

УДК 535.5

**ВПЛИВ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ СКЛА ОПТИЧНОГО ВОЛОКНА
НА ХРОМАТИЧНУ ДИСПЕРСІЮ СИГНАЛУ**

Стащук О.М., Степанов Д.М., Багачук Д.Г.

*Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова,
65029, Україна, м. Одеса, вул. Кузнечна, 1.
Olegstaschuk777@gmail.com*

**ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА СТЕКЛА ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА
НА ХРОМАТИЧЕСКУЮ ДИСПЕРСИЮ СИГНАЛА**

Стащук О.М., Степанов Д.Н., Багачук Д.Г.

*Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова,
65029, Украина, г. Одесса, ул. Кузнечная, 1.
Olegstaschuk777@gmail.com*

**IMPACT OF THE OPTICAL FIBER CHEMICAL COMPOSITION
ON CHROMATIC DISPERSION**

Staschuk O.M., Stepanov D.M., Bagachuk D.G.

*O.S. Popov Odessa national academy of telecommunications,
1 Kuznechna St., Odessa, 65029, Ukraine.
Olegstaschuk777@gmail.com*

Анотація. Проведено аналіз залежностей питомих матеріальної, хвилеводної та хроматичної дисперсій сигналу від довжини робочої хвилі сигналу для ступінчастих одномодових оптичних волокон різних за хімічним складом серцевини та оболонки. Встановлено вплив легуючих домішок на значення питомої хроматичної дисперсії сигналу. Визначено хімічні склади оптичних волокон, що за дисперсійними характеристиками задовольняють рекомендаціям ІТУ G.652.

Ключові слова: оптичне волокно, матеріальна дисперсія, хвилеводна дисперсія, хроматична дисперсія.

Аннотация. Проведен анализ зависимостей удельных материальной, волноводной и хроматической дисперсий сигнала от длины рабочей волны сигнала для ступенчатых одномодовых оптических волокон разных по химическому составу сердцевин и оболочки. Установлено влияние легирующих примесей на значение удельной хроматической дисперсии сигнала. Определены химические составы оптических волокон, что по дисперсионным характеристикам удовлетворяют рекомендациям ИТУ G.652.

Ключевые слова: оптическое волокно, материальная дисперсия, волноводная дисперсия, хроматическая дисперсия.

Abstract. The analysis of the dependence of the specific material, waveguide and chromatic dispersions on the signal operating wavelength for step single-mode optical fibers for different chemical composition of the core and cladding. The influence of dopants on a value of the chromatic dispersion of the signal is shown. Determined the chemical compositions of optical fibers that satisfy dispersion specifications in ITU G.652 recommendations.

Key words: optical fiber, material dispersion, waveguide dispersion, chromatic dispersion.

Хроматична дисперсія (ХД) є однією з основних причин спотворення форми оптичного сигналу в лінійному тракті волоконно-оптичних систем передачі (ВОСП). У сучасних умовах, коли спостерігається стрімке зростання інформаційного трафіка, основною задачею розробників ВОСП є підвищення пропускну здатності систем оптичного зв'язку, в тому числі за рахунок оптимізації дисперсійних характеристик оптичних волокон (ОВ).

Виробники ОВ для забезпечення їх каналізаційних властивостей вносять до хімічного складу скла серцевини та оболонки ОВ легуючі домішки. Кожен тип домішок впливає на дисперсійні характеристики ОВ. На сьогодні повною мірою не надаються хімічні склади ОВ, за яких досягаються значення питомої ХД, регламентовані рекомендаціями ITU G.652 (для ОВ типу SF). Дана стаття направлена на заповнення цієї прогалини. Необхідно встановити характер впливу на питому ХД кожного типу домішок та визначити оптимальний хімічний склад ОВ.

Аналіз досліджень та публікацій. На сьогодні повною мірою сформувалась методика розрахунку питомої ХД. Доволі якісно ця методика висвітлена в [1, 2, 3, 4, 5, 6]. В цих роботах пропонується окремо розраховувати складові питомої ХД: питому матеріальну дисперсію (МД) та питому хвилеводну дисперсію (ХВД). Надано [7] результати дослідження питомої МД для низки хімічних складів ОВ. Отримано [8] спектральні характеристики питомої ХВД. Проте, в перерахованих джерелах не надано аналіз впливу різного виду домішок на значення питомої ХД. Не названо переваги та недоліки кожного виду легуючих домішок з точки зору впливу на дисперсійні характеристики ОВ.

Актуальність теми дослідження. Одним із фундаментальних параметрів, який визначає продуктивність каналу ВОСП є питома ХД. Ступінь перекриття, за якого дисперсія імпульсів викликає помилки в цифрових системах, залежить від формату кодування. Основним орієнтиром для оцінки максимальної швидкості передавання даних у ВОСП є те, що інтервал між імпульсами повинен бути в чотири рази більше дисперсії, тобто [9]:

$$Maximum \ bit \ rate = \frac{1}{4 \cdot \Delta\tau_{dispersion}}, \quad (1)$$

де *Maximum bit rate* – максимальна швидкість передавання інформації, біт/с; $\Delta\tau_{dispersion}$ – розширення імпульсу в наслідок дії дисперсії сигналу, с.

Дисперсія сигналу у ВОСП є основним обмежуючим фактором, що впливає на пропускну здатність системи та швидкість передавання інформації.

Спектральне розсіювання складових оптичного сигналу або ХД в одномодовому ОВ залежить від дисперсійних властивостей матеріалу серцевини (МД) та дисперсійних властивостей ОВ як направляючої системи (ХВД). Як МД, так і ХВД залежать від виду легуючих домішок, доданих до складу серцевини та оболонки ОВ, від концентрації цих домішок. Встановлення залежності кожної складової дисперсії від виду та концентрації доданих домішок дозволить розробити спосіб оптимізації дисперсійних характеристик ОВ на базі підбору хімічного складу серцевини та оболонки ОВ. Оптимізація дисперсійних характеристик є однією із основних задач для виробників ОВ.

Метою статті є встановлення прямої залежності питомої ХД від довжини робочої хвилі сигналу, що передається для ОВ, різних за хімічним складом серцевини та оболонки, аналіз отриманих спектральних характеристик питомої ХД та визначення хімічних складів ОВ, що задовольняють рекомендації ITU G.652. Рецепти ОВ, для яких проводились розрахунки, надано в табл. 1.

Для дослідження вибрано діапазон довжин хвиль 1,45 ... 1,625 мкм. Також метою статті є встановлення довжини хвилі нульової ХД для кожного із наведеного в табл. 1, ОВ.

Дослідження МД сигналу в ОВ. МД $M(\lambda)$ в ОВ зумовлена внутрішніми властивостями матеріалу ОВ. Матеріал виготовлення ОВ – скло, є дисперсійним середовищем. Причина появи МД полягає в тому, що зміна довжини хвилі оптичного сигналу λ викликає зміну показника заломлення серцевини ОВ n_1 , а, оскільки групова швидкість поширення є функцією показника заломлення, то спектральні складові оптичного сигналу поширюються з різними швидкостями, що призводить до зміни тривалості світлового імпульсу. Залежність показника заломлення матеріалу від довжини хвилі описується формулою Селмейера [5, 6].

Таблиця 1 – Хімічні склади оптичних волокон, що вибрані для дослідження

Позначення ОВ	Склад серцевини ОВ	Склад оболонки ОВ
ОВ-1	100 % SiO ₂	1 % F, 99 % SiO ₂
ОВ-2	2,2% GeO ₂ , 3,3% B ₂ O ₃ , 94,5% SiO ₂	3% B ₂ O ₃ , 97% SiO ₂
ОВ-3	9,1% P ₂ O ₅ , 90,9% SiO ₂	7% GeO ₂ , 93% SiO ₂
ОВ-4	2,2% GeO ₂ , 3,3% B ₂ O ₃ , 94,5% SiO ₂	13,5% BeO ₂ , 86,5% SiO ₂
ОВ-5	0,1% GeO ₂ , 5,4% B ₂ O ₃ , 94,5% SiO ₂	3,5% B ₂ O ₃ , 96,5% SiO ₂
ОВ-6	4,03% GeO ₂ , 9,7% B ₂ O ₃ , 86,27% SiO ₂	100% SiO ₂
ОВ-7	3,3% GeO ₂ , 9,2% B ₂ O ₃ , 87,5% SiO ₂	13,5% B ₂ O ₃ , 86,5% SiO ₂ загартований
ОВ-8	3,5% GeO ₂ , 96,5% SiO ₂	100% SiO ₂ з гасячими домішками
ОВ-9	7,9% GeO ₂ , 92,1% SiO ₂	5,8% GeO ₂ , 94,2% SiO ₂

Коефіцієнт питомої МД визначається за виразом [1, 2, 3, 4, 5, 6, 9]:

$$M(\lambda) = -\frac{\lambda \partial^2 n_1}{c \partial \lambda^2}, \quad (2)$$

де $M(\lambda)$ – питома МД сигналу в ОВ, пс/(км·нм); λ – довжина хвилі сигналу, мкм; c – швидкість світла в вакуумі ($c = 3 \cdot 10^8$ м/с); n_1 – показник заломлення серцевини ОВ.

За виразом (2) виконано обчислення питомої МД для ОВ, хімічні склади яких надано в табл. 1. В результаті отримано форми залежностей питомої МД для довжин хвиль $\lambda = 1460 \dots 1625$ нм, що включає у себе три діапазони ВОСП: короткохвильовий (short) – 1460 ... 1530 нм, стандартний (conventional) – 1530 ... 1565 нм, довгохвильовий (long) – 1565 ... 1625 нм. Дані графіки показано на рис. 1.

Результати проведених досліджень свідчать про наступне:

1. Додавання домішок окису фосфору до складу серцевини ОВ призводить до зростання коефіцієнта питомої МД (ОВ-3).
2. Додавання домішок окису германія без домішок окису бору призводить до зменшення коефіцієнта питомої МД (ОВ-9).
3. Додавання домішок окису германію, концентрацією не менше 3,3% разом з домішками окису бору, концентрацією не менше 9,2% викликає збільшення коефіцієнта питомої МД (ОВ-6, ОВ-7).
4. Додавання домішок окису германія, концентрацією менше 2,2% разом з домішками окису бору, концентрацією менше 5,4% викликає зменшення коефіцієнта питомої МД (ОВ-2, ОВ-4, ОВ-5).

Дослідження ХВД сигналу в ОВ. ХВД $W(\lambda)$ – це зміна тривалості інформаційного імпульсу, яка відбувається внаслідок того, що електромагнітна хвиля, поміщена в певне середовище, залежить від хвилеводної структури даного середовища. Зі збільшенням довжини робочої хвилі оптичного сигналу зростає діаметр поля моди, тому що в одномодових ОВ хвиля поширюється не тільки в серцевині, а й частково проникає в оболонку, тоді частина потужності імпульсу зосереджується в оболонці, показник заломлення якої менший ніж показник заломлення серцевини. Швидкість поширення такої хвилі змінюється, що і призводить до розширення імпульсу [8].

Причина виникнення хвилеводної дисперсії полягає в залежності фазового коефіцієнта поширення від довжини робочої хвилі сигналу, що передається. Розрахунок питомої хвилеводної дисперсії слід робити за виразом [3, 6]:

$$W(\lambda) = -\frac{n_2 \Delta}{c \lambda} \cdot V \frac{\partial^2 (Vb)}{\partial V^2}, \quad (3)$$

де $W(\lambda)$ – питома хвильоводна дисперсія, пс/(км·нм); n_2 – показник заломлення матеріалу скла оболонки ОВ; c – швидкість світла у вакуумі ($c = 3 \cdot 10^8$ м/с); λ – довжина робочої хвилі оптичного сигналу, мкм; Δ – відносна різниця показників заломлення серцевини й оболонки ОВ; $V \frac{\partial^2(Vb)}{\partial V^2}$ – функція, яка залежить від профілю діелектричної проникності ОВ, визначається за графіком [8]; V – нормована частота, рад.

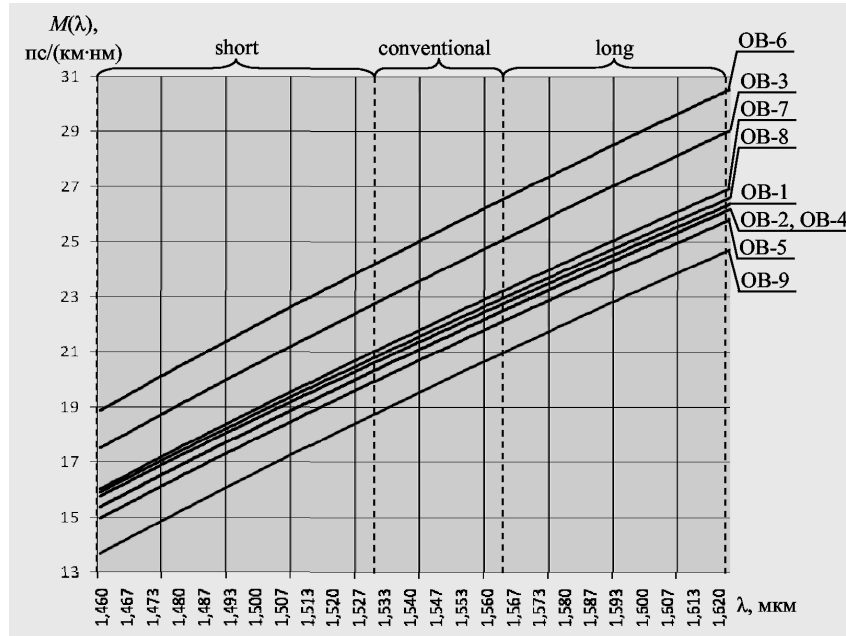


Рисунок 1 – Спектральні залежності питомої МД різних за хімічним складом ОВ

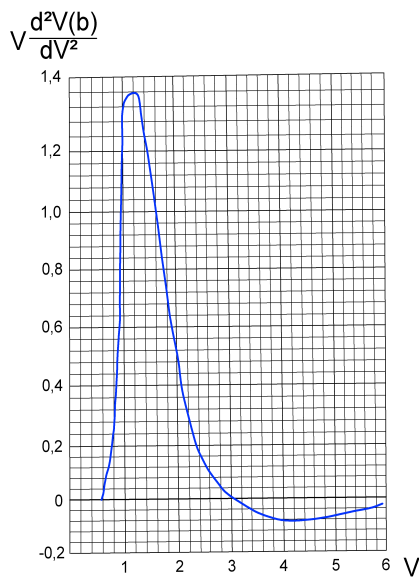


Рисунок 2 – Залежність функції $V \frac{d^2V(b)}{dV^2}$ від нормованої частоти для ступінчастого ОВ

Результати розрахунку функції $V \frac{\partial^2(Vb)}{\partial V^2}$, що отримані методом ступінчастої апроксимації в наближенні поляризованих мод для одномодового ступінчастого ОВ, показані на рис. 2 [8].

Для визначення параметра $V \frac{\partial^2(Vb)}{\partial V^2}$ можна використати графік рис. 2 або застосувати вираз [3]:

$$V \frac{\partial^2(Vb)}{\partial V^2} \approx 0,080 + 0,549(2,834 - V)^2. \quad (4)$$

Як свідчать результати проведених в роботі досліджень за одномодового режиму роботи ОВ, при значенні довжини хвилі $\lambda = 1460 \dots 1625$ нм та при значенні радіуса серцевини $a = 4 \dots 5$ мкм розрахунки за виразом (4) дозволяють отримати достатньо точні результати, які збігаються з графіком рис. 2.

За виразом (3) виконано обчислення питомої ХВД для ОВ, хімічні склади яких надано в табл. 1. В результаті отримано спектральні характеристики ХВД, які у вигляді графіків показано на рис. 3.

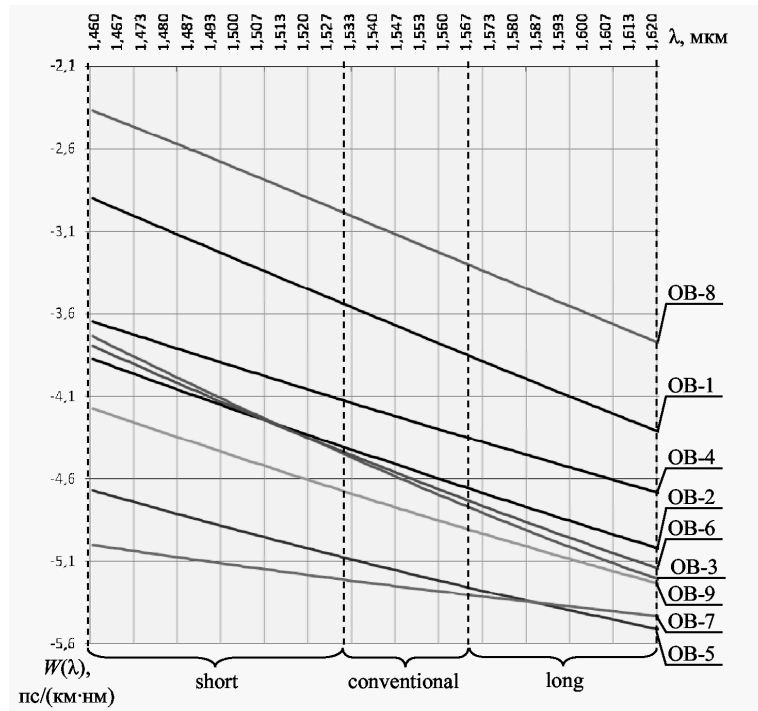


Рисунок 3 – Спектральні залежності питомої ХВД різних за хімічним складом ОБ

Результати проведених досліджень дозволяють стверджувати:

1. Для ОБ, що досліджувались, питома ХВД є меншою за модулем ніж питома МД в 3,5 ... 6,5 раза, але є протилежна їй за знаком. Дана особливість дозволяє деякою мірою зменшити питому ХД, яка є алгебраїчною сумою питомих ХВД та МД.

2. При збільшенні довжини хвилі оптичного сигналу вплив ХВД зростає. Динаміка зростання питомої ХВД при збільшенні довжини хвилі є різною для ОБ, що досліджувались. Найбільш крутий кут нахилу кривої питомої ХВД мають ОБ-1 і ОБ-8.

Дослідження ХД сигналу в ОБ. Питома ХД комплексно враховує дисперсійні особливості середовища поширення електромагнітної хвилі (серцевини ОБ) та дисперсійні особливості ОБ як прямої системи зв'язку, визначається як алгебраїчна сума питомих МД та ХВД [4, 10]:

$$D(\lambda) = M(\lambda) + W(\lambda), \quad (5)$$

де $D(\lambda)$, $M(\lambda)$ та $W(\lambda)$ – питомі хроматична, матеріальна та хвилеводна дисперсії сигналу відповідно, пс/(км · нм).

Скориставшись вищевикладеними результатами досліджень питомих МД та ХВД та виразом (5) отримано значення питомої ХД для ОБ, що досліджувались. Результати розрахунків надано в табл. 2, а також показано у вигляді графіків залежності питомої ХД від довжини хвилі на рис. 4.

Для прийняття рішень щодо можливості використання ОБ, що досліджувалися у ВОСП, необхідно виконати порівняння отриманих значень питомої ХД з нормованими значеннями. В даній статті як нормовані значення питомої ХД використаємо значення, що регламентуються Міжнародним союзом зв'язку та викладені в рекомендації ITU G.652 [10]. Дана рекомендація стосується стандартного одномодового ОБ (тип SF). Згідно з рекомендацією, для кожної довжини хвилі з діапазону, що досліджувався, встановлюється мінімально допустима та максимально допустима величина питомої ХД, тобто параметр $D(\lambda)$ повинен знаходитись у межах:

$$\frac{\lambda S_{0 \max}}{4} \left[1 - \left(\frac{\lambda_{0 \max}}{\lambda} \right)^4 \right] \leq D(\lambda) \leq \frac{\lambda S_{0 \max}}{4} \left[1 - \left(\frac{\lambda_{0 \min}}{\lambda} \right)^4 \right], \quad (6)$$

де λ – довжина хвилі оптичного сигналу, нм; $S_{0 \max}$ – максимальний нахил дисперсійної кривої, пс/(нм² · км); $\lambda_{0 \max}$ – максимальна довжина хвилі нульової дисперсії, нм; $\lambda_{0 \min}$ – мінімальна довжина хвилі нульової дисперсії, нм.

Значення параметрів $S_{0 \max}$, $\lambda_{0 \max}$, $\lambda_{0 \min}$ для усіх ОВ типу SF (G.652.A, G.652.B, G.652.C, G.652.D) є однаковими та складають: $S_{0 \max} = 0,092$ пс/(нм² · км); $\lambda_{0 \max} = 1324$ нм; $\lambda_{0 \min} = 1300$ нм.

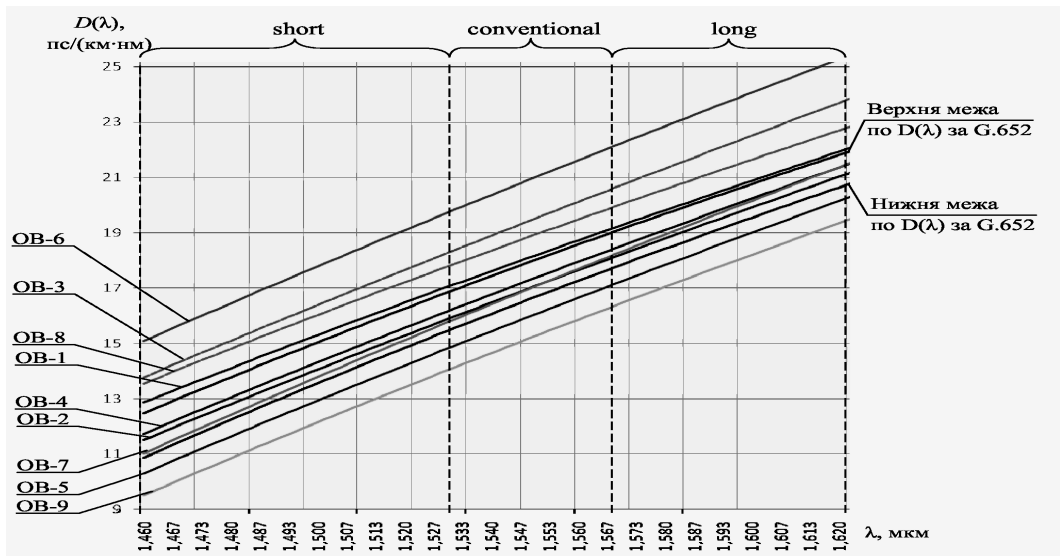


Рисунок 4 – Спектральні залежності питомої ХД різних за хімічним складом ОВ

Згідно з рекомендацією ІТУ G.652, в діапазоні довжин хвиль 1460 ... 1625 нм максимальне значення питомої ХД знаходиться в межах від 12,47 пс/(км·нм) (при $\lambda = 1,46$ мкм) до 22,07 пс/(км·нм) (при $\lambda = 1,625$ мкм); мінімальне значення питомої ХД знаходиться в межах від 10,87 пс/(км·нм) (при $\lambda = 1,46$ мкм) до 20,90 пс/(км·нм) (при $\lambda = 1,625$ мкм). На рис. 4 відображені також верхня та нижня межі згідно з рекомендацією ІТУ G.652.

У статті також встановлено довжину хвилі нульової питомої ХД (λ_0) для кожного із ОВ табл. 1. Значення параметра λ_0 надано в табл. 2.

Таблиця 2 – Отримані значення питомої ХД та довжина хвилі нульової ХД для ОВ, що досліджувались

№ з/п	Номер ОВ	Питома ХД при $\lambda = 1460 \dots 1530$ нм (short), пс/(км·нм)	Питома ХД при $\lambda = 1530 \dots 1565$ нм (conventional), пс/(км·нм)	Питома ХД при $\lambda = 1565 \dots 1625$ нм (long), пс/(км·нм)	Довжина хвилі нульової ХД, λ_0 , мкм
1	ОВ-1	12,86 ... 17,05	17,05 ... 19,02	19,02 ... 22,22	1,288
2	ОВ-2	11,50 ... 15,88	15,88 ... 17,96	17,96 ... 21,32	1,307
3	ОВ-3	13,77 ... 18,28	18,28 ... 20,44	20,44 ... 24,03	1,283
4	ОВ-4	11,73 ... 16,17	16,17 ... 18,26	18,26 ... 21,67	1,306
5	ОВ-5	10,30 ... 14,82	14,82 ... 16,97	16,97 ... 20,47	1,324
6	ОВ-6	15,08 ... 19,73	19,73 ... 21,96	21,96 ... 25,60	1,275
7	ОВ-7	11,02 ... 15,77	15,77 ... 18,03	18,03 ... 21,69	1,321
8	ОВ-8	13,55 ... 17,79	17,79 ... 19,78	19,78 ... 22,99	1,284
9	ОВ-9	9,50 ... 14,04	14,04 ... 16,18	16,18 ... 19,66	1,334

В результаті виконаної роботи можна зробити висновки:

1. У статті досліджено вплив хімічного складу скла оптичного волокна на хроматичну дисперсію сигналу шляхом визначення та оцінки вкладу питомих матеріальної та хвилеводної дисперсії сигналів, а також що:

- форми спектральних характеристик питомої ХД повторюють форми спектральних характеристик питомої МД. Численні значення коефіцієнта питомої ХД менші ніж МД, оскільки має місце незначна корекція сумарної дисперсії, тому що питомі МД та ХВД протилежні за знаком;

- рекомендації ITU G.652 задовольняють наступні ОВ, що досліджувались: ОВ-2, ОВ-4, ОВ-7.

Визначено довжини хвиль нульової ХД для досліджуваних ОВ. Шляхом додавання до складу серцевини та оболонки ОВ окису германія, окису бору можна змінювати λ_0 в межах від 1,275 до 1,334 мкм.

3. Матеріал може бути використаний для розробки ОВ, а також, як довідник, для написання магістерських робіт, присвячених дослідженню дисперсійних характеристик ОВ.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Bagad V. S. Optical Fiber Communication / Bagad V. S. – Technical Publications Pune, 2009. – 260 с.
2. Ajoy Ghatak Optics / Ajoy Ghatak – Tata McGraw-Hill, 2008 – 483 с.
3. Hegde S. Dispersion Compensated Optical Fibers for Long Haul Communication / Hegde S., Agrawal S., Sangeetha A. // VIT University, Vellore, India. – 2015.
4. Aqeel Salim Raheem Dispersion in different single mode optical fiber materials at different temperatures / Aqeel Salim Raheem, Technical College – Najaf // Al-Qadisiya Journal For Engineering Sciences. – 2011. Vol. 4. – No.3.
5. Агравал Г. Нелинейная волоконная оптика / Агравал Г. – М.: Мир, 1996. – 323 с.
6. Fedor Mitschke Fiber Optics. Physics and Technology / Fedor Mitschke – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009. – 301 с.
7. Стащук О.М. Вплив хімічного складу скла оптичного волокна на матеріальну дисперсію сигналу / О.М. Стащук, Д.М. Степанов, Д.Г. Багачук // Вісник Хмельницького національного університету. – Хмельницький, 2015 – Вип. 6. – С. 234 – 237.
8. Стащук О.М. Вплив хімічного складу скла оптичного волокна на хвилеводну дисперсію сигналу / О.М. Стащук, Д.М. Степанов, Д.Г. Багачук // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – Вінниця, 2016. – Вип. № 2 (125). – С. 157 – 160.
9. Jeff Hecht Understanding Fiber Optics / Jeff Hecht – Laser Light Press, 2015. – 800 с.
10. Recommendation ITU-T G.652 Characteristics of a single-mode optical fibre and cable – Geneva, 2010. – 22 с.

REFERENCES:

1. Bagad V. S. Optical Fiber Communication / Bagad V. S. – Technical Publications Pune, 2009. – 260 с.
2. Ajoy Ghatak Optics / Ajoy Ghatak – Tata McGraw-Hill, 2008 – 483 с.
3. Hegde S. Dispersion Compensated Optical Fibers for Long Haul Communication / Hegde S., Agrawal S., Sangeetha A. // VIT University, Vellore, India. – 2015.
4. Aqeel Salim Raheem Dispersion in different single mode optical fiber materials at different temperatures / Aqeel Salim Raheem, Technical College – Najaf // Al-Qadisiya Journal For Engineering Sciences. – 2011. Vol. 4. – No.3.
5. Agraval G. Nelineynaya volokonnaya optika / G. Agraval – M.: Mir, 1996. – 323 p.
6. Fedor Mitschke Fiber Optics. Physics and Technology / Fedor Mitschke – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009. – 301 p.
7. Stashchuk O.M. Vplyv khimichnoho skladu skla optychnoho volokna na material'nu dyspersiyu syhnalu / O.M. Stashchuk, D.M. Stepanov, D.H. Bahachuk // Visnyk Khmel'nyts'koho Natsional'noho Universytetu. – Khmel'nyts'kyy, 2015 – Vyp. 6, –S. 234 – 237.
8. Stashchuk O.M. Vplyv khimichnoho skladu skla optychnoho volokna na khvylevodnu dyspersiyu syhnalu / O.M. Stashchuk, D.M. Stepanov, D.H. Bahachuk // Naukovyy zhurnal Visnyk Vinnyts'koho politekhnichnoho instytutu. –Vinnytsya, 2016. – Vyp. # 2 (125). –S. 157 – 160.
9. Jeff Hecht Understanding Fiber Optics / Jeff Hecht – Laser Light Press, 2015. – 800 с.
10. Recommendation ITU-T G.652 Characteristics of a single-mode optical fibre and cable – Geneva, 2010. – 22 p.