

Султанова Л.Ф., Салихов А.И., Виноградова И.Л., Грахова Е.П.,
Абдрахманова Г.И., Султанов А.Х.

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический
университет»

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЯ ПРОФИЛЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА

Аннотация: в статье рассмотрен метод измерения профиля показателя преломления оптического волокна и приведены результаты вычислительного эксперимента, подтверждающие работоспособность разработанной методики.

Ключевые слова: показатель преломления, профиль показателя преломления, метод построения профиля показателя преломления

Ввиду широкого применения волоконно-оптических линий связи особое внимание следует уделять измерениям их основных характеристик. Профиль показателя преломления является одним из основных параметров, характеризующих оптическое волокно, и требует более совершенных методик измерения. От этого параметра зависят многие характеристики оптического волокна, влияющие на распространение сигналов в ВОЛС. Поэтому разработка более совершенных методов измерения ППП является актуальной.

Анализируя существующие методы построения ППП, такие как, метод ближней зоны, метод сканирования отражения от торца, метод рефракции и интерферометрические методы можно сделать вывод о том, что ни один из них не рассчитан на измерения ППП в объеме трехмерной структуры. Поэтому наиболее перспективным является метод бокового сканирования, который основан на направлении сканирующего луча сбоку, что позволяет делать трехмерный анализ исследуемых структур. В процессе выполнения

измерений исследуемые образцы погружаются в иммерсионную жидкость с показателем преломления $n_{\text{ф}}$. При этом известной величиной является: входная координата y бокового сканирующего луча и радиус оболочки образца; а измеряемой – угол отклонения луча $\sigma(y)$ при выходе из волокна. Срез ступенчатого оптического волокна с ходом бокового сканирующего луча в нем с обозначением известных и измеряемых величин представлен на рисунке 1. Задача заключается в выводе зависимости профиля показателя преломления n от функции выходного угла $\sigma(y)$ бокового сканирующего луча, т.е. в нахождении функции $f(\sigma(y))$, удовлетворяющей равенству (1):

$$f(\sigma(y)) = n \quad (1)$$

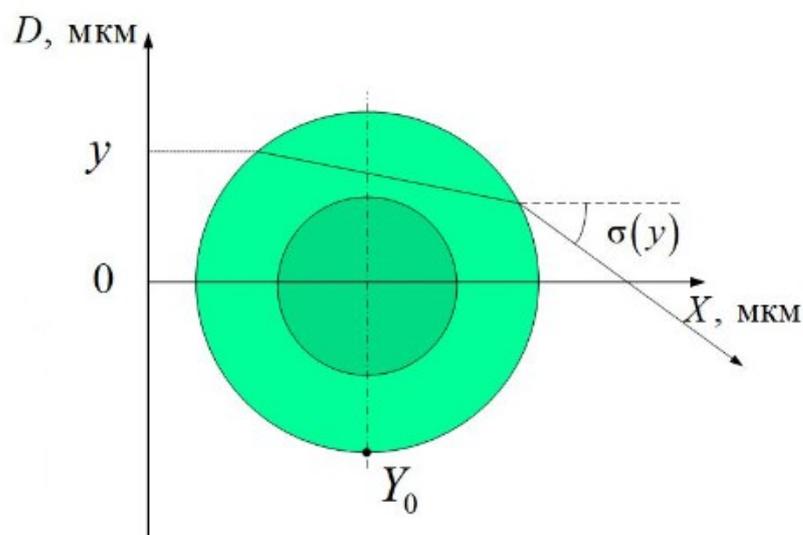


Рисунок 1 – Ход бокового сканирующего луча в ступенчатом волокне

Разработка математического аппарата расчета ППП началась с простой модели ступенчатого волокна, представленного на рисунке 2. При этом для вывода математического аппарата рассматривался идеализированный случай, когда сканирующий луч представлен в виде бесконечно тонкой линии. Анализируя ход лучей в волокне, по законам геометрической оптики

получены функции $\varepsilon_0(y)$ и $\varepsilon_1(y)$ зависимости выходного угла бокового сканирующего луча от входной координаты для соответствующих случаев, когда излучение проходит только через оболочку, затем через оболочку с сердцевинной образца при уменьшении входной координаты. Функции $\varepsilon_0(y)$ и $\varepsilon_1(y)$ записаны в виде формул 2 и 3 соответственно:

$$\varepsilon_0(y) = 2 \cdot \arcsin\left(\frac{y}{Y_0}\right) - 2 \cdot \arcsin\left(\frac{y \cdot n_{\text{сп}}}{Y_0 \cdot n_0}\right), \quad (2)$$

$$\varepsilon_1(y) = 2 \cdot \arcsin\left(\frac{y}{Y_0}\right) - 2 \cdot \arcsin\left(\frac{y \cdot n_{\text{сп}}}{Y_0 \cdot n_0}\right) + 2 \cdot \arcsin\left(\frac{y \cdot n_{\text{сп}}}{Y_1 \cdot n_0}\right) - 2 \cdot \arcsin\left(\frac{y \cdot n_{\text{сп}}}{Y_1 \cdot n_1}\right), \quad (3)$$

где Y_1 – радиус сердцевинной ступенчатого волокна, который вычисляется по формуле 4:

$$Y_1 = \frac{y_1 \cdot n_{\text{сп.}}}{n_0}. \quad (4)$$

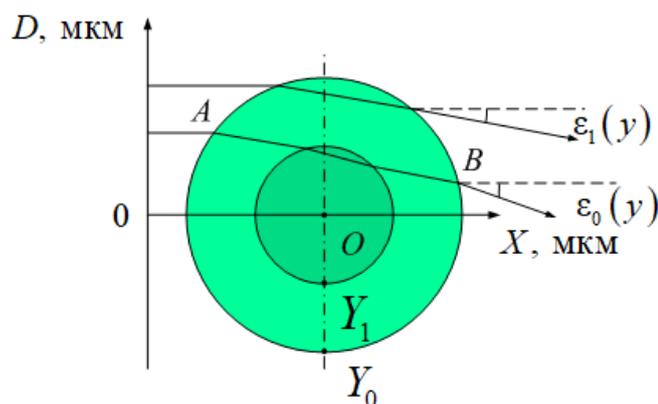


Рисунок 2 – Ход боковых сканирующих лучей в ступенчатом волокне

Далее, система усложнилась и было рассмотрено оптическое волокно, изображенное на рисунке 3, сердцевина которого разделена на три концентрических слоя с различными, но постоянными значениями показателя преломления в каждом из них. Анализируя ход лучей в такой

системе получено выражение 5 зависимости выходного угла от входной координаты, для случая, когда луч проходит через каждый concentрический слой:

$$\begin{aligned} \sigma_3(y) = & 2 \cdot \arcsin\left(\frac{y}{Y_0}\right) - 2 \cdot \arcsin\left(\frac{y \cdot n_{\text{cp.}}}{Y_0 \cdot n_0}\right) + 2 \cdot \arcsin\left(\frac{y \cdot n_{\text{cp.}}}{Y_1 \cdot n_0}\right) - \\ & - 2 \cdot \arcsin\left(\frac{y \cdot n_{\text{cp.}}}{Y_1 \cdot n_1}\right) + 2 \cdot \arcsin\left(\frac{y \cdot n_{\text{cp.}}}{Y_2 \cdot n_1}\right) - 2 \cdot \arcsin\left(\frac{y \cdot n_{\text{cp.}}}{Y_2 \cdot n_2}\right) + \\ & + 2 \cdot \arcsin\left(\frac{y \cdot n_{\text{cp.}}}{Y_3 \cdot n_2}\right) - 2 \cdot \arcsin\left(\frac{y \cdot n_{\text{cp.}}}{Y_3 \cdot n_3}\right), \end{aligned} \quad (5)$$

где n_0, n_1, n_2, n_3 – показатели преломления соответствующих слоев (нумерация слоев начинается с граничного);

Y_0, Y_1, Y_2, Y_3 – радиусы соответствующих слоев (нумерация радиусов слоев начинается с граничного).

Радиусы слоев рассчитываются по формулам 4, 6, 7. Выражения 6,7:

$$Y_2 = \frac{y_2 \cdot n_{\text{cp.}}}{n_1}, \quad (6)$$

$$Y_3 = \frac{y_3 \cdot n_{\text{cp.}}}{n_2}. \quad (7)$$

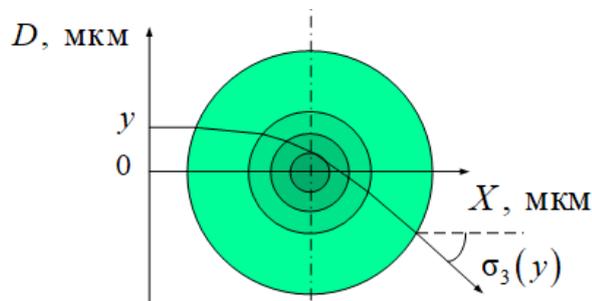


Рисунок 3 – Срез волокна, сердцевина которого разделена на три concentрических слоя, с траекторией сканирующего луча в нем

Затем, было исследовано волокно, разделенное на 10 концентрических слоев и выведена функция выходного угла луча, проходящего через каждый слой образца. Срез волокна, разделенного на 10 концентрических слоев, с ходом бокового сканирующего луча в нем представлен на рисунке 4. Функция выходного угла записывается в виде выражения 8:

$$\begin{aligned} \sigma_{10}(y) = & 2 \cdot \arcsin\left(\frac{y}{Y_0}\right) - 2 \cdot \arcsin\left(\frac{y \cdot n_{cp.}}{Y_0 \cdot n_0}\right) + \dots \\ & + 2 \cdot \arcsin\left(\frac{y}{Y_{10} \cdot n_5}\right) - 2 \cdot \arcsin\left(\frac{y \cdot n_{cp.}}{Y_{10} \cdot n_{10}}\right). \end{aligned} \quad (8)$$

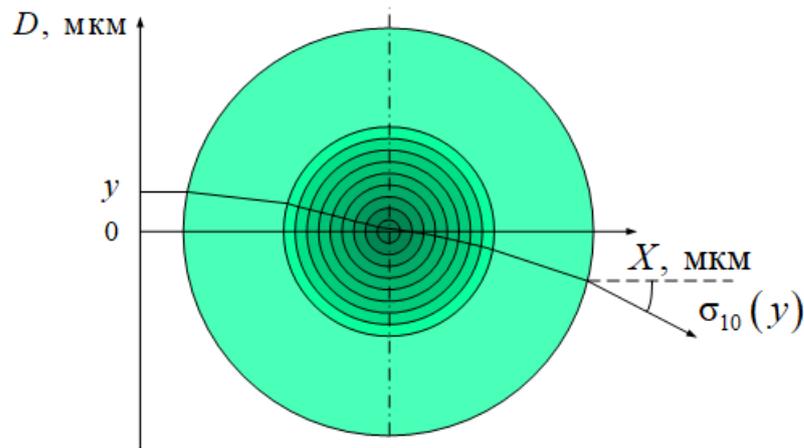


Рисунок 4 – Срез волокна, разделенного на 10 концентрических слоев, с ходом бокового сканирующего луча в нем

Проанализировав закономерности между данными выражениями, выведена общая аналитическая формула 9 последовательного расчета показателя преломления каждого слоя оптического волокна, начиная с примыкающего к границе:

$$n_k(y) = \frac{y \cdot n_{cp.}}{Y_k \sin\left(\arcsin\left(\frac{y}{Y_0}\right) - \arcsin\left(\frac{y \cdot n_{cp.}}{Y_0 \cdot n_0}\right) - \frac{\sigma_k(y)}{2} + Q_k\right)}, \quad (9)$$

где Q_k – коэффициент, рассчитываемый по выражению 10:

$$Q_k = \arcsin\left(\frac{y \cdot n_{\text{сп.}}}{Y_k \cdot n_{k-1}}\right) + \sum_2^{k-1} \left(\arcsin\left(\frac{y \cdot n_{\text{сп.}}}{Y_{k-1} \cdot n_{k-2}}\right) - \arcsin\left(\frac{y \cdot n_{\text{сп.}}}{Y_{k-1} \cdot n_{k-1}}\right) \right); \quad (10)$$

Y_k – радиус слоя k , вычисляемый по формуле 11:

$$Y_k = \frac{y_k \cdot n_{\text{сп.}}}{n_{k-1}}. \quad (11)$$

где y_k – граничная входная координата луча, проходящего по касательной к слою k .

Для применения выведенной формулы необходимо использовать граничные входные координаты луча y_k перед возникновением скачков на графике функции выходного угла, которые отчетливо заметны для ступенчатого волокна. График функции выходного угла для ступенчатого волокна изображен на рисунке 5. Когда количество слоев в волокне увеличивается до десяти и более график выходного угла превращается в сплошную линию и моменты переходов глазами обнаружить сложно, поэтому для этих ситуаций применяется метод корреляционного анализа. Корреляционный анализ применяется к диапазону значений функции измеренного выходного угла и к рассчитанному диапазону величин функции выходного угла при том предположении, что волокно имеет постоянный показатель преломления, равный показателю преломления в граничном слое образца. График функции выходного угла для волокна, разделенного на 10 слоев, представлен на рисунке 6, а соответствующий ему график корреляционной функции, по которому легко определяются размеры переходных слоев изображен на рисунке 7.

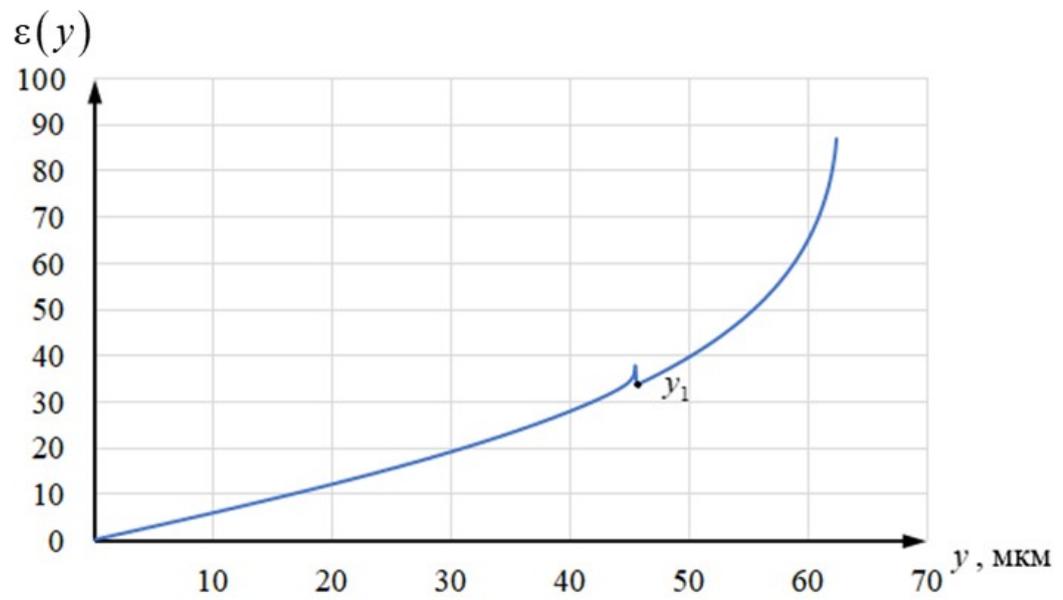


Рисунок 5 – График функции выходного угла для ступенчатого волокна

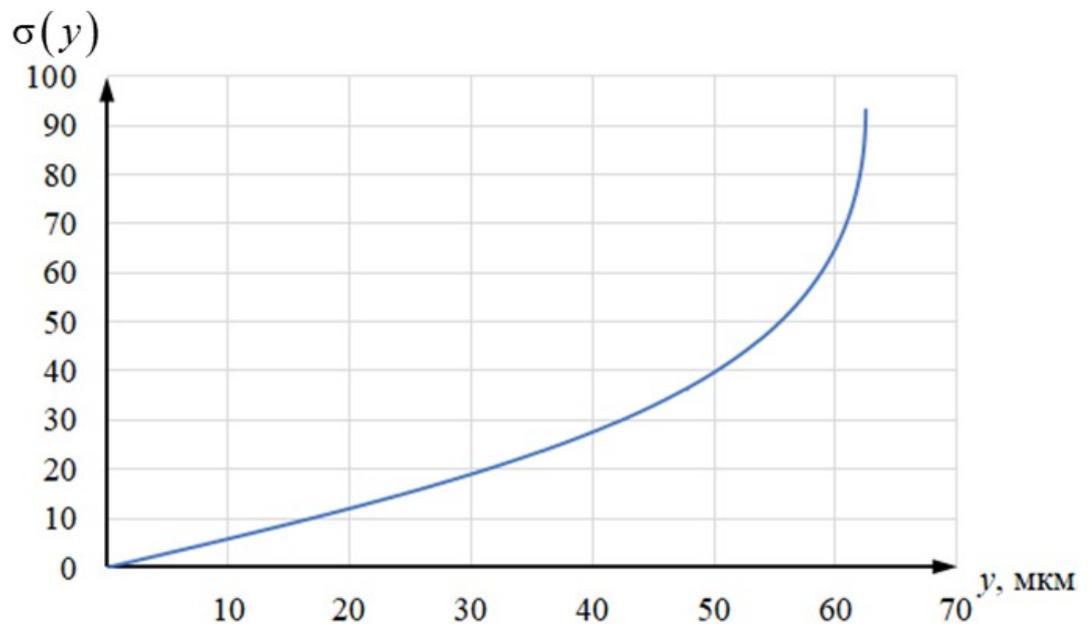


Рисунок 6 – График функции выходного угла для волокна, разделенного на 10 слоев

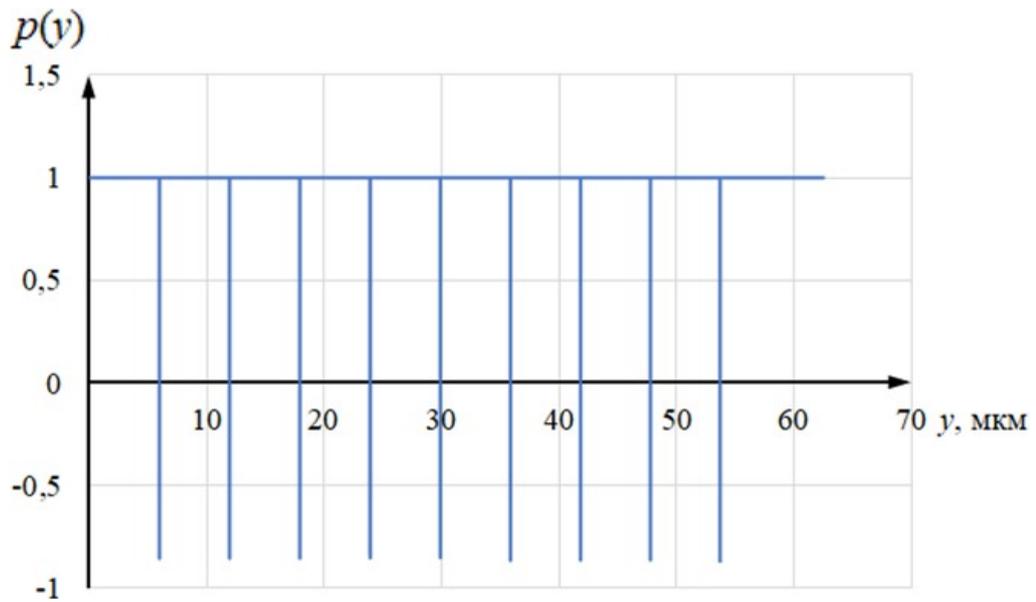


Рисунок 7 – График корреляционной функции для волокна, разделенного на 10 слоев

Для проверки работоспособности разработанного математического аппарата проведен вычислительный эксперимент, исходными данными для которого служит профиль показателя преломления градиентного оптического волокна, который показан на рисунке 8.

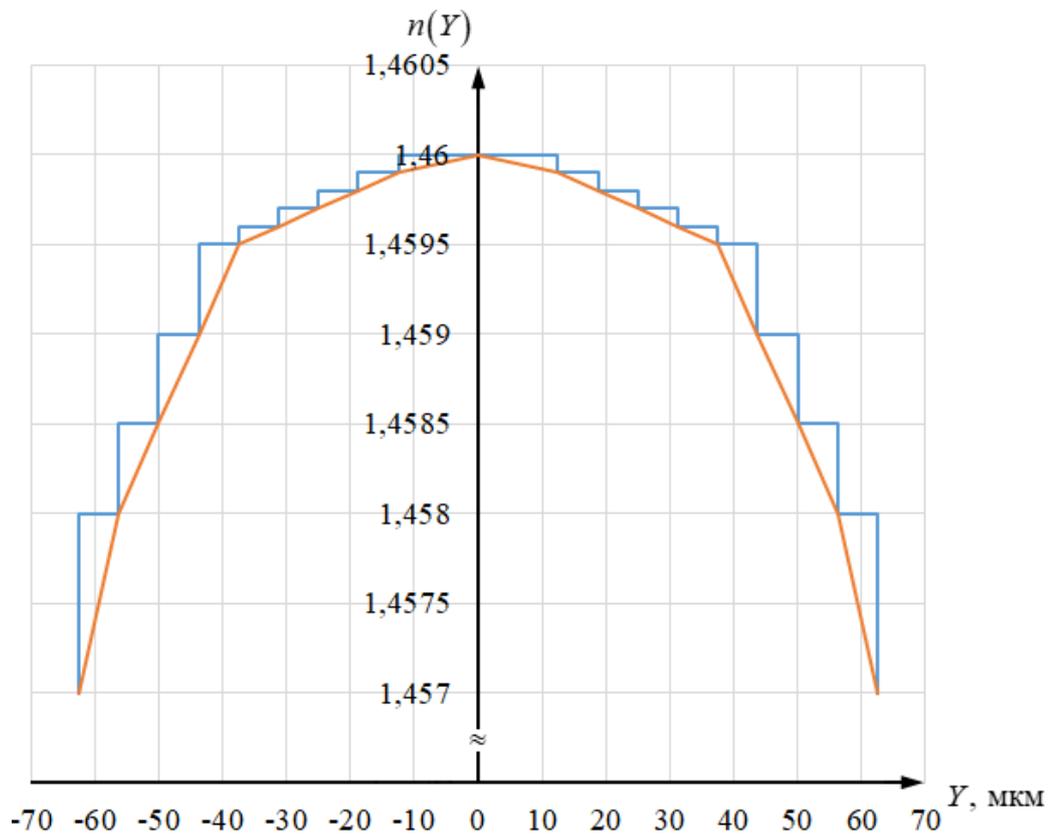


Рисунок 8 – Исходный ППП градиентного оптического волокна

Применяя математический аппарат, строится (измеренный) график функции выходного угла, изображенный на рисунке 9.

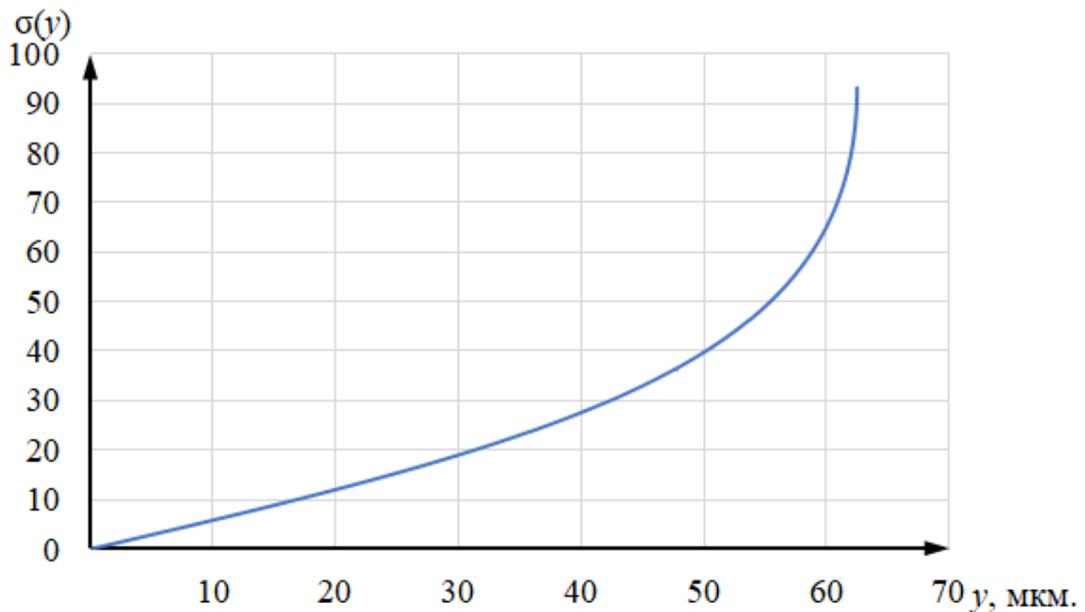


Рисунок 9 – График функции выходного угла исходного градиентного оптического волокна

Затем, предполагается то, что известен только измеренный график функции выходного угла и радиус оболочки образца. Используя выведенную формулу и значение выходного угла при максимально близком расположении луча к границе образца вычисляется показатель преломления граничного слоя, необходимый для построения графика корреляционной функции. График корреляционной функции представлен на рисунке 10.

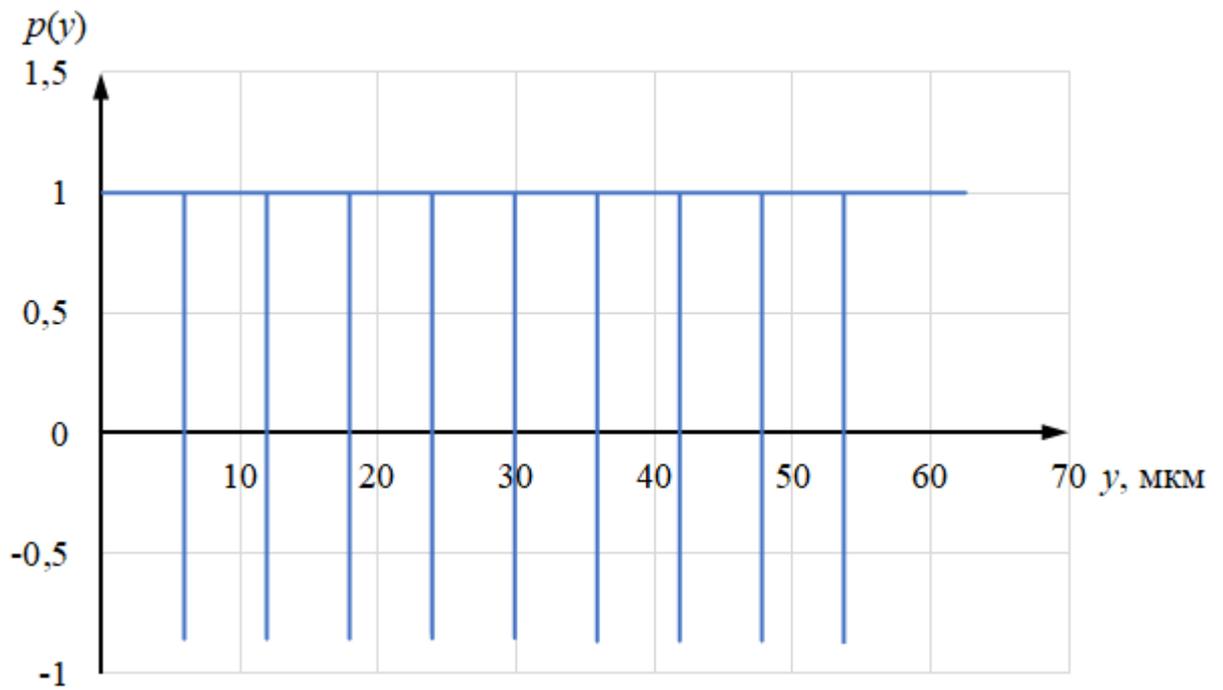


Рисунок 10 – График корреляционной функции градиентного оптического волокна

Обнаружив границы переходов луча, по разработанной методике строится профиль показателя преломления оптического волокна, который совпадает с исходным профилем. Построенный ППП градиентного оптического волокна изображен на рисунке 11.

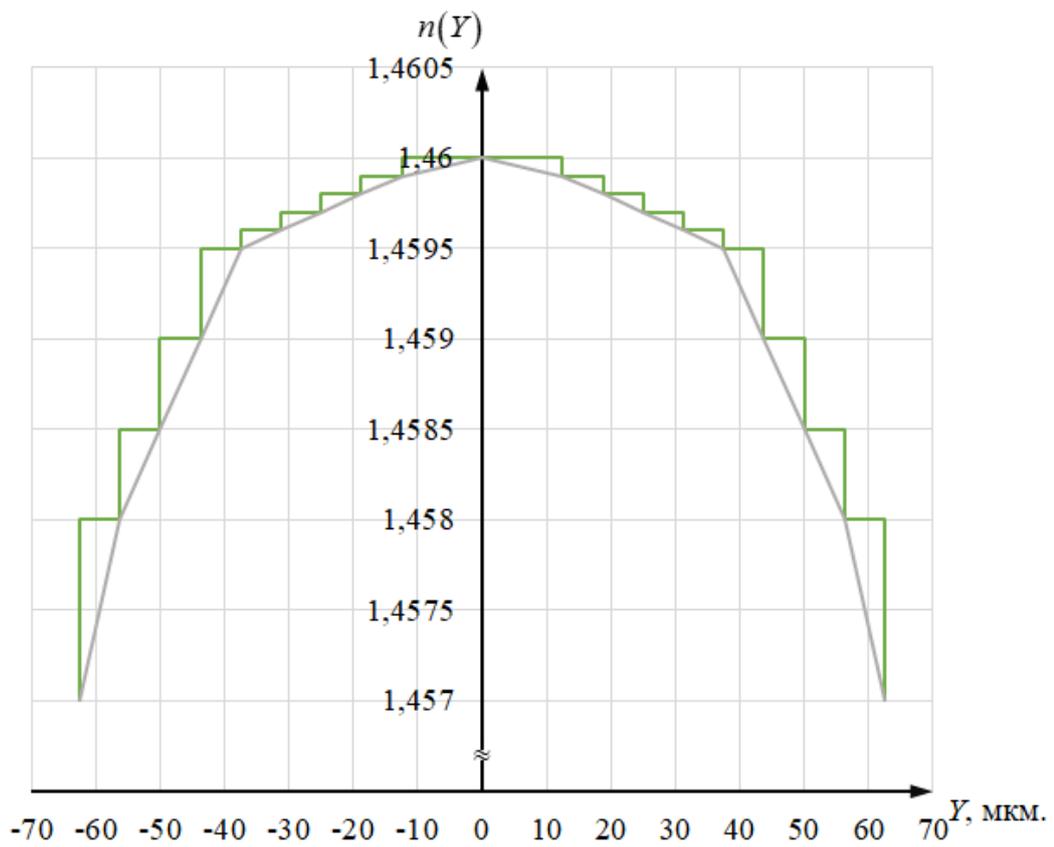


Рисунок 11 – Построенный ППП градиентного оптического волокна

Затем, рассматривается оптическое волокно с провалом профиля в сердцевине. Исходный профиль показан на рисунке 12.

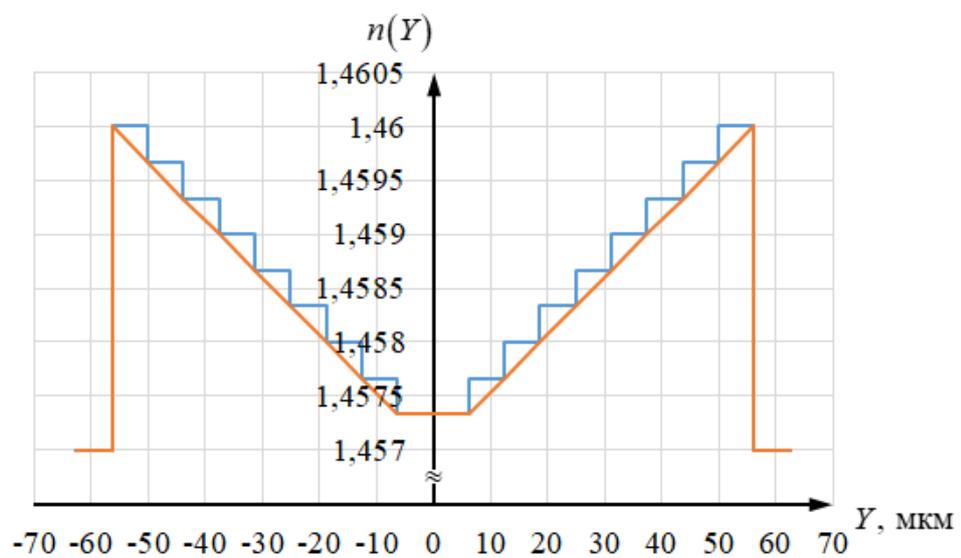


Рисунок 12 – Исходный ППП волокна с провалом профиля в сердцевине

Аналогично строится график функции выходного угла с малозаметными скачками и предполагается то, что известен только измеренный угол со входной координатой бокового сканирующего луча. График функции выходного угла для волокна с провалом профиля в сердцевине изображен на рисунке 13.

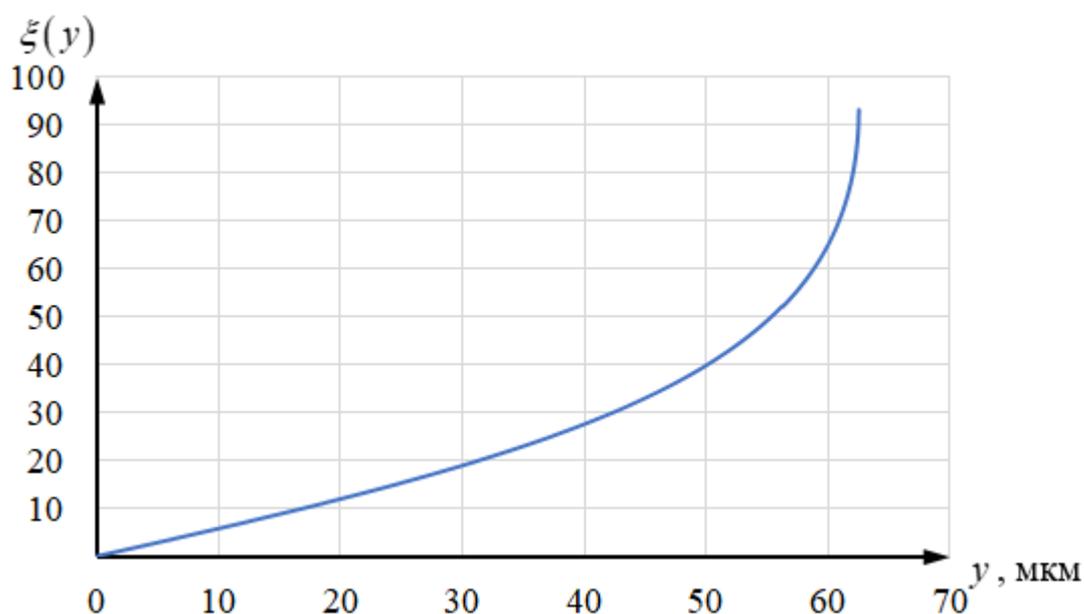


Рисунок 13 – График функции выходного угла для волокна с провалом профиля в сердцевине

Далее, применяется корреляционный анализ, по которому обнаруживаются граничные входные координаты луча перед возникновением скачков на графике выходного угла. Подставив значения граничных координат в формулу последовательного расчета ППП, рассчитывается ППП оптического волокна. Построенный график корреляционной функции и рассчитанный ППП заданного оптического волокна проиллюстрированы на рисунках 14 и 15 соответственно.

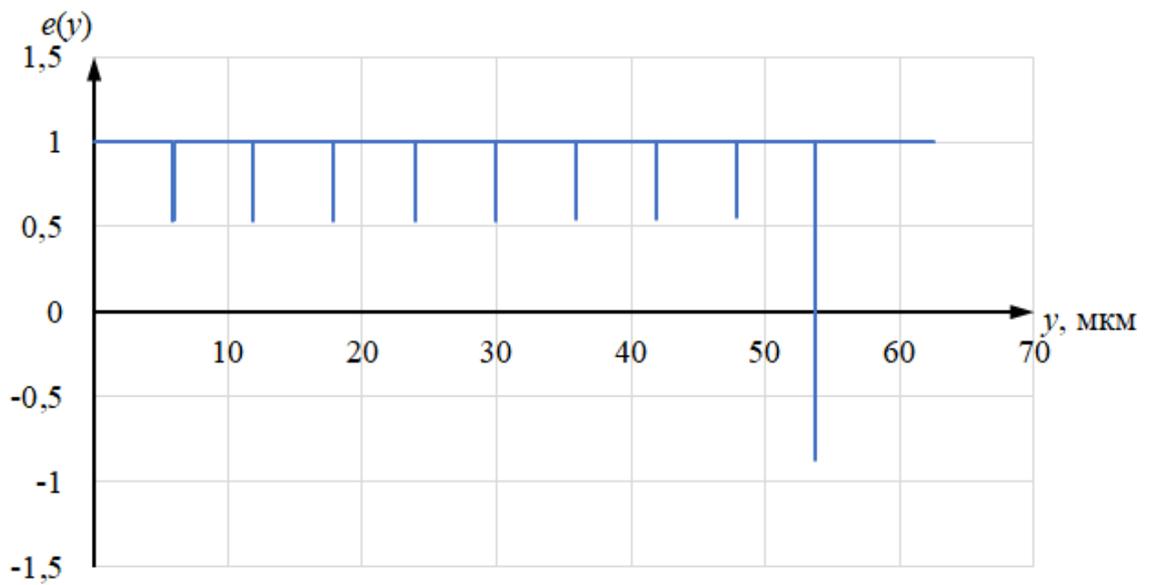


Рисунок 14 – График корреляционной функции для волокна с провалом профиля в сердцевине

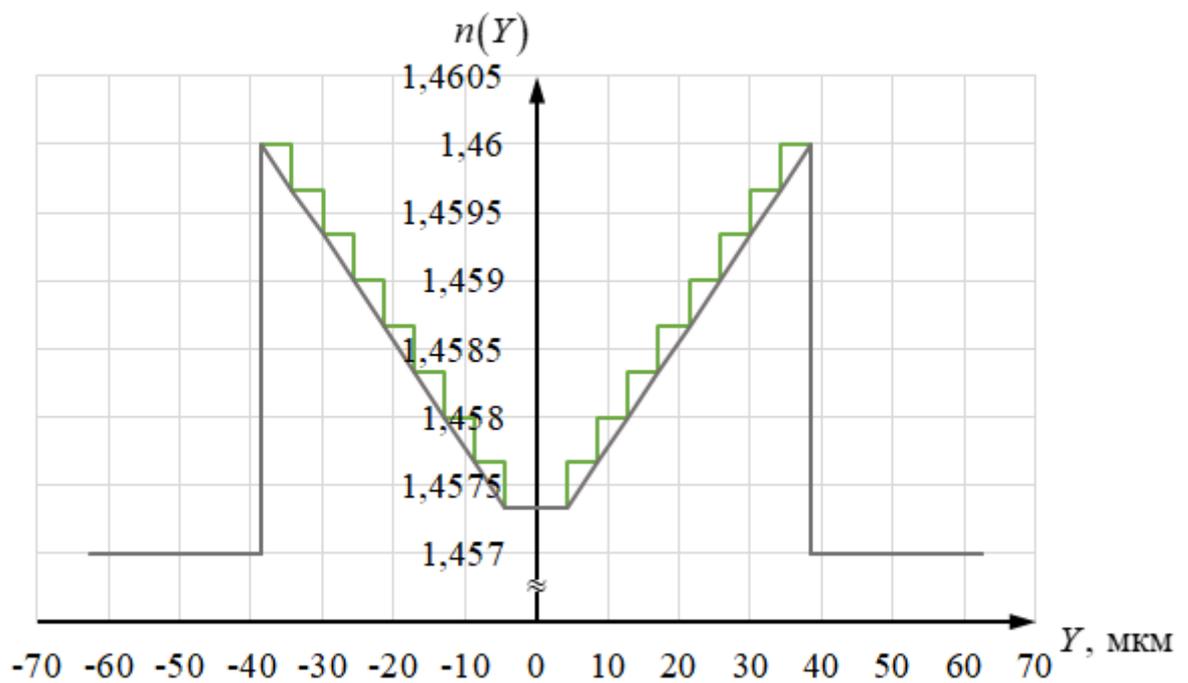


Рисунок 15 – Построенный с применением математического аппарата ППП оптического волокна с провалом профиля в сердцевине

На заключительном этапе вычислительный эксперимент проводится для одномодового волокна, профиль которого представлен на рисунке 16.

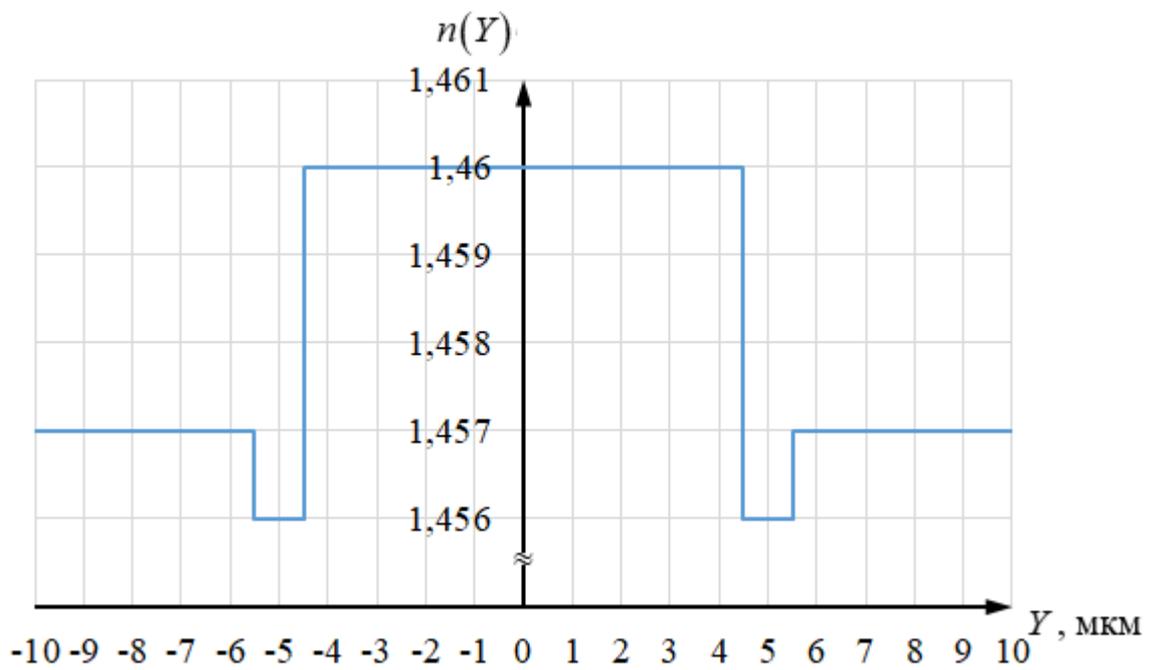


Рисунок 16 - Исходный ППП одномодового оптического волокна

По исходному профилю строится график функции выходного угла, изображенный на рисунке 17.

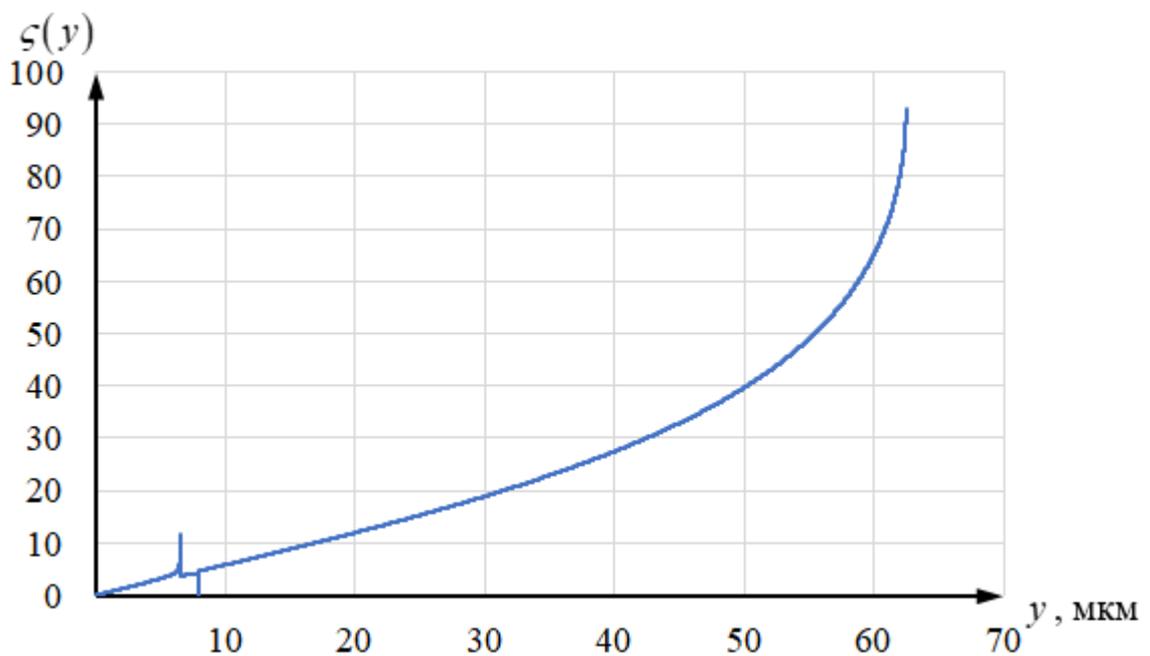


Рисунок 17 – График функции выходного угла одномодового оптического волокна

Затем, применяется корреляционный анализ и с использованием мат ап рассчитывается ППП оптического волокна, который совпадает с исходным профилем. График корреляционной функции и построенный ППП одномодового оптического волокна показаны на рисунках 18 и 19 соответственно.

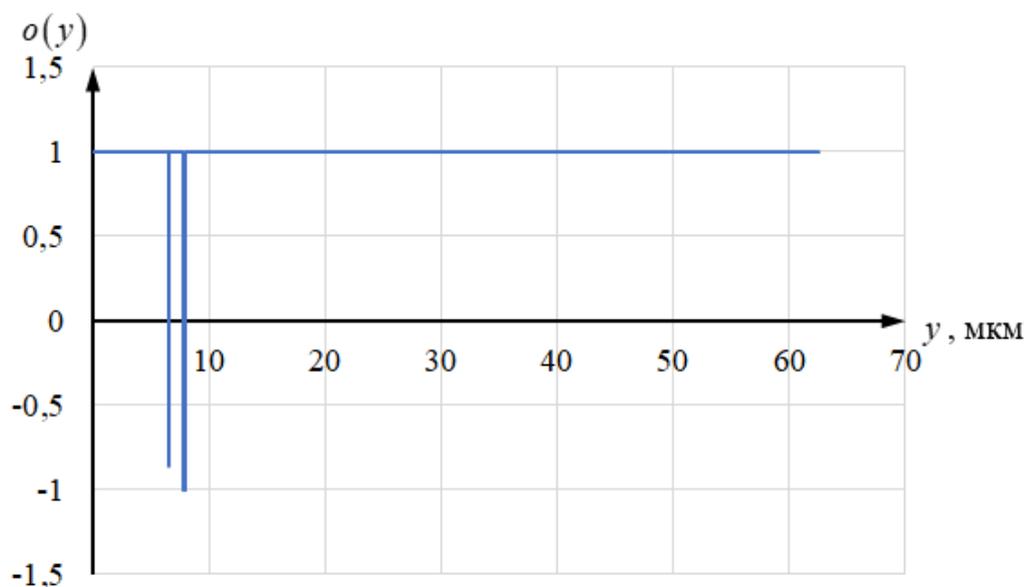


Рисунок 18 – График корреляционной функции одномодового оптического волокна

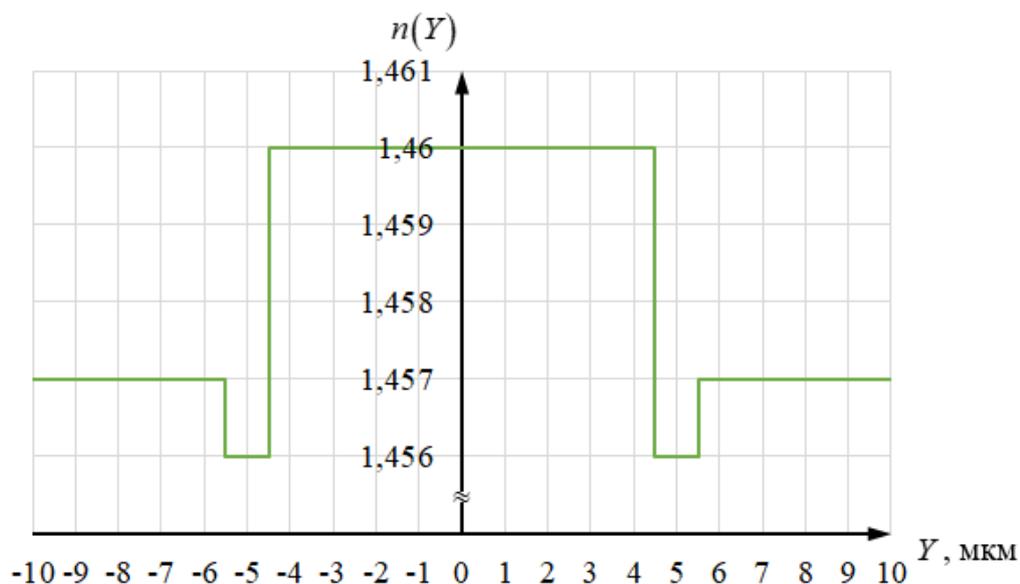


Рисунок 19 – Построенный с применением математического аппарата ППП одномодового оптического волокна

Результаты пересчета показали полное соответствие исходным характеристикам образцов, что подтверждает полную работоспособность разработанного математического аппарата для вычисления ППП из результатов измерений. Подробное описание вывода математического аппарата и результатов вычислительного эксперимента представлено в ВКР на тему «Разработка методики измерения профиля показателя преломления оптического волокна».

При выполнении расчетов предполагалось что сканирующий луч представляет собой бесконечно тонкую линию, но на практике размеры луча ограничены. Существует фундаментальный предел фокусировки, согласно которому луч не может быть сфокусирован на величину меньшую, чем размер длины волны. И чем меньше длина волны излучения, тем тоньше луч и нужно стремиться к тому, чтобы длину волны уменьшить. Когда начинается вопрос технологический, а именно реализации, тогда при измерениях ППП оптических волокон стандартных размеров (125 мкм) оптическим лучом, предел фокусировки которого, например, 850 мкм результаты расчетов получаются грубыми. Поэтому, так как луч не может быть бесконечно тонким, данную методику нельзя использовать для построения ППП оптических волокон, но можно применять для расчета ППП оптических заготовок, которые имеют большие размеры. Правильно созданная оптическая заготовка определяет большую вероятность изготовления из нее высококачественного оптического волокна. К тому же процесс измерения возможен только в лабораторных условиях, так как для уменьшения погрешности измерений необходимо соблюдать высокую температурную и вибрационную стабильность узкого высокоточного бокового сканирующего луча, проходящего только через исследуемое волокно.

Разработанный математический аппарат показал полную работоспособность по результатам вычислительного эксперимента. Предложенный математический аппарат отличается возможностью

последующего сканирования трехмерных структур тонким высокоточным стабильным оптическим лучом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Субботин Е.А. Методы и средства измерения параметров оптических телекоммуникационных систем. Учебное пособие для вузов. – М. Горячая линия-Телеком, 2013. – 224 с.

2. Нежданов А.В., Ершов А.В., Машин А.И. Определение профиля показателя преломления заготовок и изготовленных из них оптических волокон: Практикум. Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет им. Н.И. Лобачевского, 2020. – 26 с.