

ром оптимальних режимів сканування. У будь-якому випадку зображення СЗМ містять залишкові спотворення, які важко видалити на апаратному рівні. Зокрема, оскільки рух сканера в напрямках  $X$  та  $Y$  впливає на відстань зонда - зразка (вісь  $Z$ ), а зображення СЗМ представляють суперпозицію фактичної топографії та деякої поверхні другого (а іноді і вищого) порядку.

У цьому випадку можна прийняти мінімальну відстань між точкою наконечника і відповідною точкою поверхні для даного положення наконечника відносно поверхні топографічної висоти, що значно зменшить кількість небажаних артефактів у СЗМ-зображенні та підвищить точність вимірювальної інформації.

### Список використаних джерел (References)

1. The Scanning Probe Image Processor (SPIP) [Електронний ресурс]. URL: [www.imagemet.com](http://www.imagemet.com).
2. Nanosurf. Atomic force microscopy applications. URL: [www.nanosurf.com/en/](http://www.nanosurf.com/en/).
3. Equipment for real-time industrial applications. URL: <http://www.digital-instruments.com/>.
4. Said R. A. Microfabrication by localized electrochemical deposition: experimental investigation and theoretical modeling. *Nanotechnology*. 2004. Vol. 15, No. 7. P. 867. DOI: <https://doi.org/10.1088/0957-4484/15/7/C01>.
5. Nanosurf. Atomic force microscopy applications. URL: <https://www.nanosurf.com/en/>.
6. Equipment for real-time industrial applications. URL: <http://www.digital-instruments.com/>.
7. Garnaes J., Kofod N., Kühle A., Nielsen C., Dirscherl K., and Blunt L. Calibration of step heights and roughness measurements with atomic

force microscopes. *Precision Eng.* 2003. No. 27. P. 91-98.

8. Butt H. J., Cappella B., Kappl M. Force Measurements With the Atomic Force Microscope: Technique, Interpretation and Applications. *Surface Science Reports*. 2015. No. 59. P. 1-152.

9. Johnson K. L. Contact Mechanics. Cambridge University Press, 2003.

10. Schwarz U. D. A Generalized Analytical Model for the Elastic Deformation of an Adhesive Contact Between a Sphere and a Flat Surface. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2018. No. 261. P. 99-106.

11. Bhushan B., Peng W. Contact Mechanics of Multilayered Rough Surfaces. *Applied Mechanics Reviews*. 2002. No. 55. P. 435-480.

12. Schwarz U. D., Hölscher H., Wiesendanger R.. Atomic Resolution in Scanning Force Microscopy: Concepts, Requirements, Contrast Mechanisms, and Image Interpretation. *Physical Review B*. 2020. No. 62. P. 13089-13097.

13. Chi L. Nanotechnology, volume Nanostructured surfaces. Wiley-VCH, 2010.

14. Pires D., Hedrick J. L., De Silva A., and etc. Nanoscale Three-Dimensional Patterning of Molecular Resists by Scanning Probes. *Science*. 2010. No. 328. P. 732-735.

15. Waldbaur A., Rapp H., Länge K., Rapp B. E. Let There be Chip – Towards Rapid Prototyping of Microfluidic Devices One-Step Manufacturing Processes. *Analytical Methods*. 2011. No. 3. P. 2681-2716.

16. Nanosurf. Atomic force microscopy applications. URL: <https://www.nanosurf.com/en/>.

17. Equipment for real-time industrial applications. URL: <http://www.digital-instruments.com/>.

Надійшла до редакції 12.12.2022

УДК 621

С. В. Кіфорук

Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку, м. Одеса

### ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРИ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА НА МЕХАНІЧНУ НАПРУГУ ОПТИЧНОГО КАБЕЛЮ

Для забезпечення якості та надійності волоконно-оптичної лінії зв'язку на протязі запроєктованого терміну служби в умовах експлуатації необхідно проводити постійний контроль технічного стану оптичного кабелю (ОК), в першу чергу, напруги у волокні. Механічні напруги в оптичному волокні за рахунок макро- та мікровигинів призводять до зміни коефіцієнта загасання сигналу.

В роботі проведено дослідження впливу температури навколишнього середовища на механічну напругу ( $\sigma_{0x}$ ) діелектричного оптичного кабелю із силовими елементами із склопластику та арамідних ниток.

Отримана оцінка  $\sigma_{0x}$  в кабелі при значеннях температури від  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  при постійних розтягуючих навантаженнях, яким відповідають видовження кабелю від 0,2 % до 0,6 %.

Дослідження  $\sigma_{0x}$  показали, що механічні напруги ОК від збільшення температури зменшуються за рахунок від'ємного температурного коефіцієнта лінійного розширення арамідних ниток.

**Ключові слова:** оптичне волокно, кабель, температурний коефіцієнт лінійного розширення, фіктивний модуль Юнга, фіктивна напруга.

S. V. Kiforuk

## INFLUENCE OF THE AMBIENT TEMPERATURE ON THE MECHANICAL TENSION OF THE OPTICAL CABLE

To ensure the quality and reliability of the fiber-optic communication line during the exploitation, it is necessary to constantly monitor the technical condition of the optical cable (OC), first of all, the tension in the fiber. Mechanical tensions in the optical fiber due to macro- and microbends lead to a change the signal's attenuation coefficient. Therefore, the study of the effect of the temperature of the operating environment of the optical cable on its mechanical tensions is relevant.

The purpose of the work is to determine the mechanical stress of the dielectric optical cable as a function of the temperature change ( $t_x$ ) at constant values of the tension in the cable, which correspond to the corresponding elongation of the cable ( $\varepsilon_p$ ).

The article investigates the effect of ambient temperature on the mechanical tensions in the cable ( $\sigma_{0x}$ ). Conducted on the example of a cable type OKL-3-D1 of the domestic manufacturer "Odeskabel" with a dielectric central power element made of fiberglass of the "Polystal" type, and a peripheral power element – made of aramid threads "Twaron 2200-1055".

An estimate of the mechanical tension in this OC was obtained at different temperature values from  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  to  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  and at different elongations. For this purpose, the values of the temperature coefficient of linear expansion, Young's modulus of such a cable were obtained in the work. In the studies, the values of constant tensile loads of the cable, which correspond to its elongation from 0.2 % to 0.6 %, were used.

According to the results of the study, at a constant mechanical load of a given type of cable, which corresponds to its certain elongation  $\varepsilon_p = 0.6\text{ }%$ , a decrease in mechanical tensions up to 7 % was obtained.

Due to the fact that the mechanical stress in the optical cable consists of two parts, the first of which depends on the mechanical loads, and the second depends on the temperature change of the cable's operating environment. According to the work [2], the first component is much larger than the second, but it changes, established in this work, in critical situations for fiber-optic communication lines are of significant importance, which must be taken into account during the design and operation of lines. In general, the study of  $\sigma_{0x}$  made it possible to establish that the mechanical stresses of the OC decrease with temperature increase due to the negative temperature coefficient of linear expansion of the aramid threads.

**Keywords:** optical fiber, cable, temperature coefficient of linear expansion, fictitious Young's modulus, fictitious tension.

DOI 10.32684/2412-5288-2022-2-21-19-26

### Вступ

Сучасні виробники кабельної продукції здатні виготовляти оптичні кабелі (ОК) дуже широкого спектру конструкцій, які можуть використовуватися при різних умовах в залежності від середовища експлуатації (кабельна каналізація, ґрунт, опори повітряних ліній та інше). В залежності від потреб замовника розробники ОК конструюють різні варіації кабелів з різними структурою осердя кабелю, силовими елементами та захисними покриттями. При цьому силові елементи ОК застосовують із різних матеріалів, що дозволяють кабелю витримувати механічні навантаження з урахуванням кліматичних та механіч-

них впливів навколишнього середовища.

Особливості розрахунку конструкції ОК обумовлюються, у першу чергу, наявністю в кабелі елементів з різних матеріалів, що мають різні значення температурного коефіцієнта лінійного розширення (ТКЛР) та модуля Юнга.

Відомо, що тверді тіла збільшують або зменшують свої розміри при нагріванні [1]. Кількісно теплове розширення або стискування матеріалу характеризується температурним коефіцієнтом лінійного розширення, який дорівнює відносній зміні лінійних розмірів тіла при зміні температури на 1 К.

Температурний коефіцієнт лінійного розширення кожного з елементів ОК (трубок оптичного модуля чи профільованого сердечника, оптичних волокон (ОВ), оболонки, склопластикового чи сталюого центрального силового елемента (ЦСЕ)) має позитивне значення, а периферійного силового елемента (ПСЕ) із арамідних ниток – від'ємне значення. Отже, при зміні температури зміна довжини ОК не дорівнює зміні довжини окремих його елементів, і з цієї ж причини в елементах виникають різні механічні напруги.

Розрахунки конструкцій оптичних кабелів [2-4] та проектування волоконно-оптичних ліній зв'язку (ВОЛЗ) (наприклад, повітряних) на механічну міцність потребують визначення, в першу чергу, фіктивних температурного коефіцієнту лінійного розширення ( $\alpha_0$ ), модуля Юнга ( $E_0$ ) та максимальної напруги кабелю ( $\sigma_{\max}$ ) згідно до [5]. При цьому вивчення впливу механічних дій (розтягу, вигину та інше) та врахування температурних дій на механічну напругу ОК є актуальними та необхідними.

В даній роботі приводяться результати досліджень механічної напруги ОК при різних температурах навколишнього середовища експлуатації та відповідних величинах його видовження. Оцінювання величини дії температури на загальну напругу кабелю необхідна для порівняння з величинами напруг за рахунок механічних дій. Останнє дозволяє визначати, в першу чергу, механічні напруги в ОК, прокладених під землею та підвищених на опорах волоконно-оптичних ліній зв'язку, при змінах температури і навантаження.

#### Аналіз літератури

Як відомо, під час експлуатації підземних та повітряних ВОЛЗ оптичні волокна в кабелі знаходяться під певними напругами (локальними або розподіленими по їх довжині).

Причинами зміни величини напруги в ОВ кабелю можуть бути впливи температури навколишнього середовища та механічні дії, що з'являються при зменшенні радіусу вигину траси ВОЛЗ та збільшення механічних дій за рахунок його натягу або стискування.

Наприклад, до збільшення натягу ОК приводять збільшення розтягуючих навантажень у повітряних лініях зв'язку під дією власної ваги кабелю, голольоду, ожеледі та вітру.

Тому, під час експлуатації ВОЛЗ з'являється необхідність контролю технічного стану оптичного кабелю та, в першу чергу, напруг у волокну для забезпечення якості та надійності лінії на протязі заданого терміну служби в умовах її експлуатації.

Згідно [3] максимальне видовження ОК, що з'являється під дією надлишкових температур-

них і механічних напруг, призводить до видовження оптичних волокон, що перевищують прийняті при конструюванні кабелю задані значення ( $\epsilon_{\text{ов}} > (0,2-0,25) \%$ ).

Як відомо, надлишкові напруги приводять до появи багатозональних тріщин в матеріалі кварцового волокна, що, в свою чергу, приводить до його руйнування та зменшення терміну служби.

Згідно [5] максимально допустиме видовження ОК ( $\epsilon_{\max}$ ) складається із суми двох складових: першої – допустимого видовження кабелю за рахунок його конструкції до величини при якій ОВ не подовжується; другої – допустимого видовження ОВ.

Як правило, при конструюванні ОК, максимальне видовження кабелю приймається до 1 %, а видовження ОВ до 0,25 %. Але згідно до [6, 7] реальне видовження волокна може виникати при експлуатації ОК більше його розрахункового значення.

В роботах [6, 7] приділена увага контролю надійності ОК з допомогою Бріллюєнівської рефлектометрії. В цих роботах відтворена фізика впливу багатозональних тріщин в матеріалі кварцового ОВ на його надійність та розглянуто термін служби в залежності від механічної напруги в матеріалі та ділянки її розташування. Тобто, Бріллюєнівський рефлектометр (БР) встановлює характер залежності терміну служби волокна від його натягу, а саме від дії механічних напруг.

Аналіз даних, отриманих за допомогою БР, дозволяє операторам лінії з великою точністю визначати місце розташування ділянки ОК з навантаженими волокнами, оцінювати рівень їх напруг та прогнозувати надійність (термін служби кабелю). В даних роботах приведені значення діапазону напруг в ОВ, виражених у видовженні.

В роботі [6] приведено, що Бріллюєнівським рефлектометром «Можно выделить три диапазона напряжения: безопасное до 0,3 %, недопустимое более 0,6 % и промежуточное, требующее дополнительного анализа».

В роботі [8] показано, що якість та надійність експлуатації ВОЛЗ, як відмічалось раніше, залежить від великої кількості факторів. Одним із цих факторів являється якість заготовок для виготовлення ОВ, технологія витяжки ОВ та метрологічне забезпечення його показників під час експлуатації ОК. Останнє впливає на стійкість кабелю до механічних напруг під дією температури та механічних навантажень.

В роботі [9] розглянуто залежності часу життя оптичного волокна від розміру вигину. Запропоновано метод розрахунку відносного

видовження волокна в залежності від радіусу вигину. Надані рекомендації з вибору радіусу вигину волокна при проектуванні оптичних мереж з метою підвищення їх надійності. Але в роботі не вказано при яких температурних діапазонах проводяться дослідження.

В роботах [10, 11] приведені результати досліджень термомеханічної дії на геометричні розміри елементів і параметри ОК, але окремих досліджень по визначенню механічних дій на ОК не проводяться.

В роботах [4, 6, 7, 9-11] є велика бібліографія по врахуванню питань впливу умов експлуатації ОК на вибір його конструкції, але в них в цілому не розглянуто дослідження фіктивних механічних напруг ОК від зміни температури експлуатації при постійних розтягувальних навантаженнях, яким відповідають різні його видовження. Тому, в першу чергу, дослідження впливу навколишнього середовища на механічну напругу оптичного кабелю являється важливим. Останнє дасть можливість отримати оцінку впливу зміни температури середовища експлуатації ВОЛЗ на напругу в ОК заданої конструкції при постійному значенні його видовження.

В першу чергу, ці дослідження слід проводити для діелектричних самонесучих кабелів повітряних ВОЛЗ.

Тому перспективними слід ураховувати дослідження, присвячені визначенню механічної напруги в оптичних кабелях багатоволоконної конструкції з центральним та периферійним силовими елементами із склопластику і арамідних ниток відповідно.

#### Мета роботи та задачі дослідження

Метою роботи є визначення фіктивної механічної напруги діелектричного оптичного кабелю в залежності від зміни температури ( $t_x$ ) при постійних значеннях напруги в кабелі, яким відповідають відповідні видовження кабелю ( $\epsilon_p$ ).

Задачею досліджень роботи є оцінка механічної напруги, що діє в ОК при різних температурах від  $-40^\circ\text{C}$  до  $60^\circ\text{C}$  та при різних видовженнях кабелю від (0,2-0,6) %.

#### Розв'язання поставлених задач

Для розв'язання поставлених задач в даній роботі використано метод згідно до [5] наближеного визначення температурного коефіцієнта лінійного розширення та модуля Юнга оптичного кабелю. Останнє пов'язане з наявністю в його багатомодульній конструкції елементів із різних матеріалів (кварц, полібутилентерефталат, поліетилен, склопластик, арамідні нитки та інше), що мають різні значення температурного коефіцієнта лінійного розширення та модуля Юнга. Тому температурний коефіцієнт лінійного розширення

та модуль Юнга кабелю згідно цієї роботи називаються фіктивними, які дозволяють розраховувати конструкцію оптичного кабелю та проектувати ВОЛЗ на механічну міцність.

Фіктивний температурний коефіцієнт лінійного розширення кабелю згідно до [5] буде визначатися з умови рівноваги, за якої розтягуючі зусилля в усіх арамідних нитках будуть компенсуватися зусиллями в інших елементах ОК, за виразом

$$\alpha_0 = \frac{\alpha_a \cdot E_a \cdot S_a + \sum_{i=1}^m \alpha_i \cdot E_i \cdot S_i}{E_a \cdot S_a + \sum_{i=1}^m E_i \cdot S_i}, \quad (1)$$

де  $\alpha_0$  – фіктивний ТКЛР оптичного кабелю,  $\text{K}^{-1}$ ;

$\alpha_a, \alpha_i$  – ТКЛР арамідних ниток та інших  $i$ -тих елементів ОК відповідно,  $\text{K}^{-1}$ ;

$E_a, S_a, E_i, S_i$  – модуль Юнга,  $\text{H}/\text{мм}^2$ , і площа поперечного перетину,  $\text{мм}^2$ , арамідних ниток та інших  $i$ -тих елементів ОК відповідно;

$m$  – кількість  $i$ -тих елементів ОК ( $m = n - 1$ , де  $n$  – загальна кількість елементів кабелю).

Виходячи з виразу (1), згідно до [5] показано, що умовно конструкція ОК складається з двох частин.

Температурний коефіцієнт лінійного розширення першої частини має від'ємне значення, а другої – додатне. Тоді згідно до [5] механічна напруга у двох частинах ОК різна і розподіляється пропорційно модулям Юнга (модулям пружності) відповідних матеріалів та їх площам поперечного перетину. Тоді, для спрощення розрахунку механічних напруг в ОК будемо користуватися поняттям фіктивної напруги ( $\sigma_0$ ), віднесеною до усього кабелю.

Для такої конструкції оптичного кабелю значення фіктивної напруги при заданій температурі ( $\sigma_{0x}$ ), у відповідності до [5] визначається по значенню допустимої напруги арамідних ниток при температурі  $20^\circ\text{C}$ :

$$\sigma_{0x} = \left\{ \sigma_a - (\alpha_a - \alpha_0) \cdot \Delta t \cdot E_a \right\} \cdot \frac{E_0}{E_a}, \quad (2)$$

де  $\sigma_{0x}, \sigma_a$  – фіктивна напруга ОК, при заданій температурі ( $t_x$ ), напруга арамідних ниток при  $t = 20^\circ\text{C}$ ,  $\text{H}/\text{мм}^2$ ;

$\alpha_0, \alpha_a$  – фіктивний температурний коефіцієнт лінійного розширення оптичного кабелю та температурний коефіцієнт лінійного розширення арамідних ниток відповідно,  $\text{K}^{-1}$ ;

$E_0, E_a$  – фіктивний модуль Юнга ОК та модуль Юнга арамідних ниток відповідно,  $\text{H}/\text{мм}^2$ ;

$\Delta t$  – перепад температур від вихідної ( $t = 20^\circ\text{C}$ ) до розрахункової ( $t_x$ ) при визначенні напруженості в ОК ( $\Delta t = t_x - t$ ).

В свою чергу  $E_0$  у відповідності до [5] визначається за виразом

$$E_0 = \frac{E_a \cdot S_a + \sum_{i=1}^m (E_i \cdot S_i)}{S_a + \sum_{i=1}^m (S_i)}, \quad (3)$$

де  $E_0$ ,  $E_a$  – фіктивний модуль Юнга ОК та модуль Юнга арамідних ниток відповідно, Н/мм<sup>2</sup>;

$S_a$ ,  $S_i$  – площа поперечного розтину шару арамідних ниток та інших  $i$ -тих елементів ОК відповідно, мм<sup>2</sup>.

Згідно до [5] напруга шару арамідних ниток при температурі  $20^\circ\text{C}$  визначається за виразом:

$$\sigma_a = E_a \cdot \varepsilon_p, \quad (4)$$

де  $\sigma_a$  – напруга шару арамідних ниток, Н/мм<sup>2</sup>;

$E_a$  – модуль Юнга арамідних ниток, Н/мм<sup>2</sup>;

$\varepsilon_p$  – видовження ОК.

Відповідно до [2, 5] площа склопластикового стержня і площа шару арамідних ниток визначаються за виразами:

$$S_{cc} = \frac{\pi \cdot d_{cc}^2}{4}; \quad (5)$$

$$S_a = \frac{LD}{\rho} \cdot m, \quad (6)$$

де  $S_{cc}$ ,  $S_a$  – площа поперечного перетину склопластикового стержня та шару арамідних ниток відповідно, мм<sup>2</sup>;

$d_{cc}$  – діаметр склопластикового стержню, мм;

$LD$  – лінійна щільність однієї нитки, ТЕКС;

$\rho$  – щільність арамідної нитки, г/см<sup>3</sup>;

$m$  – кількість ниток.

В якості прикладів в роботі приведені розрахунки значень:  $\alpha_0$ ,  $\sigma_{0x}$ ,  $E_0$ ,  $S_{cc}$ ,  $S_a$  за виразами (1) – (6).

З метою визначення  $\sigma_{max}$  використовуємо вираз для визначення номінального значення розтягуючого зусилля оптичного кабелю згідно до [12]. На основі перетворення цього виразу було отримано формулу для визначення  $\sigma_{max}$  у вигляді:

$$\sigma_{max} = \frac{F_n}{S_{cc} + S_a}, \quad (7)$$

де  $\sigma_{max}$  – максимально допустима напруга ОК, Н/мм<sup>2</sup>;

$F_n$  – номінальне допустиме розтягуюче зусилля ОК, Н;

$S_{cc}$ ,  $S_a$  – площа поперечного перетину склопластикового стержня та шару арамідних ниток відповідно, мм<sup>2</sup>.

Розрахунки значень  $\alpha_0$ ,  $\sigma_{0x}$ ,  $E_0$ , та  $\sigma_{max}$  за вище приведеними формулами проводились на базі оптичного кабелю марки ОКЛ-3-Д1.

Дослідження напруг в оптичному кабелі марки ОКЛ-3-Д1, виробництва ПАТ «Одескабель», виконувалось за виразом (2) при наступних вихідних даних: діаметр оптичного модуля  $d_{om} = 2,5$  мм; товщина трубки ОМ  $t_{om} = 0,2$  мм; товщина захисної оболонки кабелю  $\Delta_{ob} = 2$  мм; діаметр кабелю  $D_k = 16,9$  мм; арамідних нитках типу «Twaron 2200-1055» із щільністю ниток  $1,45$  г/мм<sup>3</sup> і кількістю ниток  $m = 12$ , площі поперечного перетину шару арамідних ниток  $S_a = 7,29$  мм<sup>2</sup>; склопластикового стержня типу «Polystal»  $d_{cc} = 7,2$  мм з площею поперечного перетину  $S_{cc} = 5,72$  мм<sup>2</sup>. Згідно до [3] в табл. 1 наведені довідникові значення температурного коефіцієнта лінійного розширення та модулю Юнга матеріалів основних елементів ОК, які визначають його механічну міцність.

Таблиця 1 – Довідкові значення ТКЛР та модуля Юнга матеріалів основних елементів ОК

| № | Назва елемента   | Матеріал елемента                                     | ТКЛР, 1/К           | Модуль Юнга, ГПа |
|---|------------------|-------------------------------------------------------|---------------------|------------------|
| 1 | Трубка ОМ        | Полібутілен-терефталат «Целанекс 2001»                | $1,1 \cdot 10^{-6}$ | 2,6              |
| 2 | ПСЕ              | Арамідні нитки «Twaron 2200-1055» «з LD = 8050 дтекс» | $-3 \cdot 10^{-6}$  | 104              |
| 3 | ЦСЕ              | Склопластик «Polystal»                                | $6,6 \cdot 10^{-6}$ | 55               |
| 4 | Захисна оболонка | Поліетилен                                            | $3,2 \cdot 10^{-4}$ | 0,621            |

Дослідження значень фіктивних температурного коефіцієнта лінійного розширення, модуля Юнга та фіктивних напруг кабелю були виконані за допомогою програмної реалізації в середовищі Python у відповідності до графічної моделі, представленої на рис. 1.

Дослідження  $\sigma_{0x}$  були виконані в залежності від зміни температур  $t_x$  від мінус  $40^\circ\text{C}$  до  $60^\circ\text{C}$  та видовження ОК від  $0,2\%$  до  $0,6\%$ .

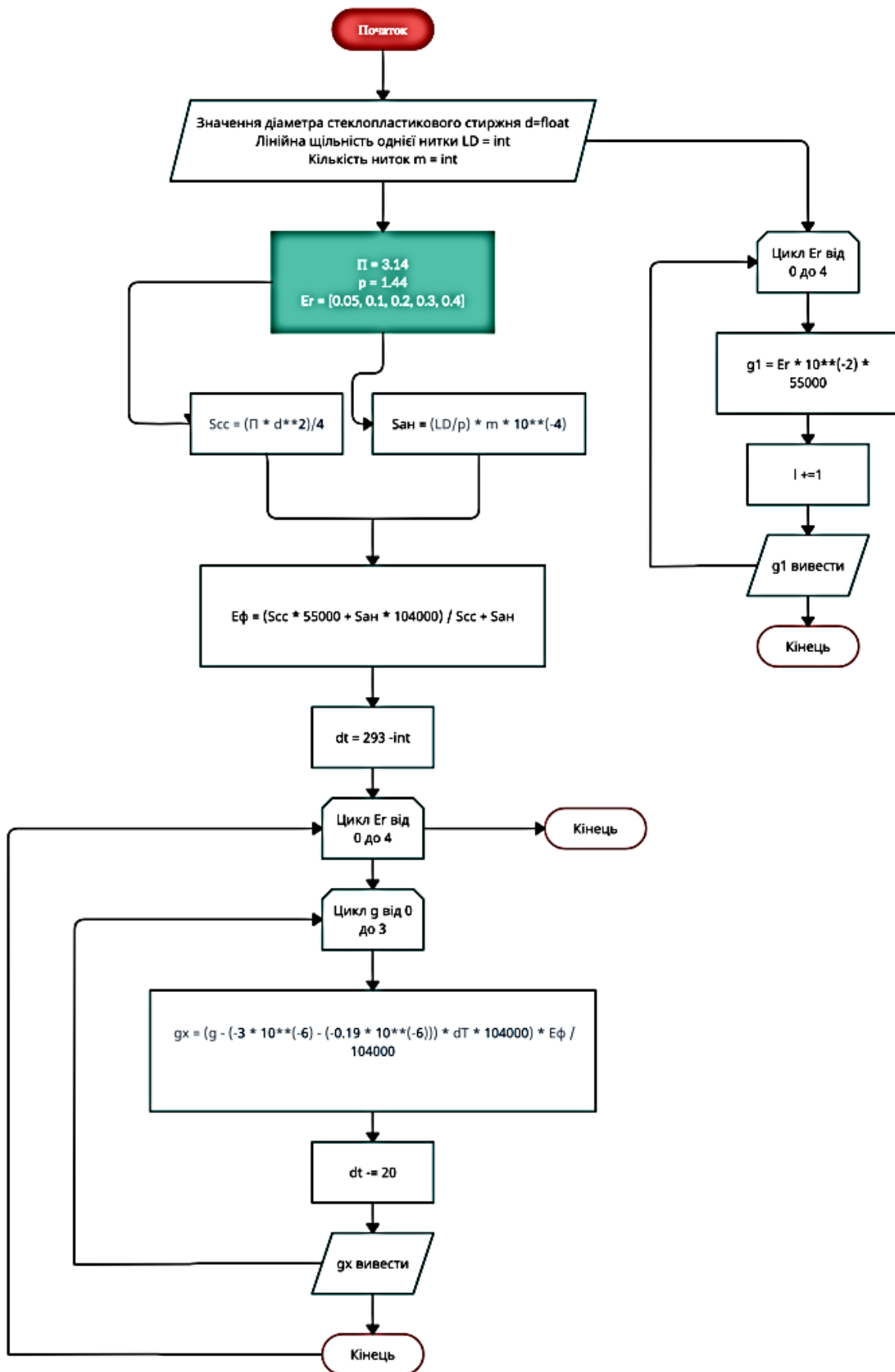


Рисунок 1 – Графічна модель досліджених  $\sigma_{ox}$  оптичного кабелю з діелектричними силовими елементами

Залежності  $\sigma_{0x}$  від температури в указаному діапазоні температур та різних видовженнях кабелю приведені на рис. 2.

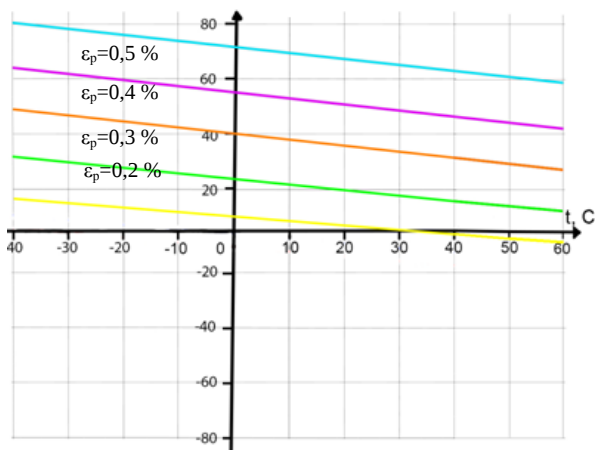


Рисунок 2 – Графіки залежностей  $\sigma_{0x}$  від температури експлуатації та видовження оптичного кабелю

Аналіз результатів досліджень  $\sigma_{0x}$  показав, що зі збільшенням температури навколишнього середовища його значення зменшуються, тобто зменшується його розтяг та розтяг оптичного волокна при одному і тому ж механічному навантаженні.

Останнє пояснюється впливом від'ємного значення температурного коефіцієнта лінійного розширення арамідних ниток на значення фіктивного температурного коефіцієнта лінійного розширення кабелю.

Порівняємо максимально допустиму напругу в оптичному кабелі марки ОКЛ-3-Д1, яка з'явиться в ньому при номінально допустимому розтягуючому зусиллі ( $F_n = 3500$  Н), згідно до норми зазначеної з технічних умов на кабель [12].

Розрахунки  $\sigma_{\max}$  проводились при  $F_n = 3500$  Н згідно до [12] та  $S_{cc} = 5,72$  мм<sup>2</sup> і  $S_a = 7,29$  мм<sup>2</sup> і при  $\epsilon_p = 0,6\%$ .

Таким чином, результати розрахунку  $\sigma_{\max}$  при заданому значенні  $F_n$  буде складати 269 Н/мм<sup>2</sup> при температурі 20 °С, а визначене значення  $\sigma_{0x}$  при цій же температурі та  $\epsilon_p = 0,6\%$  згідно до рис. 2 – 69 Н/мм<sup>2</sup>.

Отже, ці порівняння вказаних напруг кабелю показують, що значення напруги ОК, яке з'являється під дією температури при  $\epsilon_p = 0,6\%$  складає 25,65 % від величини  $\sigma_{\max}$  в найнесприятливіших умовах механічних навантажень, отриманої при номінальному значенні розтягуючого зусилля на оптичний кабель марки ОКЛ-3-Д1 величиною в  $F_n = 3500$  Н.

## Висновки

У даній роботі проведені дослідження напруг в оптичному кабелі багатомодульної конструкції з центральним силовим елементом із склопластикового стержня та периферійним силовим елементом із арамідних ниток, що знаходиться під дією температурних впливів навколишнього середовища та постійним розтягуючим навантаженням.

Результати досліджень  $\sigma_{0x}$  дозволили установити, що:

- з ростом температури напруга в кабелі зменшується, що пояснюється впливом модуля Юнга та температурного коефіцієнта лінійного розширення арамідних ниток на фіктивні значення температурного коефіцієнта лінійного розширення та модуля Юнга оптичного кабелю;

- напруга оптичного кабелю в температурному діапазоні від  $-40$  °С до  $60$  °С зменшується до 7 % при максимальному видовженні ОК 0,6 %.

Таким чином, при експлуатації ОК вплив температури навколишнього середовища на механічну напругу кабелю потрібно враховувати обов'язково, особливо при умовах експлуатації кабелю близьких до екстремальних. В першу чергу, зміни  $\sigma_{0x}$  необхідно враховувати при розрахунках механічної міцності повітряних волоконно-оптичних ліній зв'язку.

## Список використаних джерел

1. Янг Г., Фрідман Р. Фізика для університетів. Френсіс Сірс і Марк Земанські: Пер. з англ. Львів, Наутітус, 2018. 1536 с., іл.
2. Бондаренко О. В. Розробка методу розрахунку стійкості діелектричних оптичних кабелів до розтягуючих навантажень. *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Обчислювальна техніка та автоматизація»*. Донецьк, 2009. Вип. 17 (148). С. 64-68.
3. Иоргачев Д. В., Бондаренко О.В., Дашенко А. Ф., Усов А. В. Волоконно-оптические кабели. Теоретические основы, конструирование и расчет, технология производства и эксплуатация. Монография. Одесса: «Астропринт», 2000. 536 с.
4. Бондаренко О. В., Степанов Д. М., Багачук Д. Г., Тіхонов В. І., Вербицький О. О. Методика забезпечення конструктивної стійкості підземних оптичних кабелів до розтягуювальних навантажень. *Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: технічні науки*. 2016. Вип. 4. С. 5-11.

5. Бондаренко О. В. Метод определения температурного коэффициента линейного расширения и модуля Юнга диэлектрического оптического кабеля. *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Електротехніка і енергетика»*. Донецьк, 2009. Вип. 9 (158). С. 25-29.

6. Акопов С. Г., Васильев Н. А., Поляков М. И. Использование бриллиантового рефлектометра при испытаниях оптического кабеля на растяжение. *Lighthwave Russian Edition*. 2006. № 1. С. 23-25.

7. Ніколов К. О. Рефлектометричні методи оцінки стану оптичних волокон на мережах зв'язку. *Телекомунікаційні та інформаційні технології*. 2015. № 1. С. 83-88. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/vduikt\\_2015\\_1\\_16](http://nbuv.gov.ua/UJRN/vduikt_2015_1_16).

8. Корчевський О. С., Коломієць Л. В., Ваганов О. І. Визначення метрологічних показників оптичного волокна. *Збірник наукових праць Одеської державної академії технічного регулювання та якості*. 2005. Вип. 1 (6). С. 58-63. DOI: 10.32684/2412-5288-2015-1-6-58-63.

9. Манько О. О., Ніколов К. О. Особенности прокладки и надежность новых типов оптических волокон. *Научные труды ОНАС им. А. С. Попова*. Одесса, 2015. Вип. 1. С. 112-117.

10. Бондаренко О. В., Степанов Д. М. Влияние термомеханического воздействия на длину оптического волокна в трубке оптического модуля. *Научный журнал «Труды БГТУ»*. Минск, 2018. № 2, серия 3. С. 43-46.

11. Бондаренко О. В., Степанов Д. М. Температурний вплив на геометричні розміри елементів та параметри конструкції оптичного кабелю. *Наукові праці ОНАЗ ім. О. С. Попова*. Одеса, 2017. Вип. 2. С. 20-27.

12. ТУ У 05758730.007-97 («Кабелі зв'язку оптичні для магістральних, зонових та міських мереж зв'язку»): 1997. [Чинні від 10.12.1997]. Одеса: ОЦМС, 1997. 65 с.: табл. 23. (Технічні умови ВАТ «Одескабель»).

## References

1. H. Yanh, R. Fridman Fizyka dla universytetiv. Frensis Sirs i Mark Zemanski: Per. z anhl. Lviv, Nautilus, 2018. 1536 s., il.

2. Bondarenko O. V. Rozrobka metodu rozrakhunku stikosti dielektrychnykh optychnykh kabeliv do roztrahuiuchykh navantazhen. *Naukovi pratsi Donetskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. Serii: «Obchysliuvalna tekhnika ta avtomatyzatsiia»*. Donetsk, 2009. Vyp. 17 (148). S. 64-68.

3. Iorgachev D. V., Bondarenko O. V.,

Dashhenko A. F., Usov A. V. Volokonno-opticheskie kabeli. Teoreticheskie osnovy, konstruirovaniye i raschet, tekhnologiya proizvodstva i e'kspluatatsiya. Monografiya. Odessa: «Astroprint», 2000. 536 s.

4. Bondarenko O. V., Stepanov D. M., Bahachuk D. H., Tikhonov V. I., Verbytskyi O. O. Metodyka zabezpechennia konstruktyvnoi stiiikosti pidzemnykh optychnykh kabeliv do roztrahuiuchykh navantazhen. *Visnyk Cherkaskoho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu. Serii: tekhnichni nauky*. 2016. Vyp. 4. S. 5-11.

5. Bondarenko O. V. Metod opredeleniya temperaturного koefficienta lineynogo rasshireniya i modulya Yunga dielektricheskogo opticheskogo kabelya. *Naukovi pratsi Donetskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. Serii: «Elektrotekhnika i enerhetyka»*. Donetsk, 2009. Vyp. 9 (158). S. 25-29.

6. Akopov S. G., Vasil'ev N. A., Polyakov M. I. Ispol'zovanie brill'yue'novskogo reflektometra pri ispytaniyakh opticheskogo kabelya na rastyazhenie. *Lighthwave Russian Edition*. 2006. № 1. S. 23-25.

7. Nikolov K. O. Reflektometrychni metody otsinky stanu optychnykh volokon na mrezhakh zviazku. *Telekomunikatsiini ta informatsiini tekhnolohii*. 2015. # 1. S. 83-88. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/vduikt\\_2015\\_1\\_16](http://nbuv.gov.ua/UJRN/vduikt_2015_1_16).

8. Korchevskiy O. S., Kolomiets L. V., Vahanov O. I. Vyznachennia metrolohichnykh pokaznykiv optychnoho volokna. *Zbirnik naukovih prac' Odes'koi derzhavnoi akademii tehničnogo reguluvannâ ta âkosti*. 2015. Vyp. 1 (6). S. 58-63. DOI: 10.32684/2412-5288-2015-1-6-58-63.

9. Man'ko O. O., Nikolov K. O. Osobennosti prokladki i nadezhnost' novyx tipov opticheskikh volokon. *Nauchnye trudy ONAS im. A. S. Popova*. Odessa, 2015. Vyp. 1. S. 112-117.

10. Bondarenko O. V., Stepanov D. M. Vliyanie termomexanicheskogo vozdejstviya na dlinu opticheskogo volokna v trubke opticheskogo modulya. *Nauchnyj zhurnal "Trudy BGTU"*. Minsk, 2018. № 2, seriya 3. S. 43-46.

11. Bondarenko O. V., Stepanov D. M. Temperaturnyi vplyv na heometrychni rozmiry elementiv ta parametry konstruksii optychnoho kabeliu. *Naukovi pratsi ONAZ im. O. S. Popova*. Odessa, 2017. Vyp. 2. S. 20-27.

12. ТУ У 05758730.007-97 («Кабелі зв'язку оптичні для магістральних, зонових та міських мереж зв'язку»): 1997. [Чинні від 10.12.1997]. Одеса: ОТСіМ, 1997. 65 с.: табл. 23. (Технічні умови ВАТ «Одескабель»).

Надійшла до редакції 10.07.2022