

УДК 535.317.2

Скубак О. М., канд. техн. наук, доц. (Тел.: +380 67 403 99 90. E-mail: skubaksp@rambler.ru)

Онищенко В. В., канд. фіз.-мат. наук, доц. (Тел. +380 (44) 249 25 96. Email: oviva@ukr.net)

Манько О. О., доктор техн. наук, доц. (Тел.: +380 (67) 408 67 80. E-mail: manko_kiev@mail.ru)

Ніколов К. О., аспірант (Тел.: +380 (44) 249 25 21. E-mail: nikolka_@ukr.net)

(Державний університет телекомунікацій, м. Київ)

НАДІЙНІСТЬ ОПТИЧНИХ КАБЕЛІВ З ОПТИЧНИМИ ВОЛОКНАМИ НОВИХ ТИПІВ

Скубак О. М., Онищенко В. В., Манько О. О., Ніколов К. О. Надійність оптичних кабелів з оптичними волокнами нових типів. В роботі розглянуто вимоги до надійності волоконно-оптичних ліній зв'язку при застосуванні на них технологій передавання, що використовують спектральне розділення каналів. Пропонується для прокладання оптичного кабелю переважно застосовувати метод задування кабелю в поліетиленову трубу. Запропонований метод розрахунку відносного видовження оптичного волокна в залежності від радіусу вигину. Надані рекомендації з вибору радіусу вигину волокна при проектуванні оптичних мереж з метою підвищення їх надійності і збільшення часу життя оптичного волокна.

Ключові слова: оптичне волокно, натяг, радіус вигину, надійність, час життя

Скубак А. Н., Онищенко В. В., Манько А. А., Ніколов К. А. Надежность оптических кабелей с оптическими волокнами новых типов. В работе рассмотрены требования к надежности волоконно-оптических линий связи при использовании на них технологий передачи со спектральным разделением каналов. Предлагается для прокладки оптического кабеля преимущественно применять метод задувания кабеля в полиэтиленовую трубу. Предложен метод расчета относительного удлинения оптического волокна в зависимости от радиуса изгиба. Даны рекомендации по выбору радиуса изгиба волокна при проектировании оптических сетей для повышения их надежности и увеличения времени жизни оптического волокна.

Ключевые слова: оптическое волокно, натяжение, радиус изгиба, надежность, время жизни

На цей час мають місце розробки типів оптичних волокон (ОВ), які призначені підтримувати нові технології волоконно-оптичного зв'язку. Зокрема до цих типів належать оптичні волокна, що відповідають Рекомендації ІТУ-Т (МСЭ-Т) G.657 [1]. Вони являють собою оптичні волокна зі зменшеними втратами на малих радіусах вигину, та призначені для монтажу оптичного обладнання в обмеженому просторі – в будівлях та розподільчих шафах, а також при малому розмірі муфт та оптичних розподільчих боксів. Волокна розподілені на категорії А1, А2, В2, В3. При цьому ОВ типу G.657 А1,А2 застосовують в різних аспектах мереж доступу, як такі, що забезпечують вигин з радіусом не нижче 10 мм. В той же час ОВ типу G.657 В2,В3 призначені для мереж доступу як такі, що забезпечують вигин з радіусом не нижче 7,5 мм. Такий невеликий допустимий радіус вигину призводить до порівняно значних деформацій оптичного волокна та до виникнення механічних напруг в ньому. При цьому деформації оптичного волокна та механічні напруги є причиною появи в ньому мікротріщин та повільному збільшенні їх розмірів, що кінець кінцем викликає повний розрив волокна [2].

Таким чином надійність та довговічність оптичного волокна залежить його деформації, яка однозначно пов'язана з механічною напругою в ньому та, відповідно, з надійністю та часом функціонування волокна. Враховуючи необхідність виконання вигинів оптичного волокна під час монтажу оптичних муфт, оптичних боксів та прокладання його всередині приміщень представляється необхідним провести оцінку його надійності в залежності від радіусу вигину та надати необхідні рекомендації щодо його обмежень.

Як показують результати досліджень, надійність оптичного волокна, що описується ймовірністю його відмови, залежить від навантаження, яке діяло на нього, а також від постійно діючого в процесі експлуатації навантаження на оптичне волокно [2]. Згідно з [2], надійність та безвідмовність оптичного волокна, що знаходиться під натягом, визначається

теорією росту мікротріщин, які мають місце у волокні. Враховуючи це, все волокно при виготовленні проходить випробування на натяг для виявлення тріщин та інших пошкоджень.

Цей тест називається Proof test (випробування на міцність), і означає що волокно підлягає певному натягу на протязі приблизно однієї секунди [3]. При цьому тріщини у волокні можуть викликати його відмову (обрив). В даній роботі було розглянуто передбачення відмов великих довжин ОВ, які базуються на результатах випробувань ОВ на міцність. ОВ, що міститься в оптичному кабелі (ОК), постійно перебуває під певним натягом, і це є однією з важливих причин, які призводять до його відмов на протязі експлуатації.

Рівень натягу визначається конструкцією ОК та розміщенням і положенням ОВ, як елемента конструкції. Властивості відмов скляного ОВ, що знаходиться під натягом, визначаються за допомогою теорії розмноження та розповсюдження тріщин. Положення цієї теорії дозволяють визначити взаємозв'язок між прикладеним навантаженням в часі та ймовірністю відмови ОВ. При цьому повинні бути враховані такі параметри, як характеристики росту тріщини n , та фактор критичного навантаження. Згідно з нею, сумарна ймовірність відмов F оптичного волокна довжиною L , що знаходиться під натягом σ надається виразом:

$$F = 1 - \exp[-LN(\sigma)],$$

де $N(\sigma)$ – сукупна кількість тріщин на одиницю довжини при міцності на розрив, що є не меншою за натяг.

Враховуючи, що початкова міцність S_i відповідає розподіленню Вейбула, має місце наступне рівняння:

$$N(S_i) = \left(\frac{S_i}{S_0} \right)^m,$$

де S_0 та m – константи, що відносяться до початкового розподілення міцності. Величина m представляє нахил щодо розподілення ймовірності Вейбула.

З урахуванням цих виразів, а також з використанням інших положень вищезазваної теорії, в роботі [2] були отримані співвідношення, які дозволяють оцінити строк функціонування оптичного волокна.

Передбачення ймовірності відмов спиралось на результати тестування на міцність оптичного волокна. Для оцінки початкового розподілення міцності в роботі було запропоновано тест щодо натягу великих довжин оптичного волокна. На додаток до цього, величину N_p – ймовірність відмови волокна під час тесту на міцність також легко оцінити підрахунком кількості розривів за час тестування.

За результатами досліджень було отримано співвідношення для розрахунку допустимих умов натягу:

$$\frac{\sigma_s}{\sigma_p} = \left[\frac{n-2}{m} \frac{F_s}{LN_p} \frac{t_p}{t_s} \right]^{\frac{1}{n}},$$

де σ_p – натяг, що прикладається до волокна під час тесту на міцність (%);
 σ_s – статично діючий на волокно натяг за межами тесту на міцність;
 t_p – тривалість тесту на міцність;
 t_s – час дії статичного натягу;
 F_s – ймовірність відмови волокна.

Величина n може бути оцінена за тестом динамічного старіння [4, 5]. А от значення m – параметру початкового розподілу міцності визначити для волокон великої довжини набагато важче. З цією метою в роботі [2] було запропоновано проведення повторного тесту на міцність для визначення величини m .

Якщо σ_{p1}, t_{p1} та σ_{p2}, t_{p2} – відповідно натяги та час при проведенні першого та другого тесту, має місце співвідношення для визначення $(n-2)/m$:

$$\frac{n-2}{m} = \frac{\lg(1 + \sigma_{p2}^n t_{p2} / \sigma_{p1}^n t_{p1})}{\lg(1 + N_{p2} / N_{p1})}$$

Таким чином, може бути розрахована надійність ОВ лише за кількістю відмов, виміряних під час тестування на міцність.

Отримане в роботі [2] співвідношення (1) дозволяє оцінити допустимий натяг ОВ у складі кабелю з точки зору його довговічності.

Згідно з [2], результати роботи добре узгоджуються з експериментальними даними.

Запропонований метод може бути використаний для передбачення відмови великих довжин оптичного волокна без необхідності вимірювань початкового розподілення міцності.

Як видно з результатів розрахунків [2], залишковий натяг грає важливу роль у надійності волоконно-оптичної лінії. І тому при виборі технології прокладання оптичного кабелю необхідно це враховувати, і використовувати переважно метод задування ОК в поліетиленову трубу.

Зокрема цей фактор необхідно враховувати при прокладанні оптичного кабелю в приміщеннях та при монтажу його в оптичних муфтах, розподільчих шафах та боксах, де ОК та разом з ним оптичне волокно підлягає вигинам. В цьому випадку оптичному волокну притаманний не тільки залишковий натяг, але й залишкова напруга, зумовлена вигинами оптичного волокна.

На Рис.1 ілюструється утворення деформації натягу на зовнішній поверхні оптичного волокна при утворенні вигину. Як видно з рисунку, зовнішня частина оптичного волокна на вигині розтягується, а внутрішня стискається. Відносне видовження зовнішньої частини волокна складає $\delta / 2R_0$, де δ – діаметр волокна, а R_0 – радіус вигину.

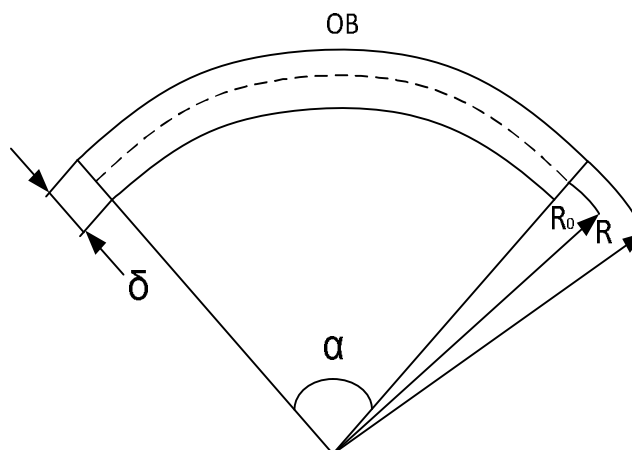


Рис. 1. Утворення деформації натягу

В запропонованій роботі було проведено оцінку відносної деформації зовнішньої частини оптичного волокна в залежності від радіусу вигину. Діаметр оптичного волокна δ при цьому дорівнював 125 мкм. Результати розрахунку залежності відносної деформації зовнішньої поверхні оптичного волокна від радіусу вигину наведені на Рис. 2.

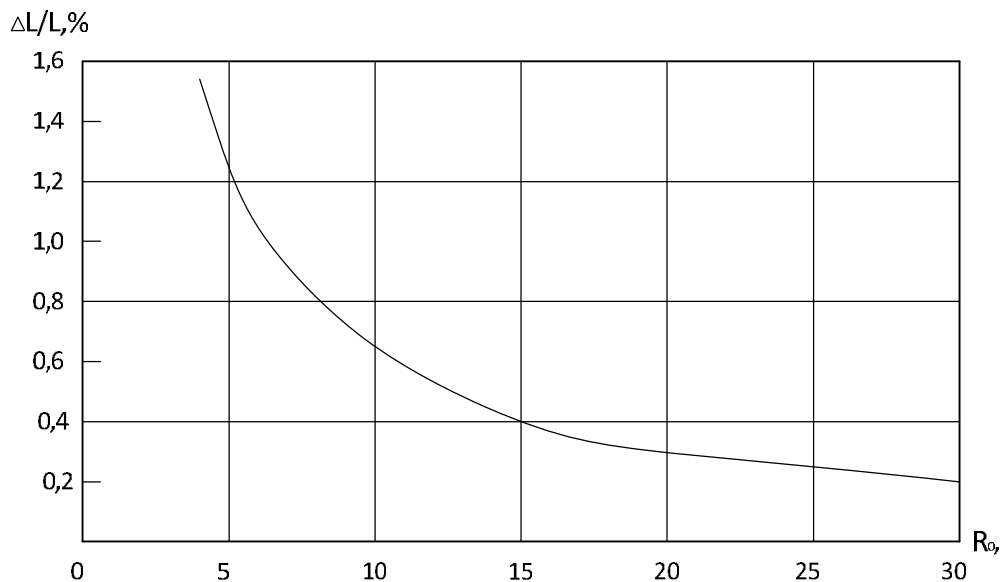


Рис. 2. Залежність відносної деформації волокна на вигині від радіусу вигину

Враховуючі дані, наведені в роботі [5], щодо залежності терміну функціонування оптичного волокна від відносного видовження, та надані на Рис.2, можна визначити термін функціонування оптичного волокна в залежності від радіусу вигину. Так, наприклад, згідно з [5], для досягнення значення терміну експлуатації волокна, що дорівнює 25 років, необхідно, щоб відносне видовження не перевищувало значення 0,3%. Згідно з Рис. 2, це відповідає радіусу вигину, що дорівнює порядку 20 мм. Використання меншого радіусу вигину при монтажу оптичного обладнання помітно зменшує строк служби волокна, хоча, з точки зору Рекомендацій МСЕ, він може бути допустимий. Так, вже при значенні відносного видовження 0,33% термін функціонування складає тільки 5 років.

Таким чином, при проектуванні та прокладанні мереж доступу необхідно вибирати радіус вигину оптичних кабелів та волокон з урахуванням не тільки їх допустимого радіусу вигину, але й терміну експлуатації. Особливу увагу треба в цьому випадку приділити оптичним волокнам, що відповідають Рекомендації МСЕ G.657, оскільки допустимий радіус вигину в них помітно менший за такий, що забезпечує задовільний термін експлуатації.

Враховуючи той факт, що відносна деформація натягу за законом Гука пов'язана з напруженням у оптичному волокні як

$$\Delta L/L = \sigma/E,$$

за значенням відносного видовження можна визначити напруження натягу у волокні:

$$\sigma = (\Delta L/L) \times E,$$

яке також однозначно визначає термін функціонування оптичного волокна. Тут ΔL – абсолютне видовження оптичного волокна, L – довжина волокна, σ – напруження натягу в оптичному волокні, E – модуль Юнга матеріалу волокна.

На Рис. 3 наведені результати експериментальних досліджень компанії Fujikura [6], які дозволяють оцінити термін служби оптичного волокна при відомих значення напруження натягу в ньому. Таким чином, при проектуванні оптичних кабельних мереж для внутрішнього прокладання необхідно враховувати такий фактор, як радіус вигину оптичного кабелю та оптичного волокна в стаціонарних умовах експлуатації. Особливу увагу треба звернути на нові типи волокна, для яких допустимий, згідно зі стандартами МСЕ, понижений радіус вигину. При цьому треба перевірити відповідність проектного радіусу вигину вимогам до терміну функціонування оптичної мережі та за необхідності скоректувати його значення.

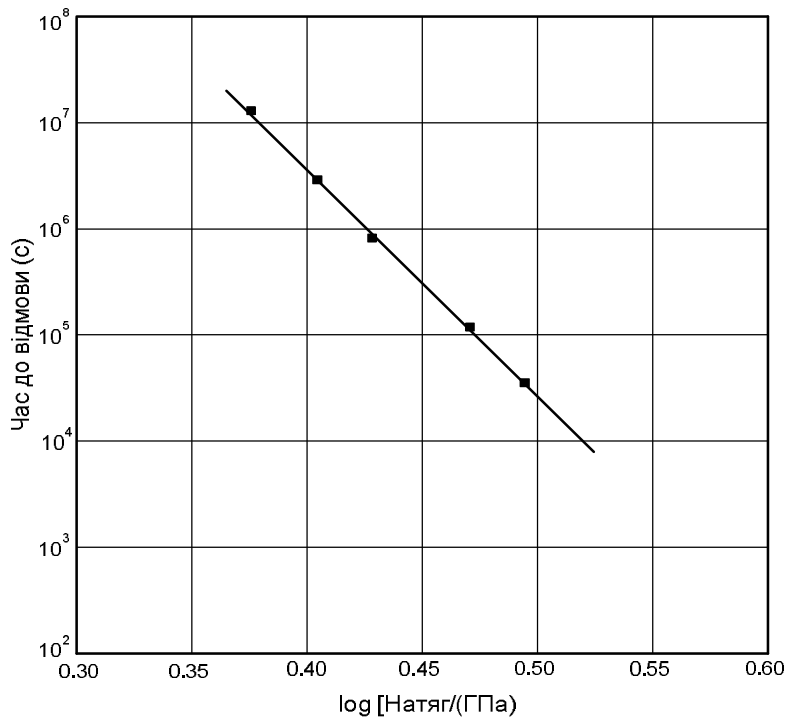


Рис. 3. Співвідношення між рівнем напруги натягу у волокні та часом до відмови при проведенні випробувань на статичну втому

Враховуючи інтенсивний розвиток пасивних оптичних мереж доступу та використання в них оптичних кабелів з осердям стрічкового типу актуальним є розрахунок їх конструктивних параметрів з точки зору підвищення надійності.

В якості прикладу наведемо розрахунок параметрів скрутки для осердя стрічкового типу оптичного кабелю виробництва компанії OFS (Японія) як типового [7]. Осердя цього кабелю являє собою пакет, складений з стрічок, що містять оптичні волокна.

Для нашого конкретного випадку розрахунок проведемо для осердя ОК, що містить 12 стрічок, кожна з яких має 12 оптичних волокон. Вигляд поперечного перерізу осердя стрічкового типу такого ОК наведено на Рис. 4.

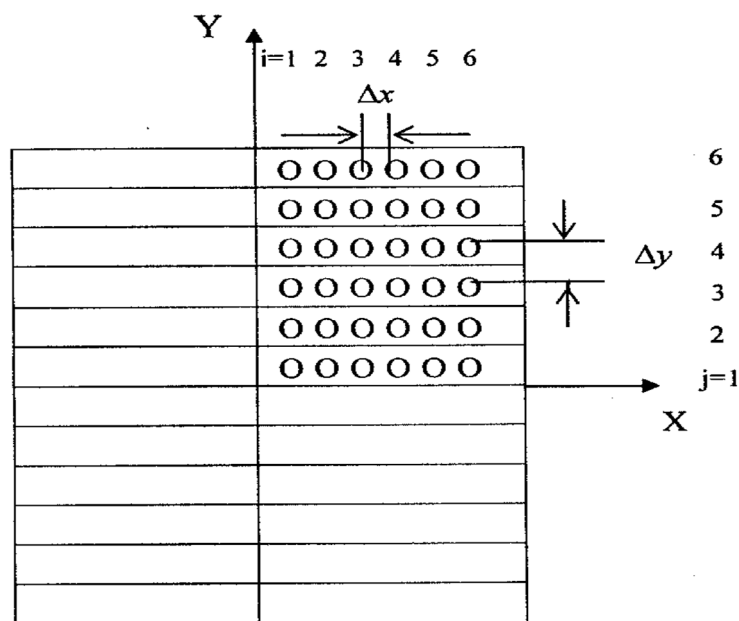


Рис. 4. Поперечний переріз осердя ОК стрічкового типу

Слід зауважити, що для запропонованої методики розрахунків немає значення ні кількість стрічок, ні кількість волокон в них.

Осердя даного ОК закручується для гнучкості та підвищення механічних параметрів.

Параметричне рівняння гвинтової лінії має вигляд:

$$x = a \cos t; \quad y = a \sin t; \quad z = bt,$$

де a – радіус циліндра, по якому рухається точка гвинтової лінії; параметр b вказує, на скільки піднімається точка лінії, якщо проекція радіус-вектора на площині $ХОУ$ повернеться на один радіан.

Тоді $h = 2b\pi$ – крок гвинтової лінії, який показує на скільки підніметься точка лінії, якщо проекція радіус-вектора опише повне коло (гвинтова лінія зробить один виток). Враховуючи той факт, що при скручуванні оптичні волокна будуть розміщені по гвинтовій лінії, необхідно визначити радіус кривизни R гвинтової кривої, який пов'язаний з кабельними втратами у волокні.

Як відомо, кривизна для гвинтової лінії дорівнює: $K = \frac{1}{R} = \frac{a}{a^2 + b^2}$.

Враховуючи, що $b = \frac{h}{2\pi}$, радіус кривизни визначається як $R = \frac{4a^2\pi^2 + h^2}{4a\pi^2}$.

Оскільки осердя ОК симетричне відносно осей $ОХ$ та $ОУ$, то розглянемо перший квадрант (Рис. 4). Радіус кривизни R для кожного ОВ буде визначатись його положенням та кроком гвинтової лінії h . Координати оптичних волокон будемо задавати парою чисел (i, j) , де $i = 1, \dots, 6$; $j = 1, \dots, 6$.

Кожне ОВ буде мати свою гвинтову лінію, для якої параметр a буде дорівнювати відстані від початку координат до центру ОВ. Цю відстань в загальному випадку можна знайти за формулою:

$$a = \sqrt{(i - 0,5)^2 \Delta x^2 + (j - 0,5)^2 \Delta y^2}.$$

Тут Δx – відстань між осями двох сусідніх оптичних волокон, що розміщені в одній стрічці; Δy – відстань між осями двох сусідніх оптичних волокон, що розміщені в сусідніх стрічках.

З метою визначення радіуса кривизни оптичного волокна R в залежності від параметрів гвинтової лінії в роботі було проведено розрахунки для певних значень a та h і розміщення волокна в осерді ОК. При цьому покладаємо, що дискретний крок розміщення волокон складає $\Delta x = \Delta y = 0,25$ мм.

Результати обчислень для значень $a_{\min} \leq a \leq a_{\max}$ ($a_{\min} \approx 0,33$; $a_{\max} \approx 4$) та величини параметра ($20 \leq h \leq 200$) (усі розміри на графіках задано в мм) представлено на Рис. 5.

На Рис. 5 номерам ліній відповідає наступні значення h :

$$\begin{array}{lll} 1 - h = 20; & 2 - h = 30; & 3 - h = 40; \\ 4 - h = 50; & 5 - h = 60; & 6 - h = 70; \\ 7 - h = 80; & 8 - h = 90; & 9 - h = 100. \end{array}$$

Отримані значення радіусів вигину оптичних волокон дозволяють на основі вищевикладеного розрахувати надійність оптичного кабелю.

Таким чином, приведений в роботі метод дозволяє проводити проектування оптичних мереж доступу з можливістю визначення терміну функціонування їх ділянок, що містять вигини оптичних кабелів та волоконних світловодів. При цьому особливу увагу треба приділяти ситуаціям з використанням нових типів оптичних волокон, що відповідають Рекомендації МСЕ G.657. Оскільки можливість використання оптичних волокон з пониженим допустимим радіусом вигину може призвести до значного зменшення терміну функціонування мережі, а отже її надійності.

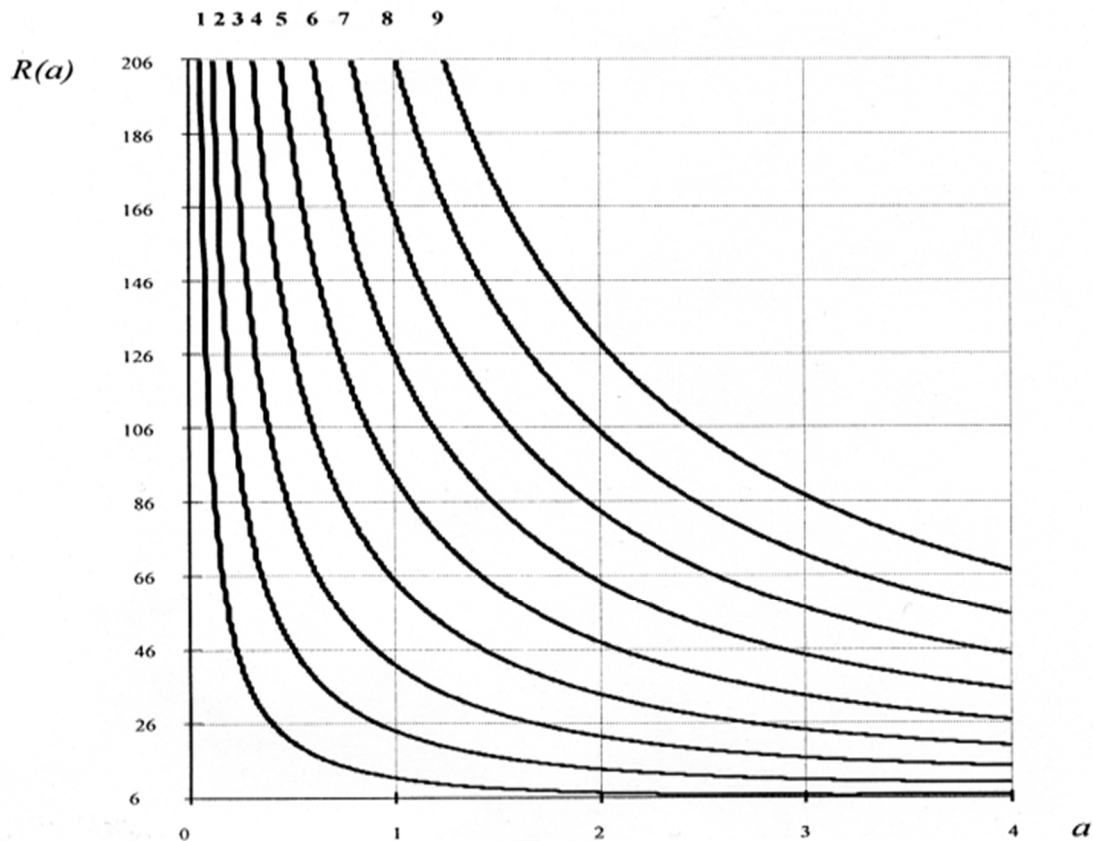


Рис. 5. Залежність радіусу кривизни ОВ від відстані до осі осердя, мм

Література

1. Characteristics of a bending-loss insensitive single-mode optical fibre and cable for the access network // ITU-T Recommendation G.657.
2. Yutaka Mitsunaga, Yutaka Katsuyama, Hirokazu Kobayashi, Yukinori Ishida // Journal of Applied Physics. – 1982. – Vol.53, №7. – P.4847-4853.
3. Definitions and test methods for linear, deterministic attributes of single-mode fibre and cable // ITU-T Recommendation G.650.1
4. Пестриков В. М. Длительная прочность оптических волокон в условиях старения материала / В. М. Пестриков // Физика и химия стекла. – 2000. – Т.26, №2. – С. 244-257.
5. Листвин А. В. Оптические волокна для линий связи / А. В. Листвин, В. Н. Листвин, Д. В. Швырков. – Москва : ЛЕСАРпт, 2003. – 288 с.
6. Fujikura Optical Fiber & Cables Department International Telecommunications Division 1-5-1, Kiba, Koto-ku, Tokyo 135-8512, Japan, “Manual of single mode optical fiber”. Issued in June 1999.
7. Скубак О. М. Деякі питання визначення конструктивних параметрів оптичних кабелів зі стрічковим осердям / О. М. Скубак, О. О. Манько // Вісник Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій. – 2011. – Т.9, №4. – С. 335–341.

Дата надходження в редакцію: 25.03.2015 р.

Рецензент: к.т.н., доц. В. Б. Каток