

УДК 679.7:678:544

doi:10.20998/2413-4295.2026.01.12

ОПТИМІЗАЦІЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ БЕЗГАЛОГЕННИХ ПОЖЕЖОБЕЗПЕЧНИХ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ У КАБЕЛЬНІЙ ПРОДУКЦІЇ

В. М. ЗОЛОТАРЬОВ, О. В. ЧУЛЄЄВА*, Т. Ю. АНТОНЕЦЬ

Приватне акціонерне товариство «Завод Південкабель», Харків, УКРАЇНА
*e-mail: echuleeva@ukr.net

АНОТАЦІЯ Широкий спектр кабельної продукції використовує безгалогенні композиції. З безперервним процесом урбанізації постійно зростають вимоги до безгалогенних полімерних композицій. Дослідження зосереджені на ад'ювантах, які можуть покращити не тільки вогнестійкість, але й реологічні, теплові, механічні та електрофізичні характеристики. Метою є визначення впливу нанорозмірних діоксидів кремнію та їх сумішей з оксидом алюмінію та поліметилсилоксаном на реологічні, теплові, механічні та електрофізичні властивості безгалогенних вогнестійких полімерних композиційних матеріалів. Досліджувані зразки додатково вміщують нанометрові ад'юванти на базі кремнію діоксиду. Теплофізичні властивості вивчено за допомогою термогравіметрії (TGA) та диференціального скануючого калориметричного аналізу (ДСК) на приладі компанії METTLER TOLEDO (Швейцарія). Реологічні властивості вивчено на вимірювальному екструдері з реометричною капілярною матрицею (Brabender, Німеччина). Визначено вплив нанометрових ад'ювантів на базі кремнію діоксиду на формування надмолекулярної структури наповнених полімерних композицій. Завдяки цьому температури фазових переходів збільшуються на 2–3 °С. Екзотермічні процеси визначалися в температурному інтервалі 250,0 до 320,0 °С, початкові температури розкладання збільшуються на 3,7–13 °С, а кінця розкладання – на 4–14 °С. Досліджено кінетичні характеристики перетворення полімерних композицій під впливом температур від 20 до 650 °С. Енергія активації збільшується на 6–8 кДж/моль. Виявлено ефект, що показує вплив нанорозмірних ад'ювантів на зниження в'язкості розплаву полімерних композицій. Встановлено залежність між механічними, електрофізичними властивостями та характеристиками, що належать нанорозмірним ад'ювантам. Результати досліджень дозволяють нанорозмірним ад'ювантам на основі діоксиду кремнію оптимізувати реологічні та електрофізичні властивості при використанні пожежобезпечних полімерних композицій, призначених для ізоляції та оболонки силових кабелів.

Ключові слова: кабелі; пожежобезпечні полімерні композиції; діоксид кремнію; реологічні; теплові та електрофізичні властивості.

OPTIMIZATION OF THE PROPERTIES OF HALOGEN-FREE FIRE-RETARDANT POLYMER COMPOSITIONS FOR CABLE PRODUCTS

V. ZOLOTARYOV, O. CHULIEIEVA, T. ANTONETS

Private joint stock company «Yuzhcable Works», Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT A wide range of cable products uses halogen-free compounds. With the ongoing process of urbanization, the demand for halogen-free polymer compounds is constantly growing. Research focuses on additives that can improve not only fire resistance, but also rheological, thermal, mechanical, and electrophysical characteristics. The aim is to determine the effect of nanoscale silicon dioxide and its mixtures with aluminum oxide and polymethylsiloxane on the rheological, thermal, mechanical, and electrophysical properties of halogen-free fire-retardant polymer composite materials. The samples studied additionally contain nanometer-sized adjuvants based on silicon dioxide. The thermophysical properties were studied using thermogravimetry (TGA) and differential scanning calorimetry (DSC) on a METTLER TOLEDO (Switzerland) device. The rheological properties were studied on a measuring extruder with a rheometric capillary matrix (Brabender, Germany). The influence of nanometer-sized adjuvants based on silicon dioxide on the formation of the supramolecular structure of filled polymer compositions was determined. As a result, phase transition temperatures increase by 2–3 °C. Exothermic processes were determined in the temperature range from 250.0 to 320.0 °C, with initial decomposition temperatures increasing by 3.7–13 °C and final decomposition temperatures increasing by 4–14 °C. The kinetic characteristics of the transformation of polymer compositions under the influence of temperatures ranging from 20 to 650 °C were studied. The activation energy increases by 6–8 kJ/mol. The effect of nanoscale adjuvants on reducing the viscosity of polymer composition melts was demonstrated. The dependence of mechanical and electrophysical properties on the characteristics of nanoscale adjuvants has been established. The research results make it possible to use nanoscale adjuvants based on silicon dioxide to optimize the rheological, electrophysical properties, and operational characteristics of fire-safe polymer compositions for the manufacture of insulation and sheathing for power cables.

Keywords: cables; fire-retardant polymer compositions; silicon dioxide; rheological, thermophysical; electrophysical properties.

Вступ

Існує широкий асортимент кабельної продукції, де використовуються безгалогенні композиції: силові

кабелі, кабелі зв'язку, телекомунікаційні кабелі, кабелі пожежної та охоронної сигналізації, кабелі залізничного рухомого складу, суднові кабелі, автомобільні дроти та прокладальні дроти, а також

безгалогенні матеріали з радіаційним захистом. Спостерігається прискорена тенденція зростання споживання безгалогенних кабельних компаундів на європейському ринку. З постійною урбанізацією вимоги до полімерних компаундів для ізоляції та оболонки стають суворішими, тому дослідницькі роботи з оптимізації матеріалів для ізоляції та оболонки з метою запобігання пожежам мають велике значення [1–6].

Виробники полімерних композитних матеріалів завжди стикаються з проблемою вибору речовин (ад'ювантів), що додаються до полімерних безгалогенних композицій для підвищення їхньої ефективності та зміни фізичних і хімічних властивостей. Не менш важливими є дослідження їхнього впливу на властивості полімерних композицій під час переробки та використання. Тому досить актуальним є вивчення проблеми, пов'язаної з дослідженням теплофізичних, реологічних, фізико-механічних та електрофізичних залежностей, що існують між характеристиками нанорозмірних ад'ювантів у полімерних композиційних системах.

Постановка проблеми

Безгалогенові вогнезахисні речовини, що використовуються у поліолефіновій ізоляції та матеріалах для оболонок кабелів, можна розділити на неорганічні вогнезахисні речовини, органічні вогнезахисні речовини та вогнезахисні речовини, що спучуються [2]. Вогнезахисні речовини також класифікуються на добре відомі групи, включаючи фосфор, меламін, азот, неорганічні гідроксиди, бор та кремній. Механізм кожної групи для забезпечення стійкості до полум'я відомий. Окрім ефективності, завдяки якій кожен антипірен підвищує стійкість до полум'я, важливим також є його вплив на механічні властивості полімерних композицій. Більшість із них можуть знизити швидкість виділення тепла з поліолефінів, зберігаючи при цьому фактичну пропорційну частку між двома атрибутами, які, згідно з літературою, вважаються доцільними. Неорганічні гідроксиди використовуються частіше, ніж будь-який інший тип у складі полімерів [7–8].

Існує чотири основні фактори, від яких залежить процес горіння: паливо, окислювач (кисень), тепло та ланцюгова реакція вільних радикалів. Горіння не може відбуватися за відсутності або усунення будь-якого з цих факторів. Це загалом класифікується як специфічні механізми дії, за допомогою яких полімерні антипірени демонструють свою вогнезахисну поведінку, як у газовій, так і в конденсованій фазі [9].

Проблемою в процесі використання традиційних антипіренів є їхній негативний вплив на реологічні та механічні властивості полімерів через погану сумісність на межі розділу з полімерною матрицею [10]. Основний інтерес до гідратованих мінеральних наповнювачів (гідроксидів та

гідроксикарбонатів) полягає головним чином у таких механізмах вогнезахисту [11]:

- розведення твердої горючої фракції;
- ендотермічний розклад наповнювача,
- розведення палива в газоподібній фазі;
- формування захисного бар'єру.

Неорганічні антипірени вважаються хорошими варіантами для досягнення вогнестійкості та зменшення утворення диму [12].

Необхідне дослідження реологічних властивостей безгалогенних полімерних композицій під час їх розробки та переробки. Основними факторами, що впливають на реологічну поведінку композиції, є розподіл частинок за розмірами, природа та форма частинок, взаємодія між ними, максимальна частка упаковки та матрична в'язкість. Матрична в'язкість є ключовим параметром, який необхідно оптимізувати таким чином, щоб вона була достатньо низькою для забезпечення обробки матеріалу та достатньо високою для покращення дисперсії. Полідисперсність розмірів наповнювача дозволяє досягти вищого ступеня наповнення зі зниженою в'язкістю розплавленої суміші при заданому рівні вмісту наповнювачів [13,14].

Наноматеріали демонструють потенціал у підвищенні ефективності екологічно чистих антипіренів, навіть якщо вони за своєю суттю не є вогнезахисними. Кілька категорій наноматеріалів використовуються як добавки в антипіренах. Кожна категорія демонструє специфічні властивості та режими вогнезахисту, включаючи такі аспекти, як вогнестійкість, термостабільність, знижене димоутворення та механічні характеристики [15]. Наночастинки застосовуються як ад'юванти для підвищення вогнестійкості різних полімерів [16]. Численні сполуки використовувалися разом з АТН або МДН для покращення вогнестійкості EVA: гідроксиданнат, борат, спінюваний графіт, багатощарові вуглецеві нанотрубки, шаруватий подвійний гідроксид, зшиті еластомерні частинки, добавки на основі азоту (меламін), органічні або неорганічні добавки на основі фосфору, оксиди металів, тальк і органомодифікований монтморилоніт. Тим часом, нанокompозитні спучувані матеріали, що містять наночастинки, включаючи наноглини та сполуки з введеним фосфором; нітрид бору, функціоналізовані елементи оксидів металів, продемонстрували чудові характеристики термостабільності з низькою швидкістю виділення тепла, що покращує утворення спучуваного вуглецю [17]. Вони справді мають дуже різні механізми реакції між полімерами під час горіння, але найчастіше забезпечують певний бар'єрний ефект, який обмежує масоперенос між залишковими матеріалами і джерелом тепла. Їх можна комбінувати, щоб отримати певні механізми стримування горіння, і для різних комбінацій можна досягти синергетичного ефекту [18–22].

Теплову поведінку нанокompозитів поліетилену низької густини (ПЕНП)/сополімеру етилену-октену (СЕО)/органомонтморилоніту (орг-ММТ), отриманих методом компаундування в розплаві, аналізували за допомогою методів диференціальної скануючої калориметрії (ДСК), термогравіметричного аналізу (ТГА) та динамічного механічного термічного аналізу (ДМТА) [23,24]. Завдяки широкому застосуванню в кабельній промисловості, поліолефіни належать до тієї групи полімерів, які найбільше досліджувалися з точки зору горючості. У більшості випадків вони виготовляються як вогнезахисні з великою кількістю (до 65 мас. %) гідратованого мінерального наповнювача, головним чином гідроксиду алюмінію. Такий високий вміст різко знижує не тільки реологічні, але й механічні властивості. Це основна причина, чому інтенсивні дослідження повинні бути зосереджені на допоміжних речовинах (ад'ювантах), здатних одночасно покращувати вогнестійкість разом з реологічними, механічними та експлуатаційними характеристиками.

Мета роботи

Метою дослідження є оптимізація реологічних, теплофізичних, механічних та електрофізичних властивостей безгалогенних пожежобезпечних полімерних композиційних матеріалів, що не містять галогенів, під впливом нанодисперсних діоксидів кремнію з різними характеристиками. Це дозволить обґрунтовано визначити характеристики нанорозмірних допоміжних речовин для спрямованого регулювання властивостей полімерних композицій. Це також забезпечить швидке коригування рецептури полімерної композиції залежно від бажаних технологічних та експлуатаційних властивостей при кінцевому використанні.

Для досягнення мети необхідно вирішити такі завдання:

- дослідити залежність теплофізичних властивостей пожежобезпечних полімерних композицій від характеристик нанорозмірних діоксидів кремнію;
- встановити закономірності впливу на реологічні властивості (швидкість зсуву, напруження зсуву, в'язкість) пожежобезпечних полімерних композицій з додаванням нанорозмірних частинок діоксиду кремнію;
- дослідити залежність фізико-механічних та електрофізичних властивостей полімерних композицій від характеристик нанорозмірних ад'ювантів.

Матеріали та методи дослідження

Досліджено безгалогенні пожежобезпечні полімерні композиції, що не містять галогенів: Зразок

1, 2, 3. Полімерна композиція у Зразку 1 додатково вміщує нанометровий ад'ювант на базі кремнію діоксиду. Полімерний композиційний матеріал у Зразку 2 вміщує ад'ювант суміш нанометрових частинок кремнію діоксиду, алюмінію гідроксиду, диметилполісилоксану. Характеристики ад'ювантів наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Характеристики манометрових ад'ювантів

Найменування показника	Отримані результати для Зразків	
	1	2
Вміст, %		
кремнію діоксиду	96-99	30-33
алюмінію гідроксиду	-	30-33
диметилполісилоксану	-	30-33
Середній розмір частинок, μm	0,15	0,3
Питома площа поверхні, $\text{m}^2/\text{г}$	25	18

Полімерні композиційні матеріали виготовляли на устаткуванні лабораторії виробництва Brabender (Німеччина).

Експерименти з визначення переходів з однієї термодинамічної фази в іншу та перетворення структури, процеси термоокислювальної деградації при зміні температури проведено за допомогою термогравіметричного аналізу (ТГА) та диференціального скануючого калориметричного аналізу (ДСК) на приладі компанії METTLER TOLEDO (Швейцарія). Інтенсивність нагріву 10,0 град/хв. Температурний інтервал – 20,0 до 1100,0 °С.

Дані щодо визначення теплових, температурних та кінетичних характеристик були отримані за допомогою приладу для термогравіметрії (ТГА) та диференціального скануючого калориметричного аналізу (ДСК) компанії METTLER TOLEDO (Швейцарія) в діапазоні температур від 20,0 до 650,0 °С за трьох різних швидкостей нагрівання (β), що дорівнюють 50,0, 75,0 та 100,0 град/хв.

Кінетичні розрахунки виконані за допомогою моделі кінетики вільного руху. Модель кінетики вільного руху базується на температурній залежності та глибині конверсії. Кожне значення конверсії дає розраховану енергію активації. При фіксованому ступені перетворення швидкість реакції є лише температурною залежністю. Застосовується температурне рівняння Арреніуса.

У розрахунку були використані три динамічні температурні криві для кожного складу полімерних композицій.

При обробці кінетичних експериментів використана формула С. В'язовкіна [25].

Реологічні властивості вивчено на вимірювальному екструдері (19×24) (Brabender,

Німеччина) з реометричною капілярною матрицею. Застосовані швидкості зсуву: $1 \times 10^{-1} - 1 \times 10^2 \text{ c}^{-1}$ [26].

Визначення індексу текучості розплаву та енергії перехідного агрегатного стану текучості розплаву полімерних композиційних матеріалів проведено згідно з [27]. Випробування механічних властивостей полімерних композицій проведено згідно з [28]. Кисневий індекс випробувано відповідно до [29]. Електрофізичні випробування виконано згідно з [30].

Обговорення результатів

ДСК діаграми з визначення переходів з однієї термодинамічної фази в іншу та перетворення структури полімерних композиційних матеріалів, процесів термоокислювальної деградації при зміні температури представлені на рис. 1.

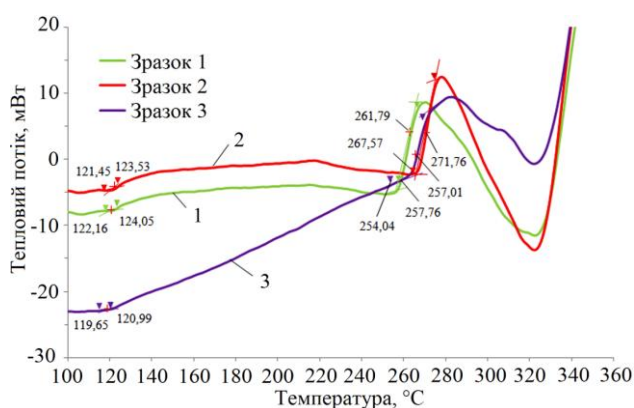


Рис. 1 – Діаграми диференціального скануючого калориметричного аналізу (ДСК) з визначення переходів з однієї термодинамічної фази в іншу та перетворення структури полімерних композиційних матеріалів, процесів термоокислювальної деградації при зміні температури

Температурні значення термодинамічних перехідних фаз та термоокислювальної деградації полімерних композиційних матеріалів наведено в табл. 2.

Таблиця 2 – Температурні значення термодинамічних перехідних фаз та термоокислювальної деградації полімерних композиційних матеріалів

№ Зразку	Температура термодинамічного переходу		Температура деградації	
	Початок ефекту, °C	Середня точка, °C	Початок ефекту, °C	Середня точка, °C
1	122,16	124,05	257,76	261,79
2	121,41	123,53	267,57	271,76
3	119,65	120,99	254,04	257,17

На підставі аналізу ДСК діаграм та результатів, наведених в таблиці 3, очевидно, що температурні значення термодинамічних перехідних фаз підвищуються для композиційних полімерних матеріалів, що вміщують нанорозмірні ад'юванти (Зразок 1, 2), порівняно з полімерним композиційним матеріалом (Зразок 3), початок термодинамічного ефекту склування підвищується на 2–3 °C, закінчення термодинамічного ефекту склування – на 3–4 °C.

Аналіз ДСК діаграм визначає екзотермічні ефекти деградації для композиційних полімерних матеріалів в інтервалі температур від 250 °C до 320 °C. Початок термоокислювальної деградації для полімерних композиційних матеріалів Зразок 1, 2 відбувається при підвищенні температури на 3,7–13 °C, а закінчення термоокислювальної деградації – при підвищенні температури на 4–14 °C порівняно зі полімерним композиційним матеріалом Зразок 3.

ТГА діаграми полімерних композицій показано на рис. 2, дані про зниження маси, визначені з ТГА діаграми, наведено в табл. 3.

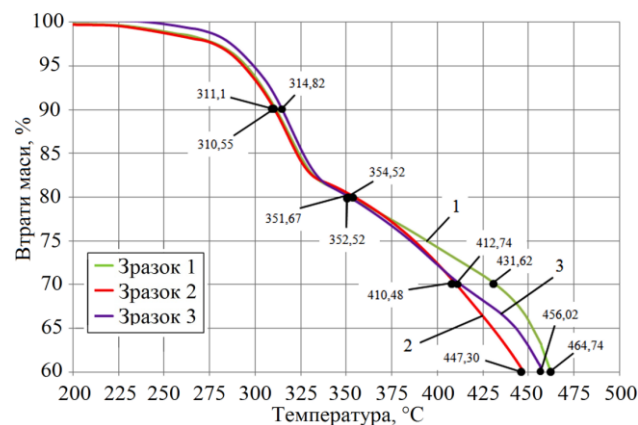


Рис. 2 – Діаграми термогравіметричного аналізу полімерних композиційних матеріалів

Таблиця 3 – Результати термогравіметричному аналізу полімерних композиційних матеріалів

Зниження маси, %	Значення температури, °C		
	Зразок 1	Зразок 2	Зразок 3
10	311,1	310,55	314,82
20	352,39	354,52	351,67
30	431,62	410,48	412,74
40	464,74	447,30	456,02

Дослідження методом термогравіметричного аналізу (ТГА) показують, що нанорозмірні ад'юванти підвищують теплову стабільність полімерних композицій. Температури, що відповідають зниженню маси на 10 %, 20 %, 30 % та 40 % (таблиця 4), збільшуються для полімерних композицій, що містять нанорозмірні частинки. Помітне збільшення температури відбувається для полімерного композитного матеріалу (Зразок 1) на 1–8 °C, що

вміщує нанометрові частинки розміром 0,15 μm. Виявлені ефекти зумовлені відмінностями хіміко-фізичних та теплофізичних властивостей ад'ювантів. Вагомий вплив на теплофізичні особливості полімерних композиційних матеріалів, що містять нанометрові ад'юванти чинить надмолекулярна впорядкованість (це підтверджується результатами диференціального скануючого калориметричного аналізу фазових перетворень). Опис фізичних даних та розкладання полімерних композицій на діаграмах ДСК та ТГА показує відповідні ефекти.

ТГА/ДСК аналізи проведено на приладі ТГА/ДСК 1/1100 SF компанії METTLER TOLEDO у діапазоні температур від 20 до 650 °C за трьох різних швидкостей нагрівання: 50,0, 75,0 та 100,0 град/хв. За цими даними визначено теплові, температурні та кінетичні характеристики полімерних композицій.

Результати дослідження пожегобезпечного полімерного композиційного матеріалу Зразок 3 наведено на рис. 3. Час конверсії скорочується зі зростанням температури. У той самий момент, час конверсії подовжується за аналогічної температури (наприклад, 440 °C) для полімерного композиційного матеріалу Зразок 1 до 130 с, для полімерного композиційного матеріалу Зразок 2 до 145 с. Для отримання рівнозначної глибини конверсії (наприклад, 75 %) полімерних композиційних матеріалів Зразок 1, 2, 3 час складає відповідно 60, 65 та 52 с. Тим часом для полімерних композиційних матеріалів Зразок 1, Зразок 2 та Зразок 3 енергія активації становить 248, 244 та 238 кДж/моль відповідно.

Проведена оцінка реологічних властивостей полімерних композиційних матеріалів, передусім, показника та енергії перехідного агрегатного стану текучості розплаву. Результати випробувань вказані в табл. 4.

Таблиця 4 – Реологічні характеристики полімерних композиційних матеріалів

Найменування показника	Отримані результати для Зразків		
	1	2	3
Показник текучості розплаву (температура 150 °C, маса навантаження 21,6 кг), г/600 с	7,80	7,44	4,85
Енергії перехідного агрегатного стану текучості розплаву, кДж/моль	51,861	38,736	40,965

Нанометрові кремнію діоксиди впливають на показник та енергії перехідного агрегатного стану текучості розплаву полімерних композиційних матеріалів. Для полімерних композиційних матеріалів (Зразок 1 та 2), у складі яких присутні нанометрові

часточки кремнію діоксиду чи його суміші з алюмінію гідроксидом та диметилполісилоксаном, показник текучості розплаву зростає в значній мірі порівняно зі Зразком 3. Розраховано енергію активації для оцінки енергії досягнення перехідного агрегатного стану текучості розплаву полімерних композиційних матеріалів, коли врівноважено створення та руйнування зв'язків. Це дослідження виявляє залежність енергетичних бар'єрів, що усуваються для досягнення перехідного агрегатного стану текучості розплаву полімерних композиційних матеріалів від властивостей використовуваних нанометрових ад'ювантів. Енергія досягнення перехідного агрегатного стану значно зростає для полімерного складу Зразок 1 та зменшується для полімерного складу Зразок 2 відносно базової композиції Зразок 3.

Реологічні властивості також досліджено за допомогою вимірювального екструдера. Схематичне зображення лабораторної екструзійної системи показана на рис. 4. Реологічні властивості полімерних композицій також характеризуються значеннями в'язкості, напруження зсуву та швидкості зсуву. Зміна властивостей нанодисперсних ад'ювантів (дисперсність, речовинний склад, фізико-хімічні властивості) впливає на властивості полімерних композиційних матеріалів під дією деформації зсуву. Вони характеризують опір матеріалу течії (в'язкість) та деформації (зсув) необхідних для здобуття заданої швидкості деформації зсуву.

На рис. 5, 6 показано залежності зміни опору зсуву (в'язкість) від швидкості деформації зсуву полімерних композиційних матеріалів. Для коректної побудови експериментально отриманих залежностей враховувалися втрати, що виникають під час руху розплавів полімерних композиційних матеріалів на вході в матрицю, а також їх походження.

Спостерігається значне зниження в'язкості зі збільшенням швидкості деформації зсуву (рис. 5, 6). Водночас, зменшення опору зсуву (в'язкість) зафіксовано для полімерного композиційного матеріалу 1, що вміщує ад'ювант, середній розмір частинок якого складає 0,15 μm.

На рис. 7 та 8 показано залежності зсувного напруження від швидкості деформації зсуву полімерних композиційних матеріалів з урахуванням вхідних втрат (поправка Беглі) та їх походження (поправка Вайсенберга-Рабіновича). Виявлено ефект зниження зсувного напруження, що призводить до отримання підвищених швидкостей деформації зсуву полімерних композиційних матеріалів Зразок 1 та Зразок 2 у порівнянні з полімерним композиційним матеріалом Зразок 3.

Особливості цих взаємозв'язків показує, що для отримання підвищених швидкостей деформації зсуву під час руху полімерних композиційних матеріалів необхідні значніші зсувні напруження. Для полімерних композицій напруження зсуву підвищується у такому ж напрямку, що і в'язкість.

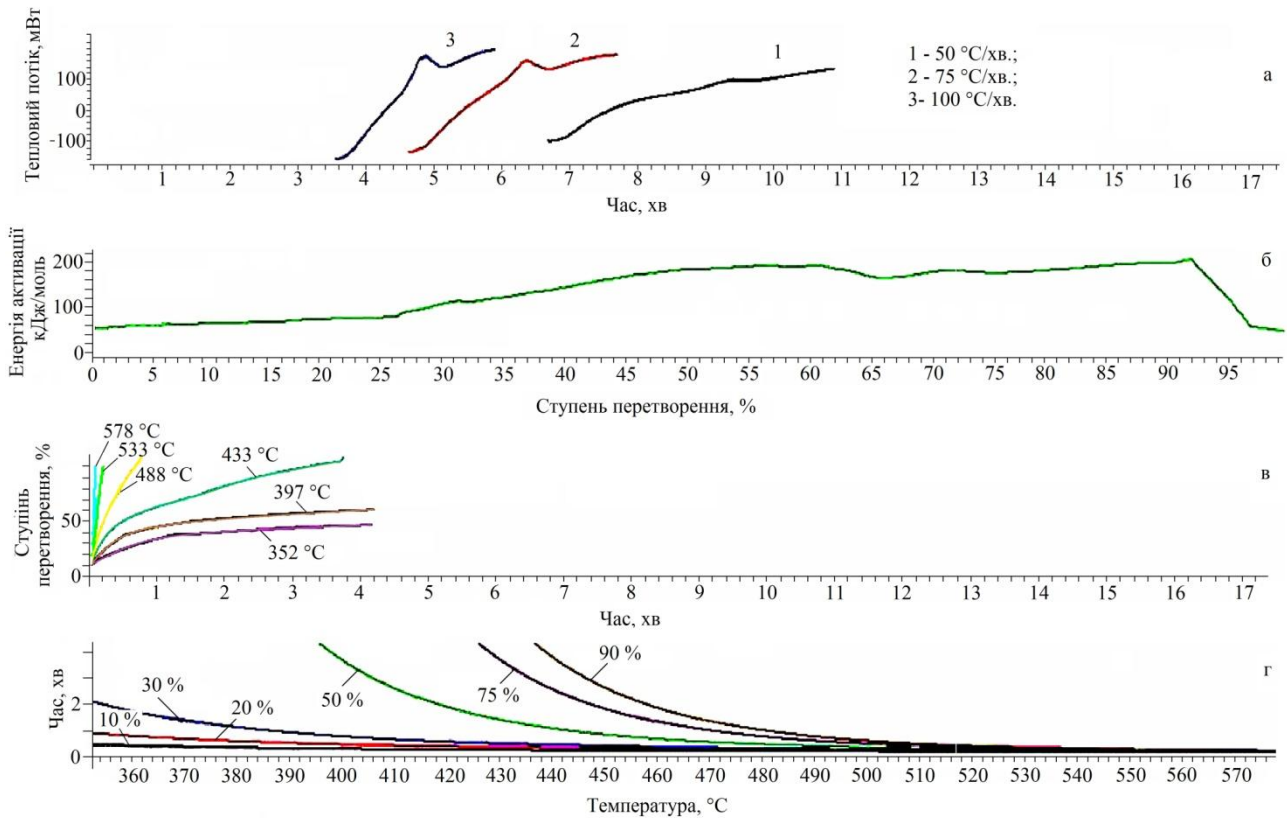


Рис. 3 – Теплові, температурні та кінетичні характеристики полімерного композиційного матеріалу Зразок 3: а - залежність теплового потоку від часу випробування; б - залежність енергії активації від глибини конверсії; в - залежність глибини конверсії від часу випробування; г - залежність часу перетворення від температури.

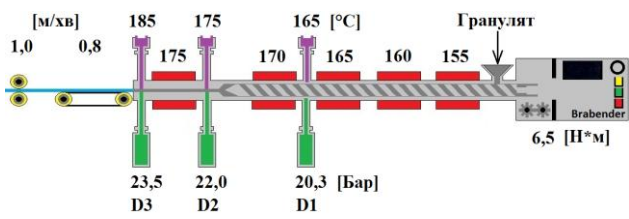


Рис. 4 – Схематичне зображення лабораторної екструзійної системи

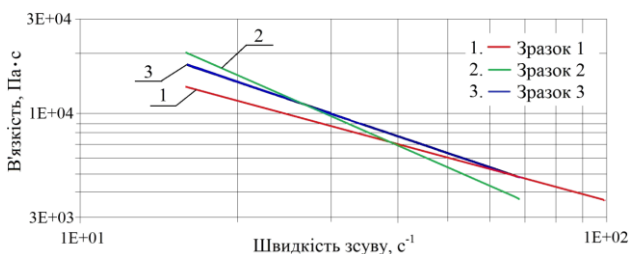


Рис. 5 – Залежність ефективної зміни опору зсуву (в'язкості) від швидкості деформації зсуву полімерних композиційних матеріалів з урахуванням вхідних втрат (поправка Беглі)

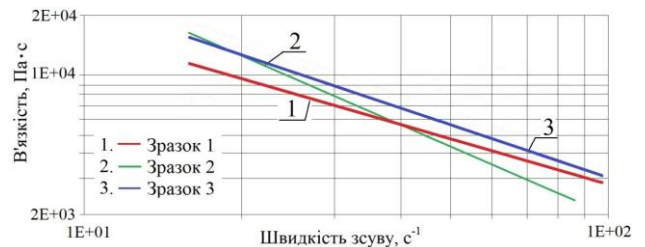


Рис. 6 – Залежність ефективної зміни опору зсуву (в'язкості) від швидкості деформації зсуву полімерних композиційних матеріалів з урахуванням їх походження (поправка Вайсенберга-Рабіновича)

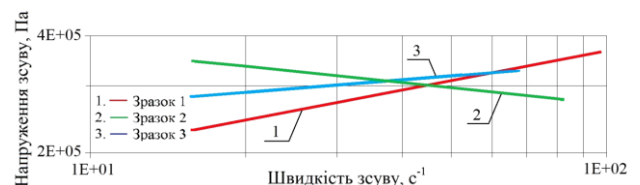


Рис. 7 – Залежність зсувного напруження від швидкості деформації зсуву полімерних композиційних матеріалів з урахуванням вхідних втрат (поправка Беглі).

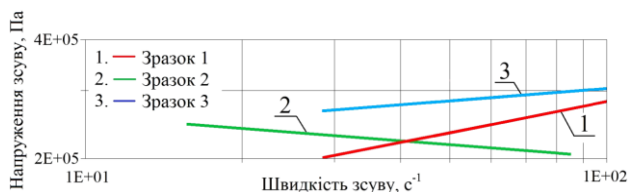


Рис. 8 – Залежність зсувного напруження від швидкості деформації зсуву полімерних композиційних матеріалів з урахуванням їх походження (поправка Вайсенберга-Рабіновича)

Впровадження результатів, досягнутих при реологічних дослідженнях призведе до підвищення ефективності виробництва проводів і кабелів на лініях екструзії полімерних композиційних матеріалів Зразок 1 та Зразок 2 із забезпеченням високих параметрів якості. У дослідженні пропонується досягнення такого результату на основі науково визначених оптимальних значень реологічних властивостей.

Вогнестійкі властивості полімерних композицій з нанорозмірними ад'ювантами на основі діоксиду кремнію визначені методом кисневого індексу. Результати цих досліджень показують (табл. 5) збільшення кисневого індексу для полімерних композиційних матеріалів Зразок 1 та Зразок 2 на 1,5 % та 1 % відповідно порівняно зі Зразком 3. Більш ефективною є полімерна композиція Зразок 1, яка містить нанорозмірний діоксид кремнію із середнім діаметром частинок близько 0,15 μm .

Визначено фізико-механічні властивості полімерних композицій. У табл. 5 наведено результати дослідження. Оцінюючи результати випробувань стійкості до дії підвищених температур полімерних композиційних матеріалів, було встановлено невелике зменшення міцності під час розривання для полімерних композиційних матеріалів Зразок 1 та Зразок 2 порівняно зі Зразком 3. Водночас зареєстровано підвищення видовження під час розривання на 13,0-15,0 % відносно Зразка 3. Модуль пружності під час розривання значно підвищується для полімерного композиційного матеріалу Зразок 1 з нанометровим діоксидом кремнію із середнім розміром частинок 0,15 μm . Іншим важливим досягненням є збільшення міцності та відносного видовження під час розривання після витримки 7×24 години при температурі 100 °C порівняно з полімерним композиційним матеріалом Зразок 3, який не містить ад'ювантів. Стійкість до дії температури 100 °C для полімерного композиційного матеріалу Зразок 1, що містить кремнію діоксид із середнім розміром частинок 0,15 μm , підвищується на 32 %.

Були досліджені електрофізичні характеристики полімерних композиційних

матеріалів. Зразки для вимірювання електрофізичних параметрів полімерних композицій були виготовлені методом вальцювання з послідовним пресуванням, температура 175 °C, з товщиною (1,0±0,1) мм. Обладнання, що використовувалося в експерименті для визначення питомого електричного опору та міцності, включало прилад типу АІІІ-70, вимірювач електричного опору КИСІ-1.

Таблиця 5 – Результати дослідження фізико-механічних властивостей полімерних композиційних матеріалів

Найменування показника	Отримані результати для Зразків		
	1	2	3
Густина, г/см ³	1,43	1,43	1,455
Міцність під час розривання, Н/мм ²	16,7	15,7	18,5
Відносне видовження під час розривання, %	253	250	220
Модуль пружності під час розтягування, Н/мм ²	18,75	8,241	8,489
Міцність під час розривання, після витримки 7×24 год. за температури (100±2) °C, Н/мм ²	17,46	16,6	17,76
Зміна міцності під час розривання, після витримки 7×24 год. за температури (100±2) °C, %	4,37	5,40	-4,16
Відносне видовження під час розривання після витримки 7×24 год. за температури (100±2) °C, %	238	207	180
Зміна відносного видовження під час розривання після витримки 7×24 год. за температури (100±2) °C, %	-6,3	-16,9	-22,2
Твердість за Шором D	57,1	56,2	58
Кисневий індекс, %	35,0	34,5	33,5

Електрична міцність полімерних композиційних матеріалів виміряна при змінній напрузі до 50 кВ та частоті 50 Гц. Об'ємний електричний опір вимірювався за допомогою вимірювача опору ізоляції кабелю КИСІ-1 при напрузі 1000 В. Результати цього дослідження наведено в табл. 6.

Таблиця 6 – Електрофізичні характеристики полімерних композиційних матеріалів

Найменування показника	Отримані результати для Зразків		
	1	2	3
Питомий об'ємний електричний опір, Ом·см	$1,31 \cdot 10^{16}$	$1,22 \cdot 10^{16}$	$1,00 \cdot 10^{16}$
Електрична міцність, кВ/мм	48,0	47,0	45,0

Згідно з табл. 6, шляхом додавання нанометрових ад'ювантів питомий об'ємний електричний опір збільшується з $1,10 \times 10^{16}$ до $1,31 \times 10^{16}$ Ом·см, а електрична міцність – з 45,0 до 48,0 кВ/мм. Електроізоляційні властивості полімерних композиційних матеріалів покращуються з підвищенням електричної міцності та питомого об'ємного електричного опору. Найвищі значення питомого об'ємного електричного опору та електричної міцності були отримані для полімерного композиційного матеріалу Зразок 1 (що вміщує ад'ювант із середнім розміром частинок 0,15 μm).

Нанодобавки роблять значний внесок у електрофізичні властивості пожежобезпечних полімерних композитних матеріалів. Надмолекулярна структура, що утворюється у складі та відповідає за електрофізичні характеристики пожежобезпечних полімерних композиційних матеріалів, може бути підтверджена результатами досліджень діелектричної міцності та питомого об'ємного електричного опору.

Результати дослідження можуть бути впроваджені у виробництві безгалогенних пожежобезпечних полімерних композиційних матеріалів та проводів і кабелів на їх основі високої якості (високі показники вогнестійкості, електричних, теплових, фізичних та механічних характеристик ізоляції та оболонки). Ці параметри роблять кабельну продукцію конкурентоспроможною на ринку.

Висновки

Нанометрові ад'юванти на основі кремнію діоксиду впливають на формування надмолекулярної структури пожежобезпечних полімерних композиційних матеріалів для кабельних виробів, наповнених такими нанодобавками. Про це свідчить збільшення температур фазового переходу на 2–3 $^{\circ}\text{C}$, температури початку розкладу на 3,7–13 $^{\circ}\text{C}$ та кінця розкладу на 4–14 $^{\circ}\text{C}$. Визначено кінетичні характеристики перетворення полімерних композицій; зокрема, енергія активації збільшується на 6–8 кДж/моль для полімерних композиційних матеріалів Зразок 1, 2 під впливом нагріву від 20,0 до 650,0 $^{\circ}\text{C}$.

Нанометрові ад'юванти на основі кремнію діоксиду покращують реологічні властивості вогнетривких полімерних композицій, а також збільшують їхній індекс текучості розплаву. Спостерігається значне зниження в'язкості розплаву пожежобезпечних полімерних композицій зі збільшенням швидкості зсуву. Напруження зсуву для досягнення вищих швидкостей зсуву в полімерних композиціях Зразок 1 та Зразок 2 зменшується.

Встановлено, що в результаті впливу нанорозмірних ад'ювантів на формування надмолекулярної структури безгалогенних пожежобезпечних полімерних композицій відбувається збільшення:

- питомого об'ємного електричного опору з $1,00 \cdot 10^{16}$ до $1,31 \cdot 10^{16}$ Ом·см;
- електричної міцності з 45,0 до 48,0 кВ/мм.
- відносного видовження при розриві;
- міцності та відносного видовження при розриві після витримки 7×24 години за 100 $^{\circ}\text{C}$ у порівнянні з полімерним композиційним матеріалом, що не містить ад'ювантів.

Список літератури

1. Liu H., Wang W., Yan L., Xu Zh. Flammability degradation behavior and ageing mechanism of flame-retardant cable sheath under different ageing conditions. *Polymer degradation and stability*. 2024. 2024230. 111019. doi:10.1016/j.polymdegradstab.2024.111019.
2. Li Y., Qi L., Liu Y., Qiao J., Wang M., Liu X., Li S. Recent Advances in Halogen-Free Flame Retardants for Polyolefin Cable Sheath Materials. *Polymers*. 2022. 14. 2876. doi:10.3390/polym14142876.
3. Gupta R., Singh M. K., Rangappa S. M., Siengchin S., Dhakal H. N., Zafar S. Recent progress in additive inorganic flame retardants polymer composites: Degradation mechanisms, modeling and applications. *Heliyon*. 2024. 10 (21). e39662. doi:10.1016/j.heliyon.2024.e39662.
4. Nazir R., Gooneie A., Lehner S., Jovic M., Rupper P., Ott N., Hufenus R., Gaan S. Alkyl sulfone bridged phosphorus flae-retardants for polypropylene. *Materials & Design*. 2021. 200. 109459. doi: 10.1016/j.matdes.2021.109459.
5. El Omari Y., Yousfi M., Duchet-Rumeau J., Maazouz A. Interfacial rheology for probing the in situ chemical reaction at interfaces of molten polymer systems. *Materials Today Communications*. 2023. 35 (105640). doi:10.1016/j.mtcomm.2023.105640.
6. Xu J., Chen C., Li Y., Zhou H., Hao X., Ou R., Wang Q. Optimizing the rheological and mechanical properties of ultra-highly filled wood fiber/polyethylene composites through binary alloy matrix strategy. *Composites Science and Technology*. 2024. 256 (110740) doi:10.1016/j.compscitech.2024.110740.
7. Ghomi E. R., Khosravi F., Mossayebi Z., Ardahaei A. S., Dehaghi F. M., Khorasani M., Neisiany R. E., Das O., Marani A., Mensah R. A., Jiang L., Xu Q., Försth M., Berto F., Ramafrihna S. The Flame Retardancy of Polyethylene Composites: From Fundamental Concepts to

- Nanocomposites. *Molecules*. 2020. 25, 5157. doi:10.3390/molecules25215157.
8. Hirschler M. M. Flame retardants and heat release: review of data on individual polymers. *Fire and Materials*. 2014. doi:10.1002/fam.2242.
9. Qiu X., Wu Ch., Lin J., Ding L., Hu J., Gao W., Chi Y., Ma M., Huang W. Construction of MOFs-based nanocomposites and their application in flame retardant polymers: A review. *Polymer degradation and stability*. 2024. 229. 110982. doi: 10.1016/j.polyimdeggradstab.2024.110982.
10. Liu L., Zhu M., Feng J., Peng H., Shi Y., Gao J., Tang L-C., Song P. Fire-retardant and high-strength polymeric materials enabled by supramolecular aggregates. *Aggregate*. 2024. 5:e494. doi:10.1002/agt.2.494.
11. Cavodeau F., Sonnier R., Otazaghine B., Lopez-Cuesta J-M., Delaite Ch. Ethylene-vinyl acetate copolymer/aluminium trihydroxide composites: A new method to predict the barrier effect during cone calorimeter tests. *Polymer degradation and stability*. 2015. 120. P. 23–31. doi: 10.1016/j.polyimdeggradstab.2015.05.021.
12. Yang Y., Liu Zh., Hao Y. 2-Flame retardant selection for thermoplastics. *Flame Retardant Selection for Polymers*. 2025. P. 27–61. doi:10.1016/B978-0-443-22247-4.00009-4.
13. Rueda M. M., Auscher M-C., Fulchiron R., Périé Th., Martin Gr., Sonntag Ph., Cassagnau Ph. Rheology and applications of highly filled polymers: A review of current understanding. *Progress in Polymer Science*. 2017. 66. P. 22–53. doi: 10.1016/j.progpolymsci.2016.12.007.
14. Karaki A., Hammoud A., Masad E., Khraisheh M., Abdala A., Ouederni M. A review on material extrusion (MEX) of polyethylene – Challenges, opportunities, and future prospects. *Polymer*. 2024. 307. P. 127333. doi: 10.1016/j.polymer.2024.127333.
15. Sharma V., Agarwal Sh., Mathur A., Singhal Sh., Wadhwa Sh. Advancements in nanomaterial based flame-retardants for polymers: A comprehensive overview. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2024. 133. P. 38–52. doi:10.1016/j.jiec.2023.12.010.
16. Sonnier R., Viretto A., Dumazert L., Longerey M., Buonomo S., Gallard B., Longuet Cl., Cavodeau Fl., Lamy R., Freitag A. Fire retardant benefits of combining aluminum hydroxide and silica in ethylene-vinyl acetate copolymer (EVA). *Polymer degradation and stability*. 2016. 128. P. 228–236. doi: 10.1016/j.polyimdeggradstab.2016.03.030.
17. Priyadharshini A., Xavier J. A Review on Functional nanocomposites for enhanced anticorrosion and flame retardant properties. *Surfaces and Interfaces*. 2025. 70, 106850. doi:10.1016/j.surfin.2025.106850.
18. Beigbeder J., Lopez-Cuesta J-M. Chapter 12 - Environmental challenges and perspectives in the development of nanocomposites for enhanced flame-retardant properties. *Flame Retardant Nanocomposites. Emergent Nanoparticles and their Applications. Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering*. 2024. P. 369–424. doi: 10.1016/j.radphyschem.2018.05.003.
19. Yan J., He Y., Liu L., Li X., Shen W., Xu M. High-efficient flame retardant ethylene-vinyl acetate composites by incorporating monomolecular IFR and its pyrolysis behaviour. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2023. 175. P. 106210. doi:10.1016/j.jaap.2023.106210.
20. Çağlayan T., Güven O. Preparation and characterization of poly(ethylene vinyl acetate) based nanocomposites using radiation -modified montmorillonite. *Radiation Physics and Chemistry*. 2018. 169. P. 107844 doi: 10.1016/j.radphyschem.2018.05.003.
21. Afolabi O. A., Ndou N. Synergy of Hybrid Fillers for Emerging Composite and Nanocomposite Materials. A Review. *Polymers*. 2024. 16. P. 1907. doi:10.3390/polym16131907.
22. Baghaei B., Jafari S. H., Khonakdar H. A., Ashabi L. Thermal properties of novel clay containing nanocomposites based on low density polyethylene/ethylene-octene copolymer blends. *E-Polymers*. 2009. P. 82. doi:10.1515/epoly.2009.9.1.986.
23. Merinska D., Tesarikova A., Kalendova A. Polyethylene/Ethylene Vinyl Acetate and Ethylene Octene Copolymer/Clay Nanocomposite Films: Different Processing Conditions and Their Effect on Properties. *Polymer Engineering and Science*. 2019. 59. 12. P. 2514–2521. doi:10.1002/pen.25250.
24. Diao J., Huang X., Jia Q., Liu F., Jiang P. Thermoplastic isotactic polypropylene/ethylene-octene polyolefin copolymer nanocomposite for recyclable HVDC cable insulation. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2017. 24. 3. P. 1416–1429. doi:10.1109/TDEI.2017.006208.
25. Chuleyeva E. V., Zolotaryov V. M. Study of the influence of magnesium hydroxide on the combustibility performance of polymer compositions based on ethylene vinyl acetate copolymer. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2017. 2. P. 61–66. doi: 10.20998/2074-272X.2017.2.07.
26. Zolotaryov V., Chulieieva O., Antonets, T. Estimating the influence of polyorganosiloxanes on the properties of fire-retardant halogen-free polymer compositions for cable articles. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2025. 3 (135). P. 6–14. doi:10.15587/1729-4061.2025.331134
27. Chulieieva O. Effect of flame retardant fillers on the rheological properties of composite materials of ethylene-vinyl acetate copolymer. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2017. 4/1 (88). P. 32–37. doi:10.15587/1729-4061.2017.108187.
28. ДСТУ EN 60811-501:2018 Електричні та волоконно-оптичні кабелі. Методи випробування неметалевих матеріалів. Ч. 501. Механічні випробування. Випробування для визначення механічних властивостей матеріалів ізоляції та оболонок (EN 60811-501:2012, IDT; IEC 60811-501:2012, IDT).
29. ISO 4589-2:2017. Plastics – Determination of burning behavior by oxygen index – Part 2: Ambient-temperature test.
30. Chulieieva O. V., Zolotaryov V. M., Regulation of electrophysical properties of fire-safe polymer compositions filled with hydromagnesite for cable products. *Technology audit and production reserve*. 2019. Vol. 2. № 1 (46). P. 7–9. doi: 10.15587/2312-8372.2019.161856.

References (transliterated)

1. Liu H., Wang W., Yan L., Xu Zh. Flammability degradation behavior and ageing mechanism of flame-retardant cable sheath under different ageing conditions.

- Polymer Degradation and Stability*, 2024, vol. 230, 111019, doi:10.1016/j.polyimdegradstab.2024.111019.
- Li Y., Qi L., Liu Y., Qiao J., Wang M., Liu X., Li S. Recent advances in halogen-free flame retardants for polyolefin cable sheath materials. *Polymers*, 2022, vol. 14, 2876, doi:10.3390/polym14142876.
 - Gupta R., Singh M. K., Rangappa S. M., Siengchin S., Dhakal H. N., Zafar S. Recent progress in additive inorganic flame retardants polymer composites: Degradation mechanisms, modeling and applications. *Heliyon*, 2024, vol. 10, no. 21, e39662, doi:10.1016/j.heliyon.2024.e39662.
 - Nazir R., Gooneie A., Lehner S., Jovic M., Rupper P., Ott N., Hufenus R., Gaan S. Alkyl sulfone bridged phosphorus flame-retardants for polypropylene. *Materials & Design*, 2021, vol. 200, 109459, doi:10.1016/j.matdes.2021.109459.
 - El Omari Y., Yousfi M., Duchet-Rumeau J., Maazouz A. Interfacial rheology for probing the in situ chemical reaction at interfaces of molten polymer systems. *Materials Today Communications*, 2023, vol. 35, 105640, doi:10.1016/j.mtcomm.2023.105640.
 - Xu J., Chen C., Li Y., Zhou H., Hao X., Ou R., Wang Q. Optimizing the rheological and mechanical properties of ultra-highly filled wood fiber/polyethylene composites through binary alloy matrix strategy. *Composites Science and Technology*, 2024, vol. 256, 110740, doi:10.1016/j.compscitech.2024.110740.
 - Ghomi E. R., Khosravi F., Mossayebi Z., Ardahaei A. S., Dehaghi F. M., Khorasani M., Neisiany R. E., Das O., Marani A., Mensah R. A., Jiang L., Xu Q., Försth M., Berto F., Ramakrishna S. The flame retardancy of polyethylene composites: From fundamental concepts to nanocomposites. *Molecules*, 2020, vol. 25, 5157, doi:10.3390/molecules25215157.
 - Hirschler M. M. Flame retardants and heat release: Review of data on individual polymers. *Fire and Materials*, 2014, doi:10.1002/fam.2242.
 - Qiu X., Wu Ch., Lin J., Ding L., Hu J., Gao W., Chi Y., Ma M., Huang W. Construction of MOFs-based nanocomposites and their application in flame retardant polymers: A review. *Polymer Degradation and Stability*, 2024, vol. 229, 110982, doi:10.1016/j.polyimdegradstab.2024.110982.
 - Liu L., Zhu M., Feng J., Peng H., Shi Y., Gao J., Tang L.-C., Song P. Fire-retardant and high-strength polymeric materials enabled by supramolecular aggregates. *Aggregate*, 2024, vol. 5, e494, doi:10.1002/agt2.494.
 - Cavodeau F., Sonnier R., Otazaghine B., Lopez-Cuesta J.-M., Delaite C. Ethylene-vinyl acetate copolymer/aluminium trihydroxide composites: A new method to predict the barrier effect during cone calorimeter tests. *Polymer Degradation and Stability*, 2015, vol. 120, pp. 23–31, doi:10.1016/j.polyimdegradstab.2015.05.021.
 - Yang Y., Liu Zh., Hao Y. Flame retardant selection for thermoplastics. In: *Flame Retardant Selection for Polymers*, 2025, pp. 27–61, doi: 10.1016/B978-0-443-22247-4.00009-4.
 - Rueda M. M., Auscher M.-C., Fulchiron R., Périé T., Martin G., Sonntag P., Cassagnau P. Rheology and applications of highly filled polymers: A review of current understanding. *Progress in Polymer Science*, 2017, vol. 66, pp. 22–53, doi:10.1016/j.progpolymsci.2016.12.007.
 - Karaki A., Hammoud A., Masad E., Khraishah M., Abdala A., Ouederni M. A review on material extrusion (MEX) of polyethylene – Challenges, opportunities, and future prospects. *Polymer*, 2024, vol. 307, 127333, doi:10.1016/j.polymer.2024.127333.
 - Sharma V., Agarwal S., Mathur A., Singhal S., Wadhwa S. Advancements in nanomaterial-based flame-retardants for polymers: A comprehensive overview. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2024, vol. 133, pp. 38–52, doi:10.1016/j.jiec.2023.12.010.
 - Sonnier R., Viretto A., Dumazert L., Longerey M., Buonomo S., Gallard B., Longuet C., Cavodeau F., Lamy R., Freitag A. Fire retardant benefits of combining aluminum hydroxide and silica in ethylene-vinyl acetate copolymer (EVA). *Polymer Degradation and Stability*, 2016, vol. 128, pp. 228–236, doi:10.1016/j.polyimdegradstab.2016.03.030.
 - Priyadharshini A., Xavier J. A review on functional nanocomposites for enhanced anticorrosion and flame retardant properties. *Surfaces and Interfaces*, 2025, vol. 70, 106850, doi:10.1016/j.surfin.2025.106850.
 - Beigbeder J., Lopez-Cuesta J.-M. Environmental challenges and perspectives in the development of nanocomposites for enhanced flame-retardant properties. *Flame Retardant Nanocomposites. Emergent Nanoparticles and their Applications. Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering*, 2024, pp. 369–424, doi:10.1016/j.radphyschem.2018.05.003.
 - Yan J., He Y., Liu L., Li X., Shen W., Xu M. High-efficient flame retardant ethylene-vinyl acetate composites by incorporating monomolecular IFR and its pyrolysis behavior. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2023, vol. 175, 106210, doi:10.1016/j.jaap.2023.106210.
 - Çağlayan T., Güven O. Preparation and characterization of poly(ethylene vinyl acetate)-based nanocomposites using radiation-modified montmorillonite. *Radiation Physics and Chemistry*, 2020, vol. 169, 107844, doi:10.1016/j.radphyschem.2018.05.003.
 - Afolabi O. A., Ndou N. Synergy of hybrid fillers for emerging composite and nanocomposite materials – A review. *Polymers*, 2024, vol. 16, 1907, doi:10.3390/polym16131907.
 - Baghaei B., Jafari S. H., Khonakdar H. A., Ashabi L. Thermal properties of novel clay-containing nanocomposites based on low-density polyethylene/ethylene-octene copolymer blends. *E-Polymers*, 2009, vol. 082, doi:10.1515/epoly.2009.9.1.986.
 - Merinska D., Tesarikova A., Kalendova A. Polyethylene/ethylene vinyl acetate and ethylene-octene copolymer/clay nanocomposite films: Different processing conditions and their effect on properties. *Polymer Engineering and Science*, 2019, Vol. 59, no. 12, pp. 2514–2521, doi:10.1002/pen.25250.
 - Diao J., Huang X., Jia Q., Liu F., Jiang P. Thermoplastic isotactic polypropylene/ethylene-octene polyolefin copolymer nanocomposite for recyclable HVDC cable insulation. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2017, vol. 24, no. 3, pp. 1416–1429, doi:10.1109/TDEI.2017.006208.
 - Chuleyeva E. V., Zolotaryov V. M. Study of the influence of magnesium hydroxide on the combustibility performance of polymer compositions based on ethylene vinyl acetate copolymer. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2017, no. 2, pp. 61–66, doi:10.20998/2074-272X.2017.2.07.
 - Zolotaryov V., Chulieieva O., Antonets T. Estimating the influence of polyorganosiloxanes on the properties of fire-

- retardant halogen-free polymer compositions for cable articles. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2025, vol. 3, no. 6 (135), pp. 6–14, doi:10.15587/1729-4061.2025.331134.
27. Chulieieva O. Effect of flame retardant fillers on the rheological properties of composite materials of ethylene-vinyl acetate copolymer. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2017, vol. 4/1 (88), pp. 32–37, doi:10.15587/1729-4061.2017.108187.
28. DSTU EN 60811-501:2018 Electrical and fibre optic cables. Test methods for non-metallic materials. Part 501. Mechanical tests. Tests for determining the mechanical properties of insulation and sheath materials (EN 60811-501:2012, IDT; IEC 60811-501:2012, IDT).
29. ISO 4589-2:2017 Plastics – Determination of burning behavior by oxygen index – Part 2: Ambient-temperature test.
30. Chulieieva O. V., Zolotaryov V. M. Regulation of electrophysical properties of fire-safe polymer compositions filled with hydromagnesite. *Technology Audit and Production Reserves*, 2019, vol. 2, no. 1 (46), pp. 7–9, doi: 10.15587/2312-8372.2019.161856.

Відомості про авторів (About the Authors)

Золотарьов Володимир Михайлович – доктор технічних наук, Генеральний директор, ПАТ «Завод Південкабель», м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-3886-4993; e-mail: zavod@yuzhcable.com.ua.

Zolotaryov Volodymyr – Doctor of Technical Sciences, Professor, Director General, PJSC «Yuzhcable Works», Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-3886-4993; e-mail: zavod@yuzhcable.com.ua.

Чулєєва Олена Володимирівна – доктор технічних наук, директор науково-технічного центру, ПАТ «Завод Південкабель», м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-7310-0788; e-mail: echuleeva@ukr.net.

Chulieieva Olena – Doctor of Technical Sciences, Director of the Science and Technology Center, PJSC «Yuzhcable Works», Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-7310-0788; e-mail: echuleeva@ukr.net.

Антонець Тарас Юрійович – кандидат технічних наук, заступник головного технолога, ПАТ «Завод Південкабель», м. Харків, Україна; ORCID: 0009-0007-2388-2252, e-mail: t.antonets@yuzhcable.com.ua.

Antonets Taras – PhD, Deputy Chief Technologist, PJSC «Yuzhcable Works», Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0009-0007-2388-2252, e-mail: t.antonets@yuzhcable.com.ua.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Золотарьов В. М., Чулєєва О. В., Антонець Т. Ю. Оптимізація властивостей безгалогенних пожегобезпечних полімерних композицій, що використовуються у кабельній продукції. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2026. № 1 (27). С. 89-99. doi:10.20998/2413-4295.2026.01.12.

Please cite this article as:

Zolotaryov V., Chulieieva O., Antonets T. Optimization of the properties of halogen-free fire-retardant polymer compositions for cable products. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2026, no. 1(27), pp. 89-99. doi:10.20998/2413-4295.2026.01.12.

*Надійшла (received) 29.01.2026
Прийнята (accepted) 15.03.2026
Опублікована (published) 02.04.2026*