

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

УДК 621.319

Мірчук І.А.

ПрАТ «Український науково-дослідний інститут кабельної промисловості»

ВПЛИВ РАДІАЦІЙНОГО МОДИФІКУВАННЯ ОБОЛОНКИ З БЕЗГАЛОГЕННОЇ КОМПОЗИЦІЇ, ЩО НЕ ПОШИРЮЄ ПОЛУМ'Я НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ КАБЕЛІВ

Визначено оптимальний технологічний коефіцієнт опромінення суднового кабелю СПОВЭнг-FRHF 12х2,5 з оболонкою із безгалогенної композиції, що не поширює полум'я марки Вінтес 2010.

Встановлено, що після радіаційної модифікації (зшивання прискореними електронами) оболонки підвищується стійкість кабелю до впливу індустриальної оливи, озону, механічної дії при підвищеній температурі.

Визначені енергія активації термічного окислення для термопластичної і зшитої безгалогенної композиції, що не поширює полум'я марки Вінтес 2010, залежність термічної витривалості оболонки від робочої температури кабелю. Виконано прогноз терміну служби кабелю в залежності від робочої температури. Проведені розрахунки показують, що в діапазоні максимальних робочих температур (80-90) °С термін служби кабелю з оболонкою зі зшитої безгалогенної композиції перевищує термін служби кабелю з оболонкою з термопластичної композиції в 1,5-2 рази.

Ключові слова: кабелі, радіаційне модифікування, пучок електронів, безгалогенна композиція, що не поширює полум'я, коефіцієнт опромінення, зшивання, теплостійкість, термічна витривалість, енергія активації, напругування.

Постановка проблеми. Безгалогенні композиції, що не поширюють полум'я, в останні роки знаходять все більш широке застосування в кабельній промисловості, зокрема у виробництві пожежебезпечних кабелів.

Застосування таких композицій для ізоляції і оболонки кабелів дозволяє підвищити їх стійкість до поширення полум'я, знизити димоутворення під час горіння кабелю, при цьому виключивши виділення галогеновмісних корозійно-активних газів [1]. У результаті взаємодії газів, що містять галогени (як правило, це хлор), з вологою повітря утворюються кислоти, які завдають значної шкоди різному електричному обладнанню не тільки в зоні пожежі та безпосередній близькості до неї, а й на значній відстані.

Безгалогенні композиції для ізоляції та оболонки кабелів виготовляються на основі поліолефінів із введенням у полімер значної кількості (до 70 мас.%) антипіренів, що збільшують стійкість матеріалу до поширення полум'я.

Термопластичні безгалогенні матеріали, як і ПВХ пластикати, використовуються для ізоляції кабелів із робочою температурою на жилі до +70°C.

Однак в останні роки основні тенденції розвитку як кабелів загальнопромислового призначення, так і суднових, полягають у підвищенні робочої температури на жилі до +90°C, що дає можливість значно підвищити струмові навантаження при тому ж перерізі струмопровідних жил.

Збільшення допустимої тривалої робочої температури до +90°C забезпечується за рахунок використання для ізоляції матеріалів, що мають просторово зшиту полімерну сітку – гуми на основі етиленпропіленового або кремнійорганічного каучуків, зшитого поліетилену або зшитих композицій на основі поліолефінів [2].

На практиці використовуються 3 методи зшивання полімерних матеріалів:

1) за допомогою пероксидів (проводять, як правило, на лініях безперервної вулканізації, за рахунок розкладання перекисів, попередньо введених у полімер);

2) за допомогою органосиланових груп (здійснюється у водяній бані в результаті реакції введених у полімерну матрицю органосиланових груп із водою, з утворенням між макромолекулами зв'язків через групи O-Si-O);

3) радіаційний (модифікування полімеру здійснюють на спеціальних установках шляхом опромінення прискореними електронами, в результаті рекомбінації макрорадикалів молекул, що утворюються при опроміненні, матеріал набуває просторової структури).

Вплив технологічних параметрів радіаційного опромінення на електричні та фізико-механічні властивості кабельної ізоляції, виконаної з безгалогенної, що не поширює полум'я композиції на основі етилен-вінілацетату, а також кореляційні залежності між ними розглянуті в [3].

Метою статті є визначення впливу радіаційного модифікування на експлуатаційні властивості кабелю з оболонкою з безгалогенної, що не поширює полум'я, полімерної композиції на основі поліолефінів, а також визначення оптимальних технологічних параметрів опромінення, при яких забезпечується стійкість оболонки до зовнішніх факторів впливу.

Виклад основного матеріалу. Зразки судового кабелю марки СПОВЭнг-FRHF 12х2,5 з оболонкою з безгалогенної композиції, що не поширює полум'я, марки Вінтес 2010 піддавалися впливу прискорених електронів (радіаційному модифікуванню) на промисловому прискорювачі електронів ЕЛВ-2 при різних технологічних параметрах (коефіцієнтах опромінення).

Коефіцієнт опромінення (K) являє собою відношення швидкості проходження кабелю під пучком електронів, до струму пучка електронів. Відповідно, зі зменшенням K , збільшується ступінь опромінення оболонки кабелю, і навпаки.

Радіаційне модифікування оболонки проводили на ділянці опромінення зарядженими частинками в ТОВ «Азовська кабельна компанія», м. Бердянськ, при наступних технологічних параметрах:

- 1) коефіцієнт опромінення $K = 3; 2; 1,5; 1,2; 1,0$ і $0,8$;
- 2) енергія електронів – $1,2$ MeV;
- 3) струм пучка електронів – 10 mA;
- 4) кількість проходів кабелю під пучком електронів – 18 ;
- 5) товщина оболонки кабелю – $1,8$ мм.

Вплив коефіцієнта опромінення на фізико-механічні властивості оболонки

Залежність міцності при розтягуванні і відносного видовження при розриві від коефіцієнта опромінення приведено на рис. 1 і 2.

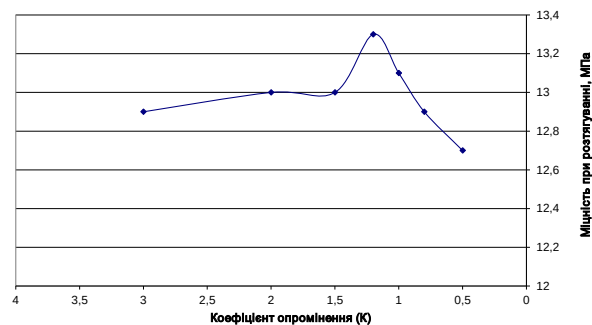


Рис. 1. Залежність міцності при розтягуванні оболонки від коефіцієнта опромінення

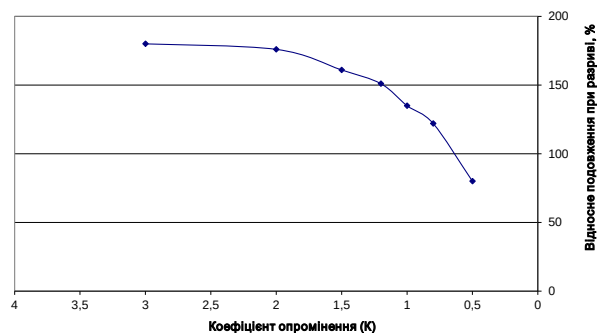


Рис. 2. Залежність відносного подовження оболонки при розриві від коефіцієнта опромінення

З отриманих даних видно, що зі зменшенням K (зі збільшенням ступеня опромінення) відносне подовження оболонки при розриві знижується і при $K=0,5$ знаходиться нижче мінімальної допустимої величини (120%).

Міцність при розтягуванні оболонки, внаслідок її зшивання і виникання поперечних зв'язків між макромолекулами, незначно зростає при опроміненні з $K=1,2$ і вище. При подальшому збільшенні дози опромінення спостерігається зниження міцності, викликане початком переважання процесу деструкції макромолекул над процесом зшивання.

Вплив коефіцієнта опромінення на ступінь зшивання оболонки

Ступінь зшивання оболонки визначали за допомогою вимірювання теплової деформації відповідно до методики, викладеної в [4].

Суть методу полягає у визначенні відносного подовження зразка матеріалу, що знаходиться під навантаженням 20 Н/см², після 15 хвилин перебування в термостаті при температурі 200°C .

Згідно з вимогами [5] матеріал вважається зшитим, якщо його відносне подовження при випробуванні на теплову деформацію не перевищує 175% .

Як видно з представлених даних (Таблиця 1), безгалогенна композиція набуває зшитої струк-

тури при $K=3$ і збільшує ступінь зшивання зі зниженням коефіцієнта опромінення.

Вплив коефіцієнта опромінення на стійкість до впливу індустриальної оливи

При експлуатації кабелів на судах або різних промислових об'єктах є висока ймовірність впливу на оболонку кабелю індустриальних олив. Для визначення стійкості суднових кабелів до впливу олив зразки оболонки у вигляді стандартних лопаток витримують в індустриальній оливі IRM902 при температурі 100°C протягом 24 годин, після чого визначають зміну величини міцності при розриві і відносного подовження, яка не повинна перевищувати 40% від вихідних (до витримки в оливі) величин [5].

Як видно з представлених у таблиці 1 даних, зразки безгалогенної композиції, що не піддавалася радіаційному модифікуванню і опроміненій з $K=3$, не є стійкими до дії оливи.

Однак при подальшому зниженні коефіцієнта опромінення і, відповідно, підвищення ступеня

зшивання стійкість до впливу оливи збільшується і при $K=1,0-1,2$ відповідає встановленим вимогам.

Зразки, які характеризуються тепловою деформацією під навантаженням в діапазоні (10-50) %, мають найкращі показники стійкості до впливу індустриальної оливи.

Значне збільшення зміни відносного подовження після витримки в оливі при $K=0,5$ і $K=0,8$ пов'язано з низьким значенням відносного подовження вихідних зразків унаслідок їх переопромінення.

Виходячи з отриманих даних, визначено коефіцієнт опромінення оболонки $K=1,2$, при якому забезпечується оптимальне поєднання вихідних фізико-механічних параметрів, стійкості до оливи і деформації при підвищеній температурі.

Отже, подальші випробування проводили на зразку кабелю з коефіцієнтом опромінення $K=1,2$.

У таблиці 2 наведено результати порівняльних випробувань термопластичної (що не піддавалася радіаційному модифікуванню) і зшитой з

Таблиця 1

Вплив коефіцієнта опромінення на теплову деформацію і стійкість до дії олив оболонки кабелю, виконаної з безгалогенної композиції на основі поліолефінів, що не поширює полум'я

Коефіцієнт опромінення (K)	Теплова деформація в режимі $200^{\circ}\text{C}/20\text{H}/\text{cm}^2/15\text{ хв, \%}$	Фізико-механічні показники після витримки в оливі марки IRM902 в режимі $100^{\circ}\text{C} / 24\text{години}$	
		Зміна міцності при розтягуванні, %	Зміна відносного подовження при розриві, %
Без опромінення	Руйнування зразка на 1 хвилині	Зразки не придатні для випробувань	
3,0	150-175		
2,0	100-150	-68	-65
1,5	50-100	-52	-39
1,2	10-50	-26	-36
1,0		-33	-34
0,8	5-10	-42	+67
0,5		-39	+102

Таблиця 2

Результати випробувань оболонки кабелю на стійкість до впливу озону

Тип випробувань	Результати випробувань для оболонки	
	термопластичної	радіаційно-модифікованої
1. Вихідні фізико-механічні властивості		
1.1 Міцність при розтягуванні, МПа	12,5	13,2
1.2 Відносне подовження при розриві, %	189	151
2. Стійкість до дії озону	- температура в камері: $+40^{\circ}\text{C}$ - концентрація озону: $(200\pm 50)\times 10^{-6}$ об.% - тривалість дії: 72 години	
2.1 Міцність при розтягуванні, МПа	11,7	12,6
2.1.1 Зміна від вихідної величини, %	-6,4	-4,5
2.2 Відносне подовження при розриві, %	161	140
2.2.1 Зміна від вихідної величини, %	-14,8	-7,3

$K=1,2$ безгалогенної композиції на стійкість до впливу озону, проведені відповідно до вимог [6] метод В.

Зміна відносного подовження після впливу озону для радіаційно модифікованої оболонки в 2 рази нижче, ніж для оболонки, що не піддавалася зшивці.

На рис. 3-5 наведені результати порівняльних випробувань оболонки до і після радіаційного модифікування методами термічного аналізу (ТМА і ДСК).

Термомеханічний аналіз проводили при швидкості нагріву $10^{\circ}\text{C}/\text{хв.}$ з постійним механічним навантаженням $20 \text{ Н}/\text{см}^2$.

Для незшитої оболонки деформація починається при $(80-90)^{\circ}\text{C}$ і після плавлення кристалічної фази полімеру, при температурі 120°C зразок повністю деформований.

Як видно на рис. 4, при температурі 120°C зразок зшитої оболонки зберігає 75% від початкової товщини і з подальшим підвищенням температури аж до 190°C практично не деформується.

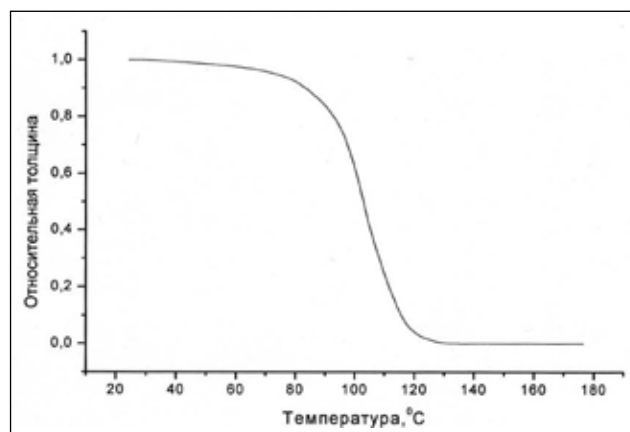


Рис. 3. Крива ТМА оболонки кабелю до опромінення (термопластична оболонка)

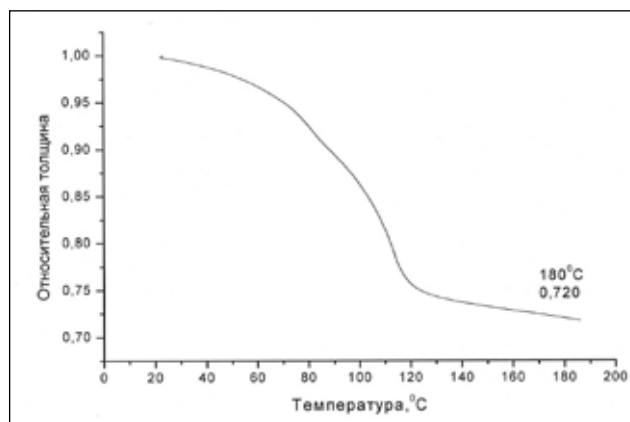


Рис. 4. Крива ТМА оболонки кабелю після радіаційного модифікування (зшита оболонка)

При випробуваннях методом диференціальної скануючої калориметрії визначено, що після радіаційного модифікування температура початку окислення оболонки знижується (рис. 5).

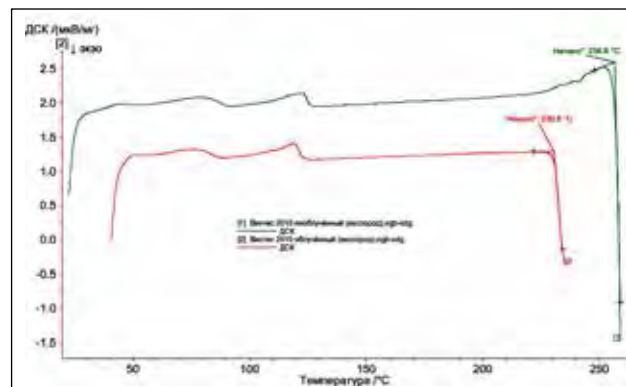


Рис. 5. Результати визначення температури початку окислення для термопластичної (1) і зшитої (2) безгалогенної композиції Вінтес 2010

Отриманий результат може свідчити про певне старіння матеріалу після дії прискорених електронів у процесі опромінення, що також підтверджується зниженням відносного подовження при розриві після радіаційного модифікування, як було зазначено вище.

Однак проведені випробування з визначення термічної витривалості показали, що розрахункові терміни напрацювання кабелів із оболонкою з радіаційно-модифікованої безгалогенної композиції Вінтес 2010 вище, ніж у кабелів з оболонкою, що не піддавалася опроміненню.

Визначення термічної витривалості оболонки (як компонента кабелю, найбільш схильного до впливу окислення та інших зовнішніх факторів) проводили відповідно до методики, викладеної в [7].

Метод випробувань полягає у визначенні часу термічного старіння, необхідного для досягнення граничного значення критичного параметра оболонки при різних температурах випробувань.

В якості критичного параметра оболонки було вибрано значення відносного подовження при розриві, що дорівнює 50%.

З отриманих даних видно, що час досягнення критичного параметра оболонки має експоненціальну залежність від температури випробувань.

Лінії регресії для термопластичної і радіаційно-модифікованої оболонки кабелю приведені на рис. 6.

Графік термічної витривалості термопластичної композиції описується лінійною функцією $y=13550x-29,47$ з достовірністю апроксимації $R^2=0,9987$ і при середньому відхиленні фактичних даних від лінії регресії $S_y=0,032$.

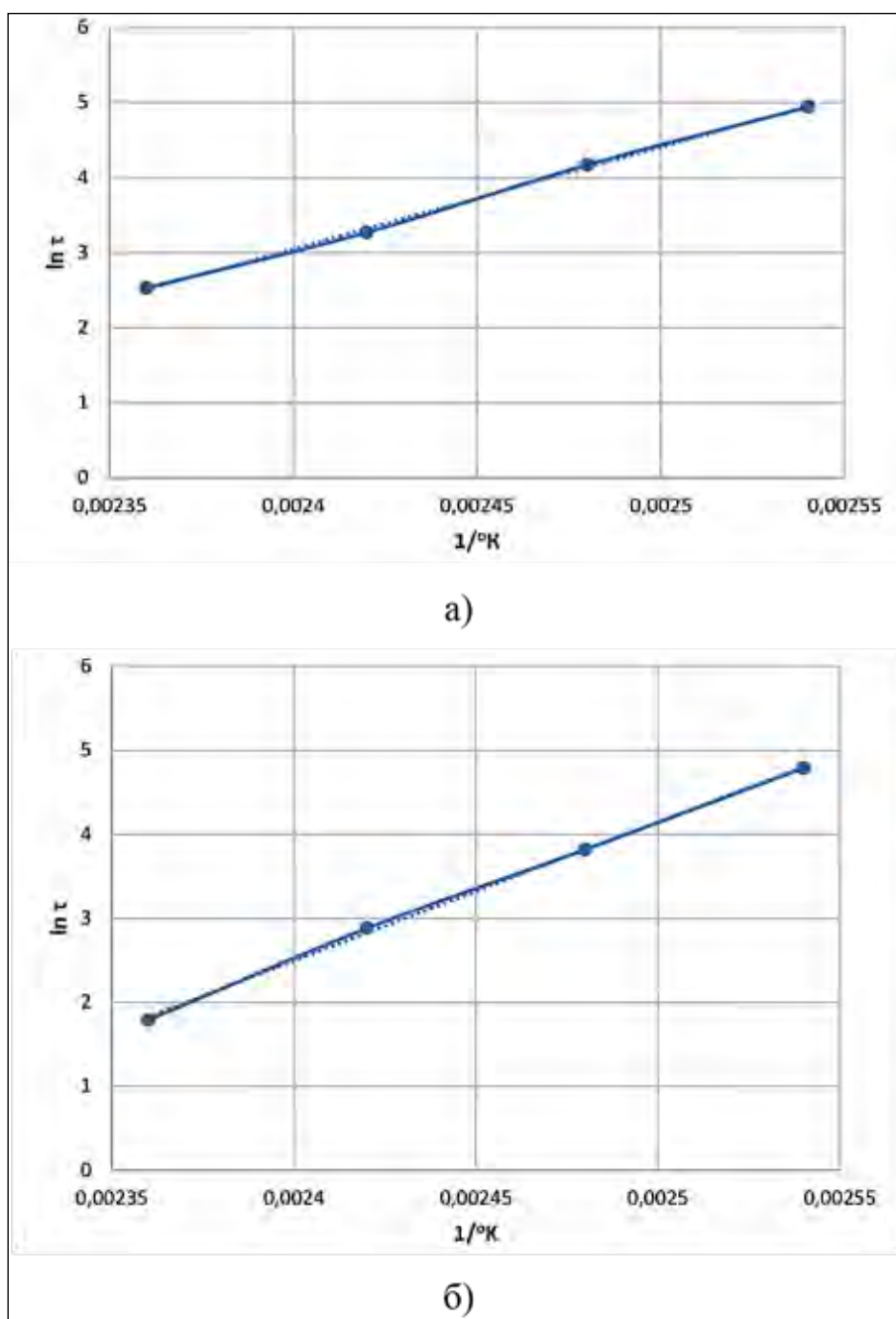


Рис. 6. Графік термічної витривалості оболонки з термопластичної (а) і радіаційно-модифікованої (б) безгалогенної композиції Вінтес 2010

Таблиця 3

**Результати випробувань оболонки кабелю
з термопластичної безгалогенної композиції марки Вінтес 2010**

Температура (Т) старіння		1/T, K ⁻¹	Час (t) до досягнення відносного подовження рівного 50%		ln t
°C	°K		година	доба	
150	423,15	0,00236	300	12,5	2,53
140	413,15	0,00242	630	26,3	3,27
130	403,15	0,00248	1560	65	4,17
120	393,15	0,00254	3360	140	4,94

Графік термічної витривалості зшитой композиції описується лінійною функцією $y=16767x-37,748$ з достовірністю апроксимації $R^2=0,9992$ і при середньому відхиленні фактичних даних від лінії регресії $S_y=0,026$.

Оскільки середнє відхилення фактичних значень від лінії регресії становить менше 0,16, то встановлена графічна залежність є придатною для прогнозування досягнення граничного стану.

На підставі графічних залежностей і отриманих коефіцієнтів регресії проведено розрахунок величин енергії активації термічного окислення і часу досягнення граничного стану в залежності від температури експлуатації для кабелів з оболонкою з термопластичної і зшитой (радіаційно-модифікованої) безгалогенної композиції марки Вінтес 2010 (таблиця 5 і рис. 7).

Виконані розрахунки показують, що в діапазоні максимальних робочих температур кабелю

(80-90)°C час досягнення критичного параметра оболонки зі зштою безгалогенною композицією перевищує даний показник для оболонки з термопластичної композиції в 1,5-2 рази.

Висновки. Отримані результати випробувань показують, що радіаційне модифікування оболонки з безгалогенної композиції, що не поширює полум'я, марки Вінтес 2010 значно підвищує стійкість кабелю до впливу індустріальної оливи, озону, механічних дій при підвищеній температурі, а також збільшує напрацювання кабелю з максимальною робочою температурою на жилі 90°C в 1,5-2 рази.

Для кабелю марки СПОВЭнг-FRHF 12х2,5 визначено оптимальний коефіцієнт опромінення оболонки ($K=1,2$), який дозволяє забезпечити необхідну стійкість кабелю до зовнішнього впливу при збереженні високих вихідних фізико-механічних характеристик оболонки.

Таблиця 4

Результати випробувань оболонки кабелю з радіаційно-модифікованої безгалогенної композиції марки Вінтес 2010

Температура (Т) старіння		1/Т, К ⁻¹	Час (t) до досягнення відносного подовження рівного 50%		ln t
°C	°K		година	доба	
150	423,15	0,00236	144	6	1,79
140	413,15	0,00242	430	17,9	2,88
130	403,15	0,00248	1100	45,8	3,82
120	393,15	0,00254	2280	120	4,79

Таблиця 5

Розрахунковий час досягнення оболонкою кабелю критичного стану

Оболонка кабелю з термопластичної безгалогенної композиції Вінтес 2010				Оболонка кабелю зі зштою безгалогенної композиції Вінтес 2010			
Енергія активації	Температура оболонки під час експлуатації кабелю	Час досягнення граничного стану		Енергія активації	Температура оболонки під час експлуатації кабелю	Час досягнення граничного стану	
кДж/моль	°C	година	рік	кДж/моль	°C	година	рік
113	90	61320	7,0	138	90	101616	11,6
	85	102492	11,7		85	192720	22,0
	80	176076	20,1		80	370548	42,3

Список літератури:

1. Мирчук И.А. Безгалогенные композиции для кабельно-проводниковой продукции. Преимущества, недостатки и особенности применения. *The Scientific Haritage*. 2018. № 30. С. 32–41.
2. Мирчук И.А. Беспрозванных А.В. Обоснование оптимальной длительно допустимой рабочей температуры современных полимерных изоляционных композиций судовых кабелей. *Вісник національного технічного університету «ХПІ»*. 2017. № 31(1253). С. 52–58.

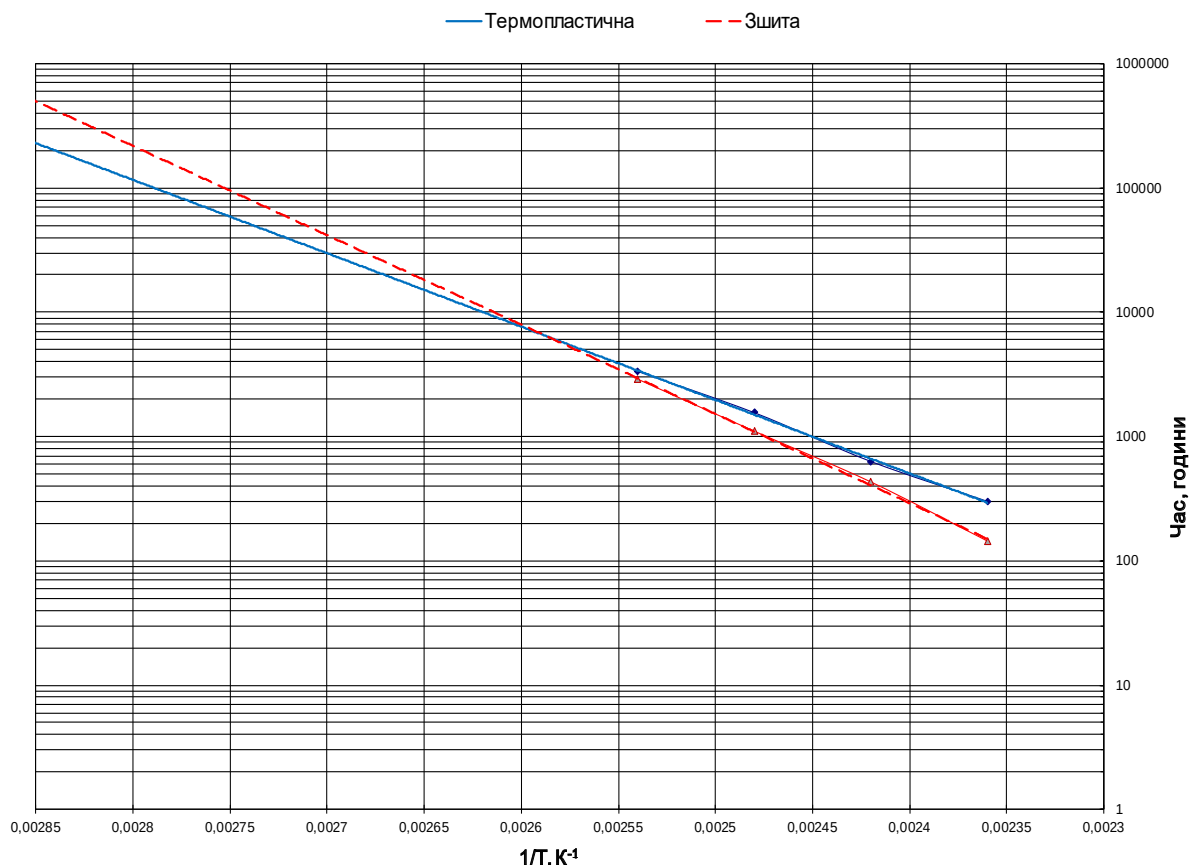


Рис. 7. Лінія критерію працездатності кабелю з оболонкою з термопластичної і зшитої (радіаційно-модифікованої) безгалогенної композиції Вінтес 2010

3. Мирчук И.А. Беспрозванных А.В. Корреляция между электрическими и механическими характеристиками кабелей с радиационно-модифицированной изоляцией на основе безгалогенной полимерной композиции. *Електротехніка і Електромеханіка*. 2018. № 4. С. 54–57. DOI : 10.20998/2074-272X.2018.4.09.

4. IEC 60811-507:2012. (2012). Electric and optical fibre cables – Test methods for non-metallic materials – Part 507 : Mechanical tests – Hot set test for cross-linked materials.

5. IEC 60092-360:2014. (2014). Electrical installations in ships – Part 360 : Insulating and sheathing materials for shipboard and offshore units, power, control, instrumentation and telecommunication cables.

6. IEC 60811-403:2012. (2012). Electric and optical fibre cables – Test methods for non-metallic materials – Part 403 : Miscellaneous tests – Ozone resistance test on cross-linked compounds.

7. IEC 60216-1:2013. (2013). Electrical insulating materials – Thermal endurance properties – Part 1 : Ageing procedures and evaluation of test results.

ВЛИЯНИЕ РАДИАЦИОННОГО МОДИФИЦИРОВАНИЯ ОБОЛОЧКИ ИЗ НЕ РАСПРОСТРАНЯЮЩЕЙ ГОРЕНИЕ БЕЗГАЛОГЕННОЙ КОМПОЗИЦИИ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА КАБЕЛЕЙ

Определен оптимальный технологический коэффициент облучения кабеля СПОВЭнг-FRHF 12х2,5 с оболочкой из не распространяющей горение безгалогенной композиции марки Винтес 2010.

Установлено, что после радиационной модификации (сшивки пучком электронов) оболочки повышается стойкость кабеля к воздействию индустриального масла, озона, механическим воздействиям при повышенной температуре.

Определены энергия активации термического окисления для термопластичной и сшитой безгалогенной не распространяющей горение композиции Винтес 2010, зависимость термической стойкости оболочки от рабочей температуры кабеля. Выполнен прогноз срока службы кабеля в зависимости от рабочей температуры. Проведенные расчеты показывают, что в области максимальных рабочих

температур кабеля (80-90)°C срок службы кабеля с оболочкой из сшитой безгалогенной композиции превышает срок службы кабеля с оболочкой из термопластичной композиции в 1,5-2 раза.

Ключевые слова: кабели, радиационное модифицирование, пучок электронов, безгалогенная не распространяющая горение композиция, коэффициент облучения, сшивка, теплостойкость, термическая устойчивость, энергия активации, наработка.

INFLUENCE OF IRRADIATION OF THE SHEATH OF HALOGEN

FREE FLAME RETARDANT COMPOUND ON THE OPERATIONAL PROPERTIES OF CABLES

The optimal technological radiation factor for the cable SPOVEng-FRHF 12x2.5 with the sheath of flame retardant halogen-free compound Vintes 2010 was defined.

After sheath irradiation (e-beam cross-linking) increase the resistance of the cable to industrial oil, ozone, and mechanical stress at elevated temperatures was determined.

The activation energy of thermal oxidation for thermoplastic and crosslinked halogen-free flame retardant compound Vintes 2010, sheath thermal endurance depending of the cable operating temperature have been determined. The forecast of the cable life-time depending on the operating temperature was carried out. The calculations show that in maximum operating temperatures range (80-90) °C the life-time of the cable with cross-linked sheath prolongs the life-time of the cable with thermoplastic sheath 1,5-2 times.

Key words: cables, irradiation, electron beam, halogen-free flame retardant compound, radiation factor, crosslinking, heat resistance, thermal endurance, activation energy, operating time.