % модифікатора 2

Вимірювання тангенса кута діелектричних втрат і електричної ємності (для подальшого розрахунку діелектричної проникності середовища) здійснювали за допомогою моста змінного струму Р589 за напруги 24 В і частоти 1 кГц з допустимою основною похибкою $\pm 0,1\%$ під час вимірювання ємності і $\pm(0,02\text{tg}\delta+3\cdot 10^{-4})$ під час вимірювання тангенса кута діелектричних втрат.

Розрахунки проводили за формулами:

– діелектрична проникність середовища:

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

де d_1 – діаметр вимірювального електроду, м; d_2 – внутрішній діаметр охоронного електроду, м; t – товщина зразка; C_x – виміряна електрична ємність, пФ.

– тангенс кута діелектричних втрат:

$$\text{tg}\delta = \frac{1}{\omega \cdot C_{\text{пар.}} \cdot R_{\text{пар.}}} = \omega \cdot C_{\text{посл.}} \cdot R_{\text{посл.}}, \quad (3)$$

де ω – кутова частота, рад/с;

$C_{\text{пар.}}$ – виміряна електрична ємність в еквівалентній паралельній схемі заміщення, пФ;

$R_{\text{пар.}}$ – вимірний опір в еквівалентній паралельній схемі заміщення, Ом;

$C_{\text{посл.}}$ – виміряна електрична ємність в еквівалентній послідовній схемі заміщення, пФ;

$R_{\text{посл.}}$ – вимірний опір в еквівалентній послідовній схемі заміщення, Ом.

Результати досліджень наведено на рис. 10–13.

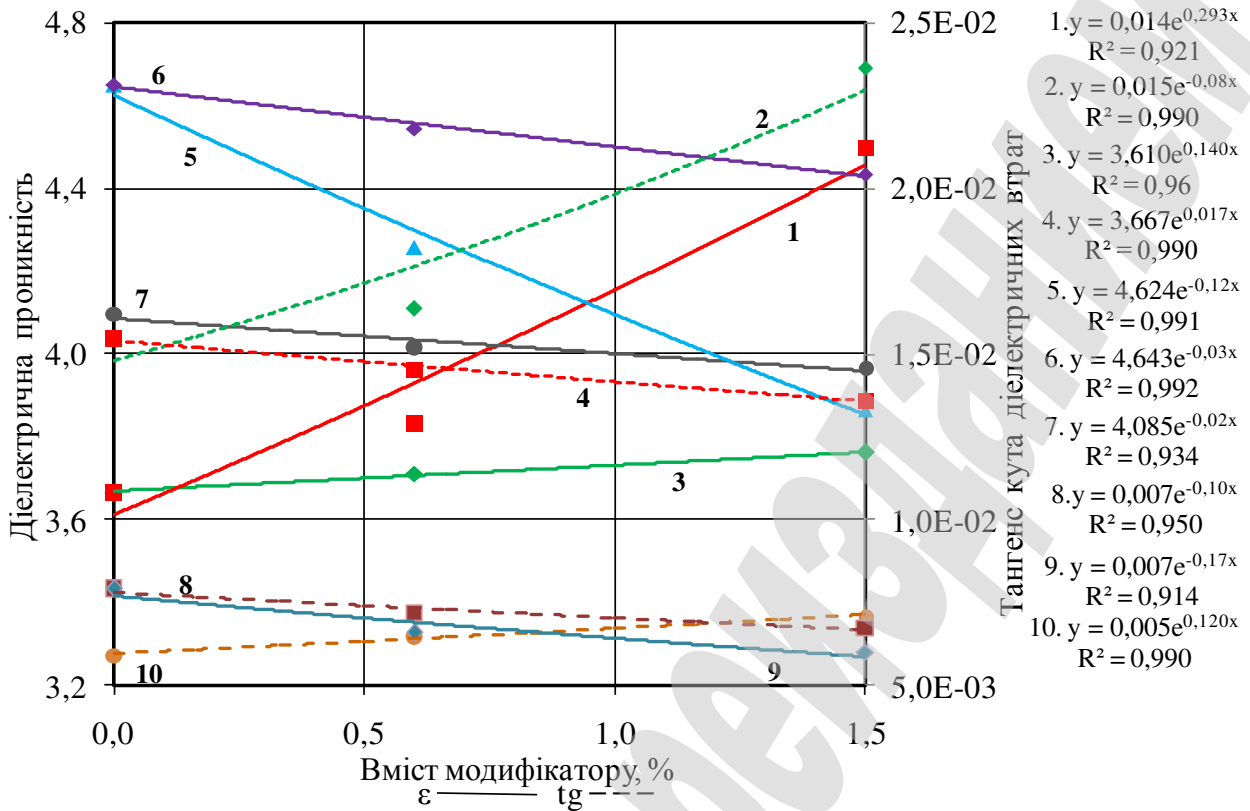


Рис. 10. Залежність діелектричної проникності та тангенсу кута діелектричних втрат полімерних композицій на основі КЕВ-1 та антипіренів 1, 4, 5 від вмісту модифікаторів: 1, 4, 6, 8 – модифікатор 1; 2, 3, 5, 7, 9, 10 – модифікатор 2; 1–4 – антипірен 1; 5–8 – антипірен 4; 9, 10 – антипірен 5

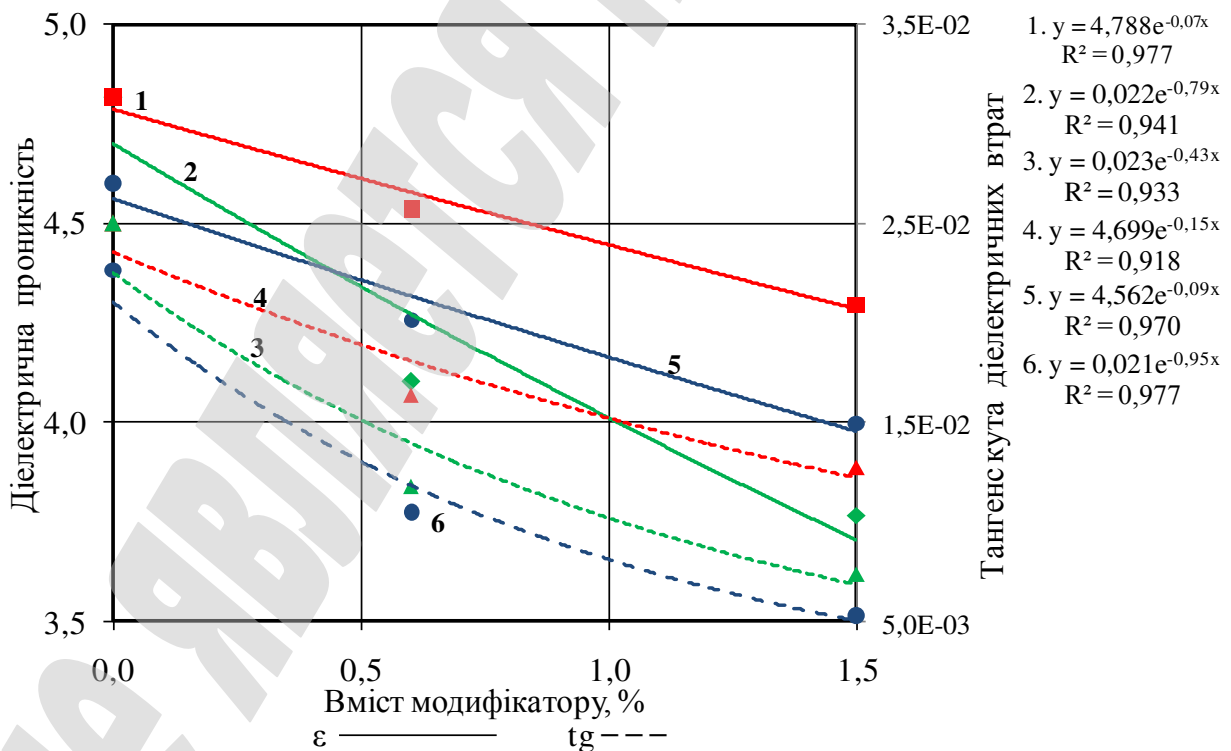


Рис. 11. Залежність діелектричної проникності та тангенсу кута діелектричних втрат полімерних композицій на основі КЕВ-2 та антипіренів 1, 2 від вмісту модифікаторів: 1, 4 – модифікатор 1; 2, 3, 5, 6 – модифікатор 2; 1–4 – антипірен 1; 5–6 – антипірен 2

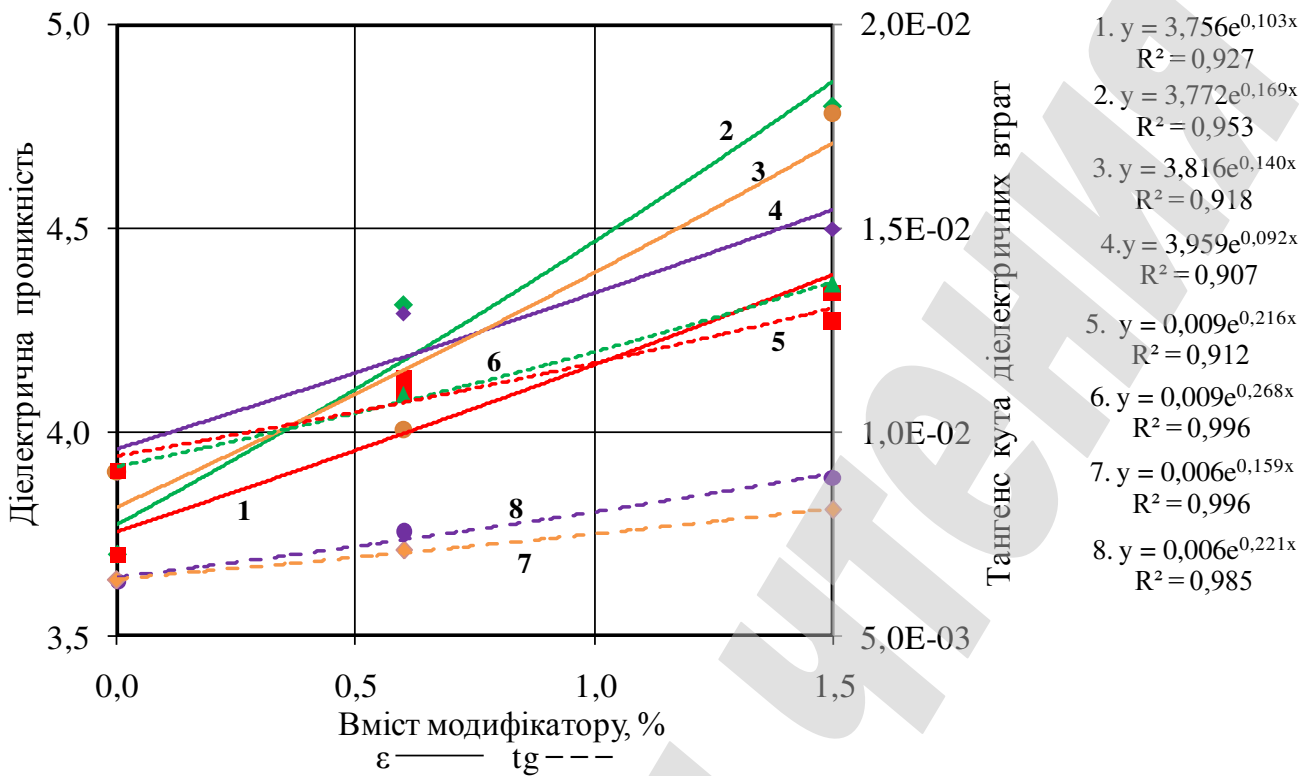


Рис. 12. Залежність діелектричної проникності та тангенсу кута діелектричних втрат полімерних композицій на основі КЕВ-2 та антипіренів 3, 4 від вмісту модифікаторів: 1, 3, 5, 7 – модифікатор 1; 2, 4, 6, 8 – модифікатор 2; 1, 2, 5, 6 – антипірен 3; 3, 4, 7, 8 – антипірен 4

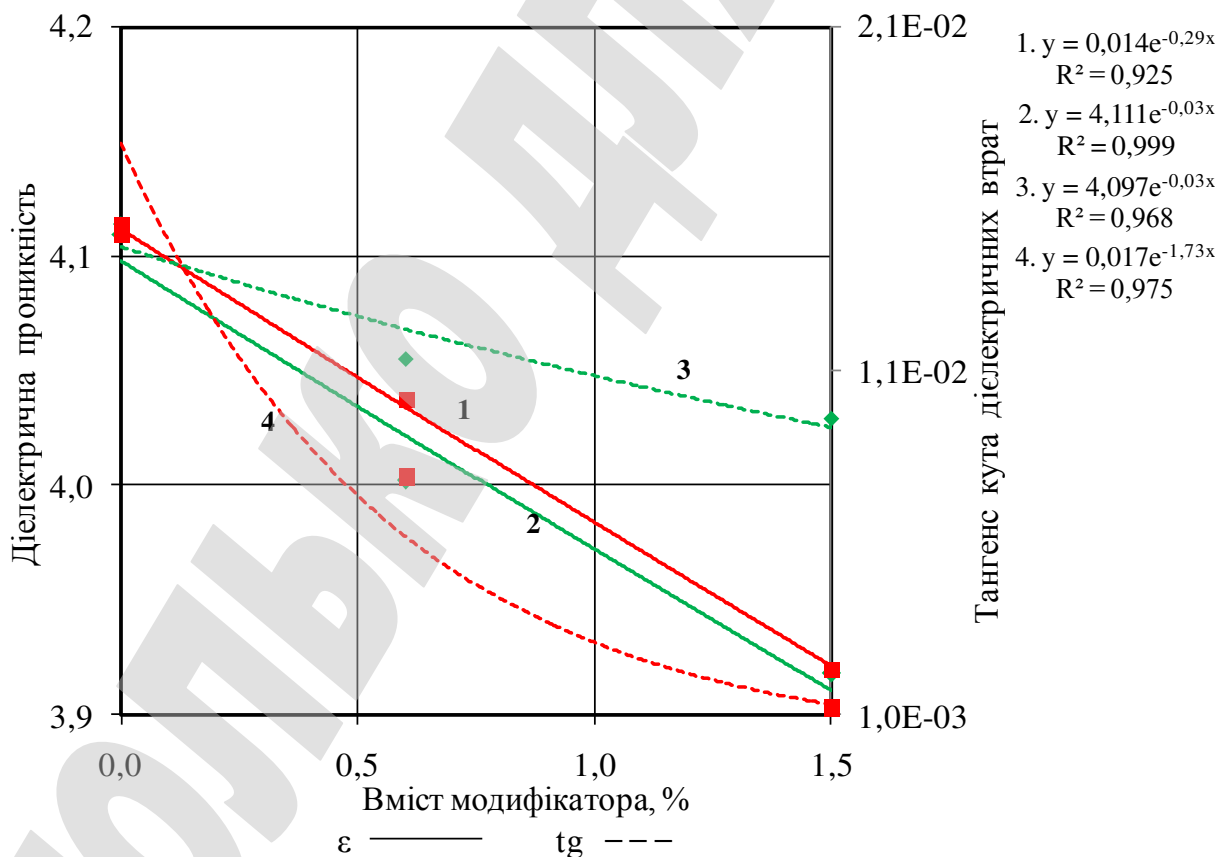


Рис. 13. Залежність діелектричної проникності та тангенсу кута діелектричних втрат полімерних композицій на основі КЕВ-2 та антипірену 5 від вмісту модифікаторів: 1, 4 – модифікатор 1; 2, 3 – модифікатор 2

Електроізоляційний матеріал вважається тим краще, чим вище його електрофізичні властивості. Електрофізичні властивості характеризуються значеннями питомого електричного опору, електричної міцності (пробивної міцності), діелектричної проникності та діелектричних втрат. Значення цих характеристик і їх залежність від агресивних чинників (зокрема, вологопоглинання), температури і частоти електричного поля визначають вибір ізоляційних полімерних композицій.

Дослідження залежностей показників електричної міцності полімерних композицій від хімічного складу та дисперсності наповнювачів-антипіренів демонструє вплив кожного із них на її величину. Аналіз цих характеристик показує, що найвищі значення електричної міцності можливо досягнути при застосуванні в якості наповнювачів-антипіренів тригідратів оксиду алюмінію. Для полімерних композицій на основі КЕВ-1 – 27–27,5 кВ/мм (зразки 1, 2). Для полімерних композицій на основі КЕВ-2 – 32–35 кВ/мм. Полімерні композиції на основі КЕВ-2 з більшим показником плинності полімеру мають більші значення електричної міцності, ніж КЕВ-1. Це можна пояснити кращими адгезійними властивостями полімерної матриці відносно наповнювача та рівномірним розподілом інгредієнтів композиційних матеріалів в надмолекулярних утвореннях.

За умови використання в якості наповнювачів дигідратів оксиду магнію електрична міцність зменшується до 25 кВ/мм для полімерних композицій на основі КЕВ-1 і до 29–31 кВ/мм для полімерних композицій на основі КЕВ-2. Потрібно вказати, що використання наповнювачів-антипіренів з меншим середнім діаметром часточок впливає на збільшення цього показника. За умови використання в якості наповнювача гідромагнетитів електрична міцність знижується до 19–21 кВ відповідно.

Слід відзначити, що на значення електричної міцності суттєвий вплив має якісний склад і кількість модифікатору – аміносилану. Для полімерних композицій на основі КЕВ-1 (рис. 1) електрична міцність підвищується для всіх антипіренів. Значно суттєво підвищення відбувається за умови використання модифікатору 1 (з меншою динамічною в'язкістю).

Для полімерних композицій на основі КЕВ-2 з показником плинності 5,0 г/10 хв електрична міцність знижується за умови використання тригідратів оксиду алюмінію (зразок 1, 2) та дигідрату оксиду магнію (зразок 3). Під час використання дигідрату оксиду магнію з більшим середнім розміром часточок (зразок 4) та гідромагнетиту (зразок 5) електрична міцність збільшується зі збільшенням кількості модифікаторів 1 та 2.

Дослідження впливу хімічного складу дисперсності наповнювачів-антипіренів та кількості і якості модифікаторів показало на зміну питомого електричного об'ємного опору полімерних композицій. Під час використання в якості полімерної матриці КЕВ-1 питомий електричний об'ємний опір знижується для полімерних композицій, вміщуючи тригідрати оксиду алюмінію і дигідрати оксиду магнію та модифікатор 1 з меншою динамічною в'язкістю (2,0 МПа·с). Та збільшується під час використання модифікатору 2 з більшою динамічною в'язкістю (2,5 МПа·с). Для полімерних композицій, вміщуючи антипірен 5,

питомий електричний об'ємний опір значно збільшується від $1 \cdot 10^{13}$ до $0,8 \cdot 10^{14}$ Ом·см і перевищує значення цього показника без введення модифікатору 1.

Питомий об'ємний електричний опір полімерних композицій на основі КЕВ-2 знижується для всіх наповнювачів-антипиренів за умови використання модифікатору 1 з меншою динамічною в'язкістю. Під час використання модифікатору 2 мало змінюється, а у разі використання в якості наповнювачів тригідрату оксиду алюмінію з меншим середнім діаметром часточок та дигідрату оксиду магнію з більшим середнім діаметром часточок збільшується в 10 разів.

Досліджено зміни питомого об'ємного електричного опору від вологості полімерних композицій з різним вмістом модифікаторів 1 і 2. Показано зниження питомого об'ємного електричного опору для всіх полімерних композицій з підвищенням вологості, як вміщуючи модифікатори, так і без них.

Досліджено полімерні композиції КЕВ-1. Під час використання тригідрату оксиду алюмінію (зразок 1, рис. 5) значне зниження цього показника спостерігається у разі використання модифікатору 1 від $1,0 \cdot 10^{15}$ до $1,0 \cdot 10^{11}$ та $1,6 \cdot 10^{10}$ Ом·см (криві 4, 5). Якщо використовувати модифікатор 2, то зниження питомого об'ємного електричного опору на порядок зменшується. За значення вологості 0,25 % та вмісту модифікатора 1,5 % питомий об'ємний електричний опір перевищує значення для немодифікованої полімерної композиції. За умови використання дигідрату оксиду магнію (зразок 4) та гідромагнезиту (зразок 5) кращі значення мають полімерні композиції з модифікатором 2. Наприклад, для гідромагнезиту (крива 8) питомий об'ємний електричний опір підвищується в порівнянні з немодифікованим зразком полімерної композиції від $1,0 \cdot 10^{13}$ до $1,6 \cdot 10^{13}$ Ом·см за значення вологості 0,31 %.

Якщо використовувати полімерну матрицю КЕВ-2, то головна тенденція зменшення питомого об'ємного електричного опору від вологості зберігається, проте переміщується в область більш низьких значень (рис. 7–9).

Важливими електрофізичними характеристиками для пожегобезпечних полімерних композицій є діелектрична проникність та тангенс кута діелектричних втрат. Тому досліджували зміну цих параметрів від хімічного складу та дисперсності наповнювачів-антипиренів та якісного і кількісного вмісту модифікаторів 1, 2. Електроізоляційний матеріал вважається тим кращим, чим нижчі значення діелектричної проникності та тангенсу кута діелектричних втрат. Таким чином, для полімерних композицій на основі КЕВ-1 (рис. 10) кращими показниками по діелектричній проникності є композиції з меншим середнім розміром часточок наповнювача-антипірену тригідрату оксиду алюмінію (крива 3, зразок 1) або дигідрату оксиду магнію та модифікатору 2, а також дигідрату оксиду магнію (крива 7, зразок 4). Цей показник практично не змінюється зі збільшенням вмісту модифікатору.

Мало змінюється діелектрична проникність у разі застосування в якості наповнювача-антипірена гідромагнезиту та модифікатора 2 (крива 9). Під час застосування модифікатора 1 цей показник значно збільшується.

Також тенденція помічається і для тангенсу кута діелектричних втрат для всіх полімерних композицій на основі КЕВ-1.

Досліджено полімерні композиції на основі КЕВ-2 з показником плинності 5 г/10 хв. Результати досліджень показують, що за умови використання тригідратів оксиду алюмінію і модифікаторів 1, 2 показники діелектричної проникності і тангенсу кута діелектричних втрат покращуються і переміщуються в область менших значень (рис. 11). Причому більші значення цих показників отримано під час використання модифікатора 2 (криві 3, 4, 6).

Використання модифікаторів 1, 2 в полімерних композиціях, які вміщують дигідрати оксиду магнію, призводить до погіршення показників діелектричної проникності та тангенсу кута діелектричних втрат (рис. 12). Але у разі використання антипірену (зразок 4) з меншим середнім діаметром часточок та модифікаторів 1, 2 тангенс кута діелектричних втрат практично мало відрізняється від немодифікованої композиції (крива 7, 8).

Значний вплив на покращення показників діелектричної проникності та тангенсу кута діелектричних втрат показує використання в якості наповнювача-антипірена гидромагнезита (рис. 13). Діелектрична проникність зменшується до 3,9, а тангенс кута діелектричних втрат зменшується до $1,0 \cdot 10^{-3}$ у присутності модифікатора 1 в кількості 1,5 %.

Важливий вплив на електрофізичні властивості пожежобезпечних полімерних композицій здійснює формування надмолекулярної структури отриманих композицій. Про це свідчать результати досліджень електричної міцності, питомого об'ємного електричного опору, діелектричної проникності та тангенсу кута діелектричних втрат.

7. SWOT-аналіз результатів досліджень

Strengths. Перевагами даного дослідження є вивчення електрофізичних властивостей пожежобезпечних полімерних композиційних матеріалів з використанням високоточних сучасних методів. Отримані результати дають порівняльну оцінку електрофізичних властивостей під час використання інгредієнтів полімерних композицій з різними фізико-хімічними властивостями та модифікування їх аміносиланами. Завдяки цьому забезпечується можливість підвищення електрофізичних властивостей пожежобезпечних композицій для виготовлення ізоляції та оболонок кабельної продукції У порівнянні з аналогічними відомими матеріалами це забезпечує зниження витрат матеріалу за рахунок зменшення товщини та дає можливість підвищити економічну ефективність виробництва вогнестійких кабелів.

Weaknesses. Інгредієнти полімерних композицій необхідно імпортувати, тому що їх не виготовляють в Україні.

Opportunities. Результати досліджень дають змогу розробляти технології отримання полімерних композицій з керованими електрофізичними властивостями для ізоляції і оболонок кабельної продукції.

Дослідження можуть використовувати виробники полімерних матеріалів усього світу.

Threats. Необхідно освоєння технологічного процесу виробництва, навчання персоналу веденню технологічного процесу.

8. Висновки

1. Вивчено зміни електрофізичних властивостей пожежобезпечних композиційних матеріалів кополімеру етилену з вінілацетатом в залежності від концентрації модифікатора, типу та дисперсності наповнювача-антипірену. На електричну міцність пожежобезпечних композицій суттєво впливають фізико-хімічні властивості наповнювачів-антипіренів та модифікаторів. Електрична міцність суттєво підвищується до 32–35 кВ/мм у разі застосування в якості наповнювачів-антипіренів тригідратів оксиду алюмінію з меншим середнім діаметром часточок полімерної матриці КЕВ-1 та модифікатору 1. Під час використання полімерної матриці КЕВ-2 найвищі показники (41 кВ/мм) одержано для композицій з гідромагнетитом та модифікатором 2.

2. Показано, що питомий об'ємний електричний опір мало змінюється для модифікованих полімерних композицій з використанням дигідрату оксиду магнію з меншим середнім розміром часточок та модифікатору 2 для полімерних матриць КЕВ-1 і КЕВ-2. Після впливу вологи питомий об'ємний електричний опір має максимальне значення $1,2 \cdot 10^{13}$ Ом·см для полімерної композиції на основі КЕВ-1, антипірену – тригідрат оксиду алюмінію та модифікатору 1.

3. Визначено, що діелектрична проникність та тангенс кута діелектричних втрат мають найкращі показники для полімерних композицій на основі КЕВ-1, гідромагнетиту та модифікатору 2 ($\epsilon=3,3$; $\text{tg}=6 \cdot 10^{-3}$).

Література

1. Chulieieva O. Development of directed regulation of rheological properties of fire retardant composite materials of ethylene vinyl acetate copolymer // *Technology audit and production reserves*. 2017. Vol. 2, Issue 1 (40). P. 25–31. doi: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2018.129699>
2. Чулеева Е. В., Золотарев В. М., Чулеев В. Л. Наполнители –антипилены. Теплофизические свойства // *Хімічна промисловість України*. 2016. № 3–4 (134–135). С. 65–69.
3. Thermal study of low-grade magnesium hydroxide used as fire retardant and in passive fire protection / Formosa J. et. al. // *Thermochimica Acta*. 2011. Vol. 515, Issue 1-2. P. 43–50. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2010.12.018>
4. Обзор минеральных антипириенов-гидроксидов для безгалогенных кабельных композиций // *Кабель-news*. 2009. № 8. С. 41–43.
5. Аблеев Р. Актуальные проблемы в разработке и производстве негорючих полимерных компаундов для кабельной индустрии // *Кабель-news*. 2009. № 6–7. С. 64–69.
6. Chulieieva O. Effect of flame retardant fillers on the fire resistance and physical-mechanical properties of polymeric compositions // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 5, Issue 12 (89). P. 65–70. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.112003>
7. Calcium-based hydrated minerals: Promising halogen-free flame retardant and fire resistant additives for polyethylene and ethylene vinyl acetate copolymers / Laoutid F. et. al. // *Polymer Degradation and Stability*. 2013. Vol. 98, Issue 9. P. 1617–1625. doi: <https://doi.org/10.1016/j.polyimdegradstab.2013.06.020>

8. Effect of Amino alcohol functionalized polyethylene as compatibilizer for LDPE/EVA/clay/flame-retardant nanocomposites / Lujan-Acosta R. et. al. // *Materials Chemistry and Physics*. 2014. Vol. 146, Issue 3. P. 437–445. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2014.03.050>

9. Chulieieva O. Effect of fire retardant fillers on thermophysical properties of composite materials of ethylene-vinyl acetate copolymer // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 6, Issue 12 (90). P. 58–67. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.119494>

10. Fire retardant benefits of combining aluminum hydroxide and silica in ethylene-vinyl acetate copolymer (EVA) / Sonnier R. et. al. // *Polymer Degradation and Stability*. 2016. Vol. 128. P. 228–236. doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2016.03.030>

11. Chang M.-K., Hwang S.-S., Liu S.-P. Flame retardancy and thermal stability of ethylene-vinyl acetate copolymer nanocomposites with alumina trihydrate and montmorillonite // *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2014. Vol. 20, Issue 4. P. 1596–1601. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2013.08.004>

12. Jeenchan R., Suppakarn N., Jarukumjorn K. Effect of flame retardants on flame retardant, mechanical, and thermal properties of sisal fiber/polypropylene composites // *Composites Part B: Engineering*. 2014. Vol. 56. P. 249–253. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.08.012>

13. Chemical modification of henequén fibers with an organosilane coupling agent / Valadez-Gonzalez A. et. al. // *Composites Part B: Engineering*. 1999. Vol. 30, Issue 3. P. 321–331. doi: [https://doi.org/10.1016/s1359-8368\(98\)00055-9](https://doi.org/10.1016/s1359-8368(98)00055-9)

14. Effect of N-2-(aminoethyl)-3-aminopropyltrimethoxysilane surface modification and C.I. Acid Red 18 dye adsorption on the physicochemical properties of silica precipitated in an emulsion route, used as a pigment and a filler in acrylic paints / Jesionowski T. et. al. // *Dyes and Pigments*. 2003. Vol. 57, Issue 1. P. 29–41. doi: [https://doi.org/10.1016/s0143-7208\(03\)00006-8](https://doi.org/10.1016/s0143-7208(03)00006-8)

15. Juvaste H., Iiskola E. I., Pakkanen T. T. Aminosilane as a coupling agent for cyclopentadienyl ligands on silica // *Journal of Organometallic Chemistry*. 1999. Vol. 587, Issue 1. P. 38–45. doi: [https://doi.org/10.1016/s0022-328x\(99\)00264-8](https://doi.org/10.1016/s0022-328x(99)00264-8)

16. Макарова Н. В., Трофимец В. Я. Статистика в Excel: учеб. пособие. М.: Финансы и статистика, 2002. 368 с.