

УДК 621.315.2

**О.В. Бондаренко, Д.М. Степанов, О.М. Власов, А.Ф. Назаренко**

Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова

кафедра волоконно-оптичних ліній зв'язку

E-mail: [vols@onat.edu.ua](mailto:vols@onat.edu.ua)**ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНОЇ НАПРУГИ В ДІЕЛЕКТРИЧНОМУ  
САМОНЕСУЧОМУ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНОМУ КАБЕЛІ ПІД ДІЄЮ  
РОЗТЯГУВАЛЬНИХ ЗУСИЛЬ ТА ТЕМПЕРАТУРИ****Анотація**

*Бондаренко О.В., Степанов Д.М., Власов О.М., Назаренко А.С. Дослідження механічної напруги в діелектричному самонесучому волоконно-оптичному кабелі під дією розтягувальних зусиль та температури. Проведене дослідження механічної напруги в діелектричному самонесучому волоконно-оптичному кабелі з периферійним силовим елементом у виді арамідних ниток «Тварон» під дією розтягувальних зусиль та температури.*

**Ключові слова:** діелектричний самонесучий волоконно-оптичний кабель, арамідні нитки, видовження кабелю, температурний коефіцієнт лінійного розширення, фіктивний модуль Юнга, фіктивна напруга кабелю.

**Загальна постановка проблеми.**

Технологічний розвиток кабельної промисловості обумовлює виробництво широкого спектру волоконно-оптичних кабелів (ВОК). Найбільш перспективними з них є повністю діелектричні ВОК (ADSS – All-Dielectric Self-Supporting Aerial Cable), які не підлягають дії електромагнітних полів та призначені, в основному, для повітряного підвішування. Такі ВОК містять у собі силові елементи, що дозволяють витримувати кабелю задані механічні та фізико-кліматичні навантаження. Як правило, в конструкції такого кабелю в якості силових елементів використовуються діелектричні центральний та периферійний силові елементи (ЦСЕ, ПСЕ). Перший виробляється зі склопластикового стержня, а другий – з арамідних ниток («Тварон» або «Кевлар»).

Вибір конструкції такого діелектричного самонесучого волоконно-оптичного кабелю (ДСВОК), що повинна забезпечувати задані значення параметрів передавання (затухання та дисперсію сигналу), механічну стійкість та надійність роботи всієї повітряної волоконно-оптичної лінії передавання, ведеться, в першу чергу, за результатами розрахунків її механічної міцності. Призначенням такої конструкції ДСВОК є забезпечення для оптичного волокна умов, при яких стан ОВ не переходить у режим анізотропії. Робота ОВ, що розміщується у ВОК, в ізотропному режимі забезпечує стабільність коефіцієнту заломлення  $n$  серцевини ОВ, а отже і стабільність параметрів передавання (коефіцієнта затухання та дисперсії сигналу). Останнє досягається використанням конструкції ДСВОК, що виключає навантаження на ОВ при дії механічних та фізико-кліматичних чинників.

У роботах [1, 2] проведені розробка методу розрахунку механічної стійкості ДСВОК до розтягувальних зусиль і методу визначення механічної міцності ДСВОК з використанням виразів фіктивних температурного коефіцієнта лінійного розширення (ТКЛР)  $\alpha_0$  та модуля Юнга  $E_{\text{фДСВОК}}$  кабелю.

У [1] відмічено, що зміна температури по різному впливає на конструктивні елементи ДСВОК, викликаючи появу додаткових температурних напруг розтягу або стискання. Це

пояснюється тим, що ТКЛР елементів ДСВОК, крім ПСЕ, є позитивний, а ТКЛР ПСЕ у виді арамідних ниток є від'ємний. Але аналіз та дослідження напруг ДСВОК в залежності від типу арамідних ниток ПСЕ, видовження кабелю та зміни температури у ДСВОК в [1] не проводились.

#### Мета дослідження.

Метою даної роботи є проведення дослідження механічних напруг у ДСВОК в залежності від типу арамідних ниток, видовження кабелю та зміни температури.

#### Розв'язання задачі та результати дослідження.

Для розв'язання поставленої задачі були прийняті наступні припущення:

1. В якості ПСЕ в ДСВОК використовуються арамідні нитки «Тварон»;
2. Враховуючи, що скручення арамідних ниток в повиві ПСЕ призводить до зменшення напруги в них приблизно на 1,2 % при кроці та радіусі скрутки відповідно 100 мм та 2,5 мм відносно їх прямолінійного розміщення вздовж вісі ВОК, то видовження арамідних ниток було прийнято рівним видовженню ДСВОК.

Як вказувалося вище, в якості ПСЕ в ДСВОК, загальна конструкція якого наведена на рис. 1, використовують, наприклад, арамідні нитки «Тварон» (типи D2200 та D1052) або «Кевлар».

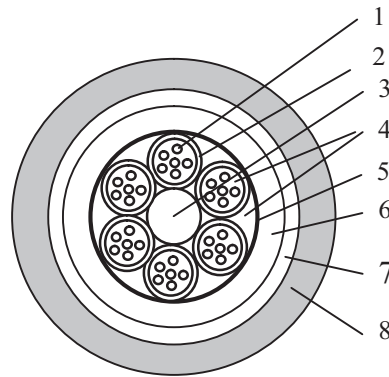


Рисунок 1 – конструкція діелектричного самонесучого оптичного кабелю:  
1 – ОВ; 2 – трубка модуля; 3 – ЦСЕ; 4 – заповнюючі компаунди; 5 – скріплюючий елемент; 6 – ПЕ оболонка; 7 – ПСЕ; 8 – захисний шланг з ПЕ

Згідно з [1] завдяки від'ємному значенню ТКЛР периферійного силового елемента у виді арамідних ниток суттєво змінюється ТКЛР всього ДСВОК. Таким чином, при зміні температури видовження ДСВОК не дорівнює видовженню кожного елемента, і тому в елементах виникають різні напруги.

Згідно до закону Гука, який пов'язує механічну напругу та деформацію пружного тіла, напругу в арамідних нитках тільки за рахунок механічних навантажень (видовження кабелю) при нормальних умовах (20 °С) можна визначити за формулою

$$\sigma_{ан} = E_{ан} \varepsilon_{к}, \quad (1)$$

де  $\sigma_{ан}$  – механічна напруга арамідних ниток при нормальних умовах, кг/мм<sup>2</sup>;  $E_{ан}$  – модуль Юнга арамідних ниток, кг/мм<sup>2</sup>;  $\varepsilon_{к}$  – відносне видовження кабелю.

Додаткова механічна напруга  $\sigma'_{ан}$  в арамідних нитках, що виникає тільки за рахунок зміни температури визначається за формулою

$$\sigma'_{ан} = (\alpha_{ан} - \alpha_0)(t - 20)E_{ан}, \quad (2)$$

де  $\alpha_{ан}$  – ТКЛР арамідних ниток, 1°С<sup>-1</sup>;  $\alpha_0$  – ТКЛР ДСВОК, 1°С<sup>-1</sup>;  $t$  – температура кабелю, °С.

Температурний коефіцієнт лінійного розширення кабелю  $\alpha_0$  розраховується за

формулою

$$\alpha_0 = \frac{\alpha_{\text{ан}} E_{\text{ан}} S_{\text{ан}} + \sum_{i=1}^{n-1} \alpha_i E_i S_i}{E_{\text{ан}} S_{\text{ан}} + \sum_{i=1}^{n-1} E_i S_i} \quad (3)$$

де  $S_{\text{ан}}$ ,  $S_i$  – площа поперечного перетину відповідно арамідних ниток ПСЕ та усіх інших елементів кабелю,  $\text{мм}^2$ ;  $\alpha_i$  – ТКЛР  $i$ -го елемента кабелю,  $1^\circ \text{C}^{-1}$ ;  $E_i$  – модуль Юнга  $i$ -го елемента кабелю,  $\text{кг/мм}^2$ ;  $n$  – число елементів кабелю, які приймають механічне навантаження.

Дійсна напруга арамідних ниток ПСЕ ДСВОК дорівнює алгебраїчній сумі механічних напруг при заданій величині видовження кабелю та температурних напруг:

$$\sigma_{\text{ан.д}} = \sigma_{\text{ан}} + \sigma'_{\text{ан}} = E_{\text{ан}} \varepsilon_{\text{к}} + (\alpha_{\text{ан}} - \alpha_0)(t - 20)E_{\text{ан}} \quad (4)$$

Згідно [2] механічні напруги в кожному елементі ДСВОК різні і розподіляються пропорційно модулям пружності відповідних матеріалів, тому при конструюванні ДСВОК необхідно вибирати елементи та їх матеріали так, щоб розтягувальне зусилля у всіх арамідних нитках було зкомпенсоване розтягувальним зусиллям в усіх інших елементах. Для спрощення розрахунків параметрів кабелю користуються умовною фіктивною механічною напругою, віднесеною до всього кабелю. Для визначення фіктивної механічної напруги кабелю  $\sigma_{\text{фДСВОК}}$  потрібно виходити з припущення 2, що  $\varepsilon_{\text{к}} = \varepsilon_{\text{ан}}$ .

Враховуючи наведену рівність можна записати, що

$$\frac{\sigma_{\text{фДСВОК}}}{E_{\text{фДСВОК}}} = \frac{\sigma_{\text{ан.д}}}{E_{\text{ан}}} \quad (5)$$

де  $E_{\text{фДСВОК}}$  – фіктивний модуль Юнга ДСВОК,  $\text{кг/мм}^2$ .

Згідно до [1]  $E_{\text{фДСВОК}}$  виражається у вигляді

$$E_{\text{фДСВОК}} = \frac{\sum_{i=1}^n E_i S_i}{\sum_{i=1}^n S_i} = \frac{E_{\text{ан}} S_{\text{ан}} + \sum_{i=1}^{n-1} E_i S_i}{S_{\text{ан}} + \sum_{i=1}^n S_i} \quad (6)$$

Фіктивну механічну напругу конструкції ДСВОК  $\sigma_{\text{фДСВОК}}$  можна визначити за значенням допустимої механічної напруги в арамідних нитках

$$\sigma_{\text{фДСВОК}} = \left\{ \sigma_{\text{ан}} + (\alpha_{\text{ан}} - \alpha_0)(t - 20)E_{\text{ан}} \right\} \frac{E_{\text{фДСВОК}}}{E_{\text{ан}}}, \quad (7)$$

або  $\sigma_{\text{фДСВОК}} = \left\{ \varepsilon_{\text{к}} + (\alpha_{\text{ан}} - \alpha_0)(t - 20) \right\} E_{\text{фДСВОК}}$ .

Використовуючи формули (1) і (2) в роботі проведені розрахунки значення механічних напруг в арамідних нитках «Тварон» типів D2200 та D1052, що використовуються у конструкції ДСВОК,  $\sigma_{\text{ан}}$  при  $t = 20^\circ \text{C}$  за рахунок механічного видовження ДСВОК від 0 % до 1 % та  $\sigma'_{\text{ан}}$  при змінах температури від  $-40^\circ \text{C}$  до  $+70^\circ \text{C}$ . Розрахунки проведені для ДСВОК типу ОКЛ-3-Д2А-3×4Е, в якому було прийнято, що: діаметр оптичного модуля (ОМ)  $d_{\text{ОМ}} = 2,5$  мм, товщина трубки ОМ  $t_{\text{ОМ}} = 0,35$  мм, товщина оболонки кабелю  $\Delta_{\text{об}} = 0,8$  мм, діаметр кабелю  $D_{\text{к}} = 14,3$  мм, ЦСЕ – склопластиковий стержень з ТКЛР  $\alpha_{\text{с}} = 6,6 \cdot 10^{-6} 1^\circ \text{C}^{-1}$ , ПСЕ – повив з 18 арамідних ниток типу «Тварон D1052 8050» з  $\alpha_{\text{ан}} = -3 \cdot 10^{-6} 1^\circ \text{C}^{-1}$ . Результати розрахунків напруг в арамідних нитках ПСЕ наведені в табл. 1 і табл. 2 відповідно.

Таблиця 1 – Розрахункові значення механічної напруги в арамідних нитках  $\sigma_{ан}$ , кг/мм<sup>2</sup>, при  $t = 20$  °С за рахунок механічного видовження ДСВОК

Тип ниток «Тварон»		Модуль пружності, $E \cdot 10^3$ , Н/мм <sup>2</sup>	Механічна напруга в арамідних нитках $\sigma_{ан}$ , кг/мм <sup>2</sup>					
			Видовження кабелю $\varepsilon_k$ , %					
			0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
D2200	1210	115	0	23,45	46,89	70,34	93,78	117,23
	1610	110	0	22,43	44,85	67,28	89,70	112,13
	2420	108	0	22,02	44,04	66,06	88,07	110,09
	3220	108	0	22,02	44,04	66,06	88,07	110,09
	8050	104	0	21,20	42,41	63,61	84,81	106,01
D1052	1610	112	0	22,83	45,67	68,50	91,34	114,17
	2420	107	0	21,81	43,63	65,44	87,27	109,07
	3220	107	0	21,81	43,63	65,44	87,27	109,07
	8050	104	0	21,20	42,41	63,61	84,81	106,01

Таблиця 2 – Розрахункові значення величини зміни напруги в арамідних нитках  $\sigma'_{ан}$ , кг/мм<sup>2</sup>, при різних температурах

Тип ниток «Тварон»		Модуль пружності, $E \cdot 10^3$ , Н/мм <sup>2</sup>	Зміни напруги в арамідних нитках $\sigma'_{ан}$ , кг/мм <sup>2</sup>						
			Температура $t$ , °С						
			-40	-20	0	+20	+40	+60	+70
D2200	1210	115	7,02	4,67	2,34	0	-2,34	-4,67	-5,85
	1610	110	6,71	4,47	2,24	0	-2,24	-4,47	-5,59
	2420	108	6,58	4,39	2,20	0	-2,20	-4,39	-5,49
	3220	108	6,58	4,39	2,20	0	-2,20	-4,39	-5,49
	8050	104	6,34	4,23	2,12	0	-2,12	-4,23	-5,29
D1052	1610	112	6,83	4,55	2,27	0	-2,28	-4,55	-5,69
	2420	107	6,53	4,35	2,18	0	-2,18	-4,35	-5,44
	3220	107	6,53	4,35	2,18	0	-2,18	-4,35	-5,44
	8050	104	6,34	4,23	2,12	0	-2,12	-4,23	-5,29

В якості прикладу по формулам (3), (6), (7) були розраховані значення фіктивних ТКЛР, модуля Юнга та механічної напруга  $\sigma_{фДСВОК}$  ДСВОК при видовженні кабелю 0; 0,4; 1 % та різному числу ниток типу «Тварон D1052 8050» в ПСЕ. Результати розрахунків наведені на рис. 2. та табл. 3.

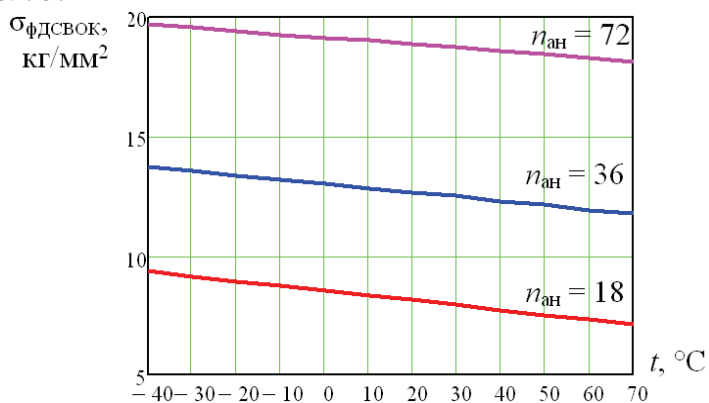


Рисунок 2 – Графік залежності фіктивної механічної напруги ДСВОК  $\sigma_{фДСВОК}$  від зміни температури  $t$ , числа арамідних ниток типу «Тварон D1052 8050» в ПСЕ та видовженні кабелю на 0,4 %

Таблиця 3 – Розрахункові значення фіктивної механічної напруги ДСВОК  $\sigma_{\text{фДСВОК}}$ , кг/мм<sup>2</sup>, в залежності від механічного видовження ДСВОК, температури кабелю та кількості арамідних ниток типу «Тварон D1052 8050» в повиві

Видовження ДСВОК $\varepsilon_k$ , %	Кількість арамідних ниток $n_{\text{ан}}$ в ПСЕ	Фіктивна механічна напруга ДСВОК $\sigma_{\text{фДСВОК}}$ , кг/мм <sup>2</sup>						
		Температура $t$ , °C						
		-40	-20	0	+20	+40	+60	+70
0	18	1,21	0,81	0,41	0	-0,41	-0,81	-1,01
	36	1,05	0,70	0,35	0	-0,35	-0,70	-0,88
	72	0,83	0,56	0,28	0	-0,28	-0,56	-0,69
0,4	18	9,33	8,93	8,52	8,12	7,71	7,31	7,11
	36	13,69	13,34	13,00	12,64	12,29	11,94	11,76
	72	19,67	19,41	19,13	18,85	18,57	18,30	18,15
1,0	18	21,51	51,1	20,70	20,29	19,89	19,49	19,28
	36	32,65	32,30	31,95	31,60	31,30	30,90	30,72
	72	47,96	47,68	47,40	47,12	46,85	46,57	46,43

Як видно з результатів проведених розрахунків, дійсно, за законом Гука механічна напруга в ДСВОК буде збільшуватися пропорційно величині видовження кабелю. При підвищенні температури навантаження в арамідних нитках зменшується, а при зниженні – збільшується, тобто буде порушуватися умова рівноваги навантажень між конструктивними елементами ДСВОК, що приведе до появи надлишкових напруг (розтягу або стискання) кабелю. Розрахунок фіктивної напруги ДСВОК показує, що зміна кількості арамідних ниток у ПСЕ призводить до зміни ТКЛР кабелю, що змінює допустиму механічну напругу ДСВОК.

#### Висновки.

1. В даній роботі проведений аналіз напруги в арамідних нитках «Тварон» типів D2200 та D1052 периферійного силового елемента ДСВОК в залежності від механічного видовження запропонованої конструкції, температури кабелю та кількості ниток в ПСЕ.

2. В результаті аналізу досліджень встановлено, що при видовженні кабелю до 1 % та дії температури від -40 °C до +70 °C порушується умова рівноваги між елементами кабелю, що викликає розтягування ДСВОК при від'ємних температурах та стискання при додатних температурах.

3. Збільшенні кількості арамідних ниток в повиві ПСЕ призводить до більшої допустимої напруги в ДСВОК у всьому діапазоні температур при видовженні. Зміна величини напруги в ДСВОК в діапазоні температур (-40...+70) °C від кількості арамідних ниток кабелю при нормальних умовах коливається в межах: для 18 арамідних ниток – (+15...-10) %, для 36 – (+8,7...-5) %, для 72 – (+4...-3) %.

4. Проведений аналіз фіктивної механічної напруги в арамідних нитках та ДСВОК для різних видовжень кабелю та температур експлуатації дозволить оптимізувати вибір ПСЕ при конструюванні ДСВОК, розв'язувати рівняння ланцюгової лінії та розраховувати стрілу провисання при підвішуванні ДСВОК.

#### Література

1. Бондаренко О.В. Метод определения температурного коэффициента линейного расширения и модуля Юнга диэлектрического оптического кабеля / О.В. Бондаренко // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Електротехніка і енергетика. – 2009. – Вип. № 9 (158). – С. 25 – 29.

2. Бондаренко О.В. Розробка методу розрахунку стійкості діелектричних оптичних кабелів до розтягуючих навантажень / О.В. Бондаренко // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація. – 2009. – Вип. 17 (148). – С. 64 – 68.

Надійшла до редакції:  
01.02.2011

Рекомендовано до друку:  
д-р техн.наук, проф. Скобцов Ю.О.

#### **Abstract**

**Bondarenko O.V., Stepanov D.M., Vlasov O.M., Nazarenko A.F. Research of mechanical tension in dielectric self-supporting fiber optic cable under the influence of stretching efforts and temperature.** Research of mechanical tension in dielectric self-supporting fiber optic cable with peripheral power element in the type of aramid filaments of «Twaron» under the action of stretching efforts and temperature.

**Keywords:** dielectric self-supporting fiber optic cable, aramid filaments, stretching efforts of cable, temperature coefficient of linear expansion, fictitious Yung module, fictitious tension of cable.

#### **Аннотация**

**Бондаренко О.В., Степанов Д.М., Власов О.М., Назаренко А.Ф. Исследование механического напряжения в диэлектрическом самонесущем волоконно-оптическом кабеле под действием растягивающих усилий и температуры.** Проведено исследование механического напряжения в диэлектрическом самонесущем волоконно-оптическом кабеле с периферийным силовым элементом в виде арамидных нитей «Тварон» под действием растягивающих усилий и температуры.

**Ключевые слова:** диэлектрический самонесущий волоконно-оптический кабель, арамидные нити, удлинение кабеля, температурный коэффициент линейного расширения, фиктивный модуль Юнга, фиктивное напряжение в кабеле.

© Бондаренко О.В., Степанов Д.М., Власов О.М., Назаренко А.Ф., 2011