

**ИССЛЕДОВАНИЕ ХРОМАТИЧЕСКОЙ ДИСПЕРСИИ В ОПТИЧЕСКОМ ВОЛОКНЕ  
С УПОРЯДОЧЕННОЙ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ МИКРОСТРУКТУРОЙ СТЕКЛА**

**RESEARCH OF CHROMATIC DISPERSION IN OPTIKAL FIBER WITH THE ORDERED  
REVOLVING MICROSTRUCTURE OF GLASS**

**Аннотация.** Исследована хроматическая дисперсия оптического волокна с упорядоченной вращающейся структурой стекла. Проведен анализ прибавки к дисперсии изотропного волокна, обусловленной упорядоченностью микроструктуры.

**Summary.** The accounting of the chromatic dispersion of the optical fiber with the ordered revolving glass structure has been done. The analysis of the adding isotropic fiber to the dispersion caused by the ordering microstructure has been developed.

Во многих компонентах волоконно-оптических систем передачи (ВОСП) находят широкое применение различные устройства, использующие анизотропные среды. К таким устройствам относятся: поляроиды, управляемые направленные ответвители, модуляторы света, призмы, оптические волокна (ОВ) и другие компоненты, принцип действия которых основан на оптической анизотропии.

Проблема увеличения объема передаваемой по ВОСП информации и повышения ее качества связана с существенным улучшением параметров всех компонентов ВОСП и, в первую очередь, параметров передачи ОВ, одним из которых является дисперсия сигнала в стекловолокнах. Большие возможности в решении указанной проблемы открывает использование в ВОСП ОВ, обладающих анизотропными средствами.

Известно [1...3], что для создания оптического волокна (ОВ), обладающего анизотропными свойствами, необходимо поместить его во внешнее электромагнитное поле либо создать в нем внутренние механические напряжения. Такие механические напряжения, возникающие в волокнах, делают структуру молекул стекла упорядоченной, что имеет место, например, в ОВ, скрученных по пространственной спирали в охлажденном состоянии в сердечнике оптического кабеля. Диэлектрические, так называемые фотоупругие свойства изогнутых ОВ, описываются тензором диэлектрической проницаемости, элементы которого могут быть получены из выражений, зависящих от параметров, характеризующих форму спирали, и были определены в работе Т.В. Макарова [1].

В работе [4] проведен качественный анализ элементов тензора диэлектрической проницаемости скрученного по спирали анизотропного ОВ в зависимости от параметров, характеризующих форму спирали.

В работе [2] получены соотношения, определяющие хроматическую дисперсию ОВ с упорядоченной вращающейся микроструктурой стекла (УВМС) и проведен качественный анализ полученных выражений. Однако количественная оценка хроматической дисперсии в ОВ с УВМС в сравнении с аналогичным изотропным ОВ не производилась.

Целью данной статьи является исследование хроматической дисперсии в ОВ с УВМС для конкретного рецепта сердцевина и оболочки в четвертом окне прозрачности (ОП) (1,562...1,62) мкм, в котором параметры передачи исследованы в меньшей степени, чем в других ОП, и дана количественная оценка изменения дисперсии в ОВ с УВМС по сравнению с дисперсией изотропного ОВ.

Проведем расчеты хроматической дисперсии ОВ с УВМС, сердцевина которого выполнена из чистого кварца SiO<sub>2</sub>, а оболочка легирована тремя процентами окиси бора В<sub>2</sub>О<sub>3</sub>, хотя, как известно, в длинноволновой области спектра в качестве примеси к составу стекла для уменьшения поглощения используют обычный фтор. Однако представляется целесообразным исследовать дисперсию в длинноволновой области для стекла и оболочки, легированных не только фтором, но и окисью бора.

Полная хроматическая дисперсия ( $D_{n\lambda}$ ) ОВ с УВМС определяется соотношением [2]

$$D_{n\lambda} = (1 + D_m) D_n, \quad (1)$$

где 
$$D_m = \frac{\pi \cdot r_1}{p} (\sin \varphi + \cos \varphi) = D_m^0 + D_m^e, \quad (2)$$

$p$  – шаг спирали,

$r_1$  – радиус круглого пучка лучей (пятна) моды  $HE_{11}$  в изотропном прямолинейном ОВ [5].

Индексы «е» и «0» в (2) относятся к необыкновенной и обыкновенной волнам соответственно.  $D_n$  – хроматическая дисперсия прямолинейного изотропного ОВ, определяется соотношением [6]:

$$D_n = \Delta\omega \frac{\partial^2}{\partial\omega^2} \left[ \frac{\beta_{10}}{\varepsilon(r)} \right], \quad (3)$$

где  $\beta_{10}$  – фазовый коэффициент низшей моды  $HE_{11}$  в ОВ,  
 $\varepsilon(r)$  – диэлектрическая проницаемость изотропного прямолинейного ОВ.

Таким образом, из соотношения (1) следует, что полная хроматическая дисперсия в ОВ с УВМС отличается от хроматической дисперсии прямого линейного изотропного ОВ на величину прибавки  $\Delta D$ , равную

$$\Delta D = D_m \cdot D_n. \quad (4)$$

Удельная хроматическая дисперсия прямолинейного изотропного ОВ  $D_n$  представляет сумму удельных материальной  $D_m$  и волноводной  $D_{вв}$  дисперсии [3]:

$$D_n = D_m + D_{вв} = \frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n}{d\lambda^2} + \frac{N\Delta}{\lambda c} \cdot v \cdot \frac{d^2(vb)}{dv^2}, \quad (5)$$

где  $n$  и  $N$  – показатель преломления и групповой показатель преломления соответственно стекла сердцевинки либо оболочки;  $\Delta$  – относительная разность показателей преломления сердцевинки и оболочки,  $\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$ ;  $\lambda$  – рабочая длина волны;  $c$  – скорость света;  $v$  – нормированная частота;  $b$  –

нормированный (приведенный) коэффициент фазы.

В соотношении (5) первое слагаемое представляет удельную материальную дисперсию  $M$ , а второе – удельную волноводную дисперсию  $W$ . Развита методика упрощенного расчета волноводной дисперсии  $W$ , в соответствии с которой она представляется в виде произведения

$$W = K\Phi, \quad (6)$$

где коэффициент  $K$  определяется по графикам для различных значений  $\Delta$  и  $\lambda$  стекловолокна, состоящего из чистого кварца. Для этого построены графики зависимостей  $K(\Delta, \lambda)$ . Коэффициент  $\Phi$  определяется по графикам, приведенным в известной литературе [3].

Для других рецептов ОВ, содержащих легирующие добавки, определены поправочные коэффициенты.

Для определения хроматической дисперсии прямолинейного изотропного ОВ необходимо в первую очередь определить показатели преломления  $n$  и  $N$ . Произведен расчет показателей преломления сердцевинки и оболочки в диапазоне длин волн, соответствующих четвертому окну прозрачности. Результаты расчета приведены на графиках рис. 1.

По определенным выше значениям показателей преломления сердцевинки и оболочки ОВ произведен расчет удельной материальной дисперсии сердцевинки  $D_{мс}$  и оболочки  $D_{моб}$ . Графики спектральной зависимости удельной материальной дисперсии приведены на рис. 2.

Из расчета следует, что удельные материальные дисперсии сердцевинки и оболочки отрицательны и изменяются соответственно в пределах от  $-26,25$  до  $-26,69$  пс/км·нм на длине волны  $1,565$  мкм, до  $-26,91$  пс/км·нм и  $-27,35$  пс/км·нм на длине волны  $1,62$  мкм.

Использованием второго слагаемого соотношения (5), определяющего удельную волноводную дисперсию прямолинейного изотропного ОВ, был произведен расчет этой дисперсии  $D_{вс}$  сердцевинки в указанном диапазоне длины волны. При этом второй сомножитель, в выражении для расчета  $D_{вс}$  определялся по графику [3, рис. 10.8] для ступенчатого профиля показателя преломления.

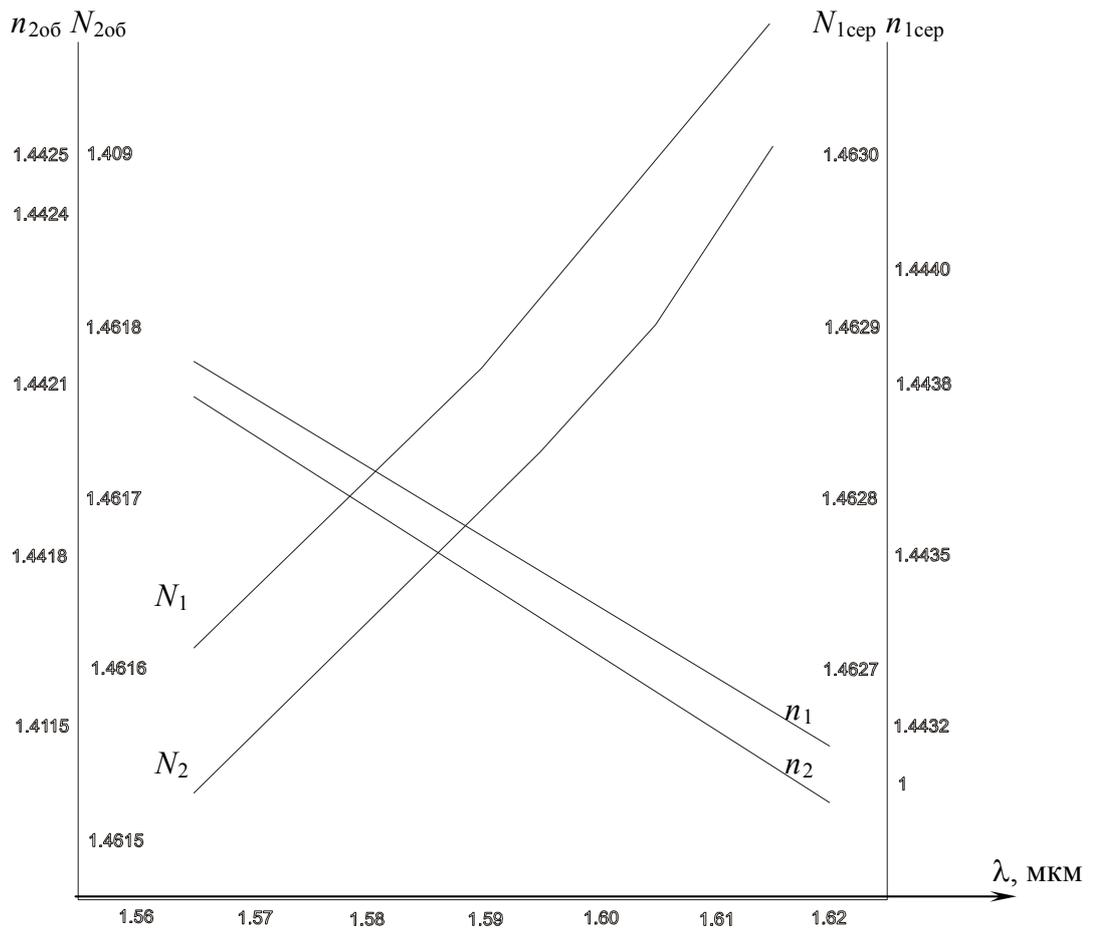


Рисунок 1 – Спектральная зависимость  $n, N$  сердцевины и оболочки

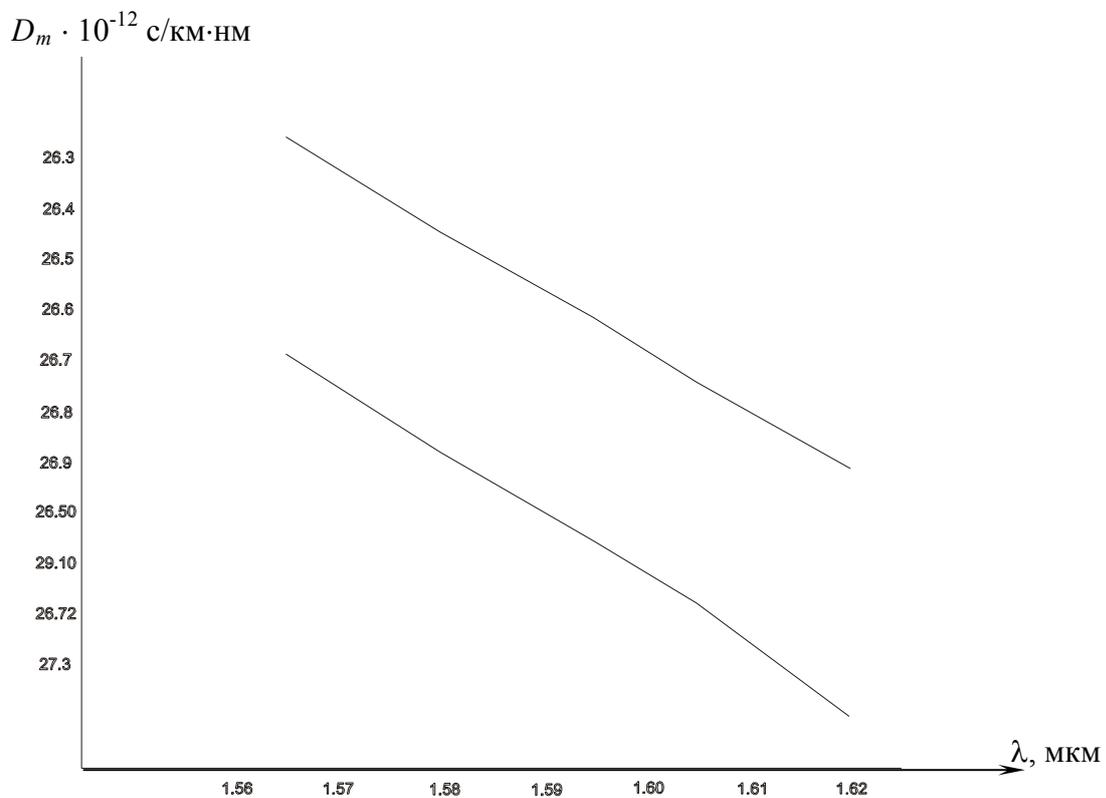


Рисунок 2 – Спектральная зависимость удельной материальной дисперсии сердцевины и оболочки

График зависимости удельной волноводной дисперсии сердцевины от длины волны приведен на рис. 3.

Из графика видно, что с ростом длины волны удельная волноводная дисперсия уменьшается от 3,83 до 3,75 пс/км·нм в исследуемом диапазоне длин волн 1,565 и 1,62 мкм соответственно.

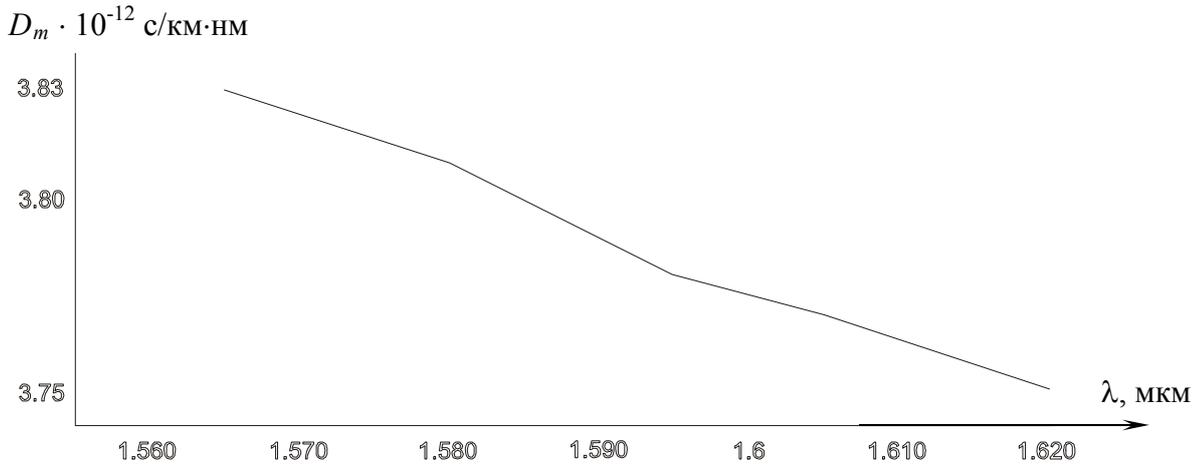


Рисунок 3 – Спектральная зависимость удельной волноводной дисперсии прямолинейного изотропного световода

Удельная хроматическая дисперсия прямолинейного изотропного ОВ  $D_n$ , в диапазоне длин волн 1,565...1,62 мкм, представляющая сумму материальной ( $D_m$ ) и волноводной ( $D_{wg}$ ) дисперсии, представлена на графике рис. 4.

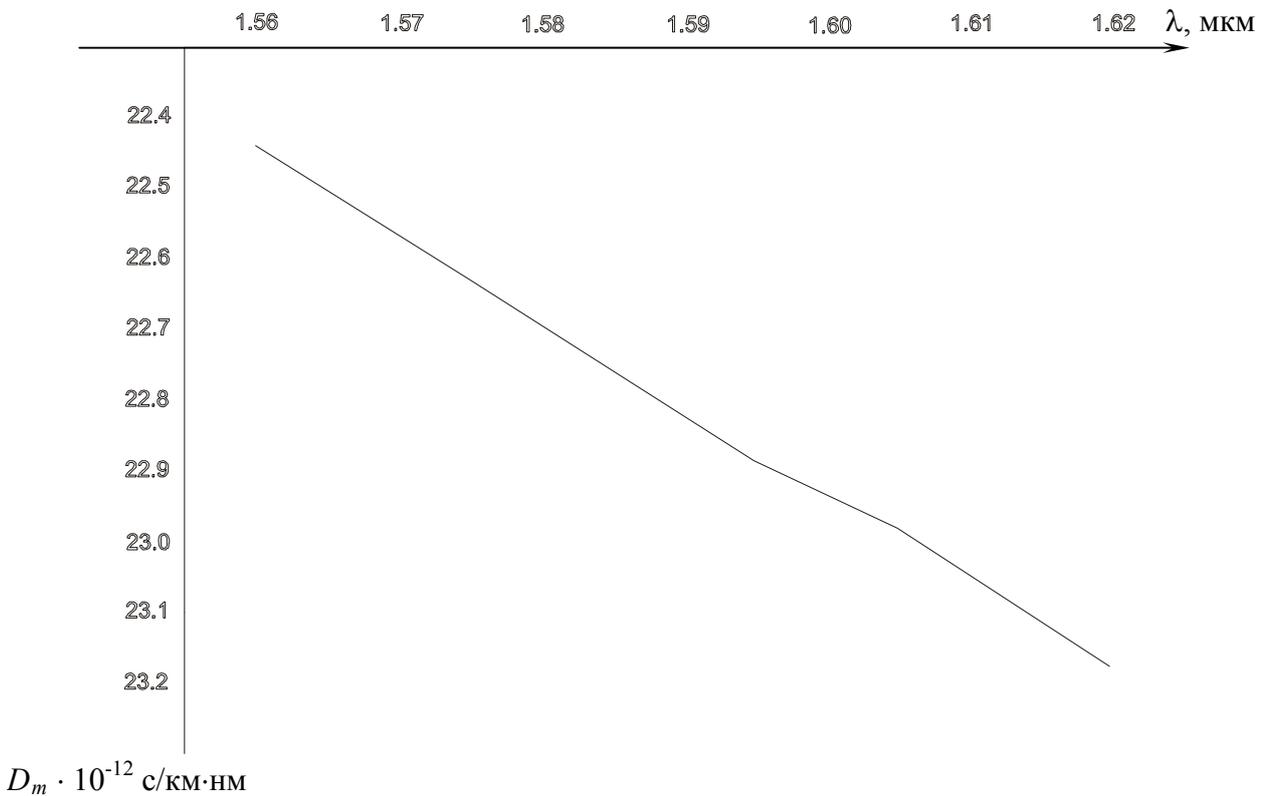


Рисунок 4 – Спектральная зависимость удельной хроматической дисперсии прямолинейного изотропного ОВ

Как видно из рисунка, величина удельной хроматической дисперсии прямолинейного изогнутого световода изменяется от -22,4 пс/км·нм на длине волны 1,565 мкм до -23,17 пс/км·нм на длине волны 1,62 мкм.

Для определения прибавки к дисперсии  $\Delta D$  прямолинейного изогнутого световода, обусловленной упорядоченностью микроструктуры в ОВ с УВМС, произведен расчет параметра  $D_m$ , а также определена сама прибавка  $\Delta D$  в диапазоне изменения азимутальной координаты  $\varphi$  от 0 до 360°. При этом радиус  $r_1$  принят равным 3 мкм, а шаг спирали  $p_1$  – 50 мм.

Результаты расчета  $D_m$  и  $\Delta D$  приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Азимутальная зависимость  $D_m$  и  $\Delta D$

$\varphi$ , град	$D_m$ пс/км·нм	$\Delta D_1 \cdot 10^{-4}$ , пс/км·нм
0	1,885	42,25
15	2,308	52,72
30	2,595	59,27
45	2,665	60,87
60	2,595	59,27
75	2,308	52,715
90	1,885	42,25
105	1,333	30,46
120	0,87	19,87
135	0	0
150	-0,87	-19,87
165	-1,333	-30,46
180	-1,885	-42,25
195	-2,308	-52,72
210	-2,595	-59,27
225	-2,665	-60,87
240	-2,595	-59,27
255	-2,308	-52,72
270	-1,885	-42,25
285	-1,333	-30,46
300	-0,87	-19,87
315	0	0
330	0,87	19,87
345	1,333	30,46
360	1,885	42,25

При расчете  $\Delta D$  величина  $D_n$  принята равной хроматической дисперсии прямолинейного изотропного световода на средней длине волны четвертого окна прозрачности 1,595 мкм и составила -22,84 пс/км·нм.

График амплитудной зависимости  $\Delta D$  приведен на рис. 5.

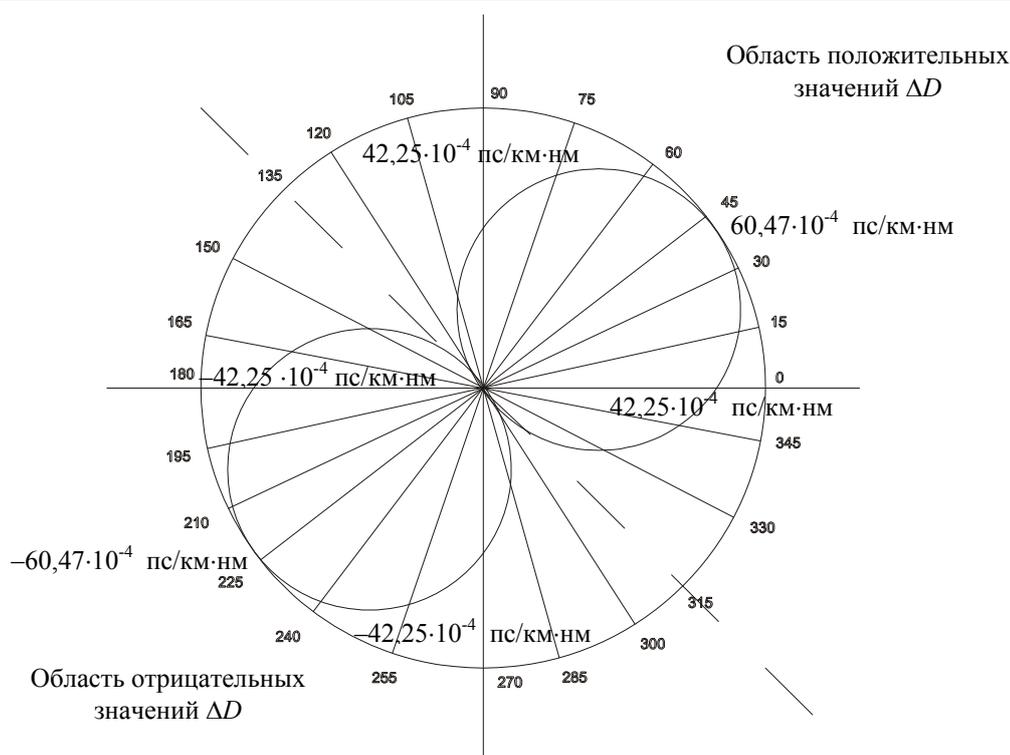


Рисунок 5 – Амплитудная зависимость  $\Delta D$

Из рис. 5 видно, что в диапазонах изменения  $\varphi$   $0...135^\circ$  и  $315...360^\circ$  значения прибавки  $\Delta D_1$  положительны, а в остальном диапазоне изменений угла  $\varphi$  прибавка к дисперсии прямолинейного изотропного волокна отрицательна.

Для определения прибавки к дисперсии  $\Delta D_x$  при других значениях параметров  $r_x$  и  $p_x$ , отличных от принятых в данном расчете  $r_1$  и  $p_1$ , необходимо полученное здесь значение  $D_1$  умножить на сомножитель  $r_1/r_x \cdot p_1/p_x$ .

В заключение можно сказать следующее. Исследование хроматической дисперсии ОВ с УМВС в четвертом окне прозрачности показало, что хроматическая дисперсия такого волокна по сравнению с дисперсией изотропного ОВ изменяется на величину, составляющую десятые доли процента. Однако изменение хроматической дисперсии в данном случае весьма существенно зависит от азимутальной координаты точки наблюдения. Такую характерную азимутальную зависимость хроматической дисперсии в ОВ с УМВС по сравнению с изотропными можно использовать для создания компенсаторов поляризованной дисперсии в одномодовых ОВ, которые применяются в когерентных ВОСП.

Результаты изложенного исследования могут быть использованы при конструкторской разработке оптических кабелей, для создания на основе УМВВ компенсаторов хроматической дисперсии, а также в учебном процессе при выполнении студентами дипломных работ и индивидуальных заданий по курсу «Линии передачи» на кафедре ВОЛС.

### Литература

1. Макаров Т.В. Анизотропия изогнутых волоконных световодов // Труды УНИИРТ. – Одесса, 1996. – Вып.1. – С. 108-106.
2. Макаров Т.В. Волоконный световод с упорядоченной вращающейся микроструктурой стекла // Праці УНДІРТ. Одеса, – 1999. – № 2. – С. 50-54.
3. Корнейчук В.И., Макаров Т.В., Панфилов И.П. Оптические системы передачи. – К.: Техника, 1994. – 388 с.
4. Одинцов Н.Н., Заяц А.П., Орешков В.И. Исследование диэлектрической проницаемости изогнутых по спирали оптических волокон // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. Одеса. – 2001. – Вип.3. – С. 21-23.
5. Снайдер А. Лав Дж. Теория оптических волноводов. – М.: Радио и связь, 1987 – 656 с.
6. Адамс М. Введение в теорию оптических волноводов; Пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 512 с.