

DOI 10.23859/1994-0637-2020-6-99-4

УДК 53.082.53

© Харахнин К. А., Терешин Д. А.,
Вахрамеев Д. В., Вахрамеев П. С., 2020

Харахнин Константин Аркадьевич
Кандидат технических наук, доцент,
Череповецкий государственный университет
(Череповец, Россия)
E-mail: kakharakhnin@chsu.ru

Kharakhnin Konstantin Arkadevich
PhD in Technology, Associate Professor,
Cherepovets State University
(Cherepovets, Russia)
E-mail: kakharakhnin@chsu.ru

Терешин Денис Альбертович
Магистр,
Череповецкий государственный университет
(Череповец, Россия)
E-mail: xengedenis@yandex.ru

Tereshin Denis Albertovich
Master,
Cherepovets State University
(Cherepovets, Russia)
E-mail: xengedenis@yandex.ru

Вахрамеев Дмитрий Валерьевич
Магистрант,
Череповецкий государственный университет
(Череповец, Россия);
Инженер,
ЗАО «НПЦ «Наука-Сервис»»
(Москва, Россия)
E-mail: reader77@yandex.ru

Vakhrameev Dmitry Valerevich
Student in the master's programme,
Cherepovets State University
(Cherepovets, Russia);
Engineer,
ZAO NPTs "Nauka-servis"
(Moscow, Russia)
E-mail: reader77@yandex.ru

Вахрамеев Павел Сергеевич
Руководитель инжинирингового центра,
Череповецкий государственный университет
(Череповец, Россия)
<https://orcid.org/0000-0002-8226-0265>
E-mail: psvakhrameev@chsu.ru

Vakhrameev Pavel Sergeevich
Head of Engineering Center,
Cherepovets State University
(Cherepovets, Russia)
<https://orcid.org/0000-0002-8226-0265>
E-mail: psvakhrameev@chsu.ru

**ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК
УСИЛИЙ: МАТЕМАТИЧЕСКАЯ
МОДЕЛЬ, ФУНКЦИЯ
ПРЕОБРАЗОВАНИЯ, РАЗРАБОТКА
ПРОТОТИПА**

**FIBER-OPTIC FORCE SENSOR:
MATHEMATICAL MODEL,
CONVERSION FUNCTION,
PROTOTYPE DESIGN**

Аннотация. Статья посвящена проблеме отсутствия методов расчета и выбора конструктивных параметров при разработке и внедрении волоконно-оптического датчика усилий (ВОДУ) как отдельного элемента или компонента системы. Для решения этой проблемы предлагается разработать функцию преобразования потерь мощности оптического сигнала от радиуса изгиба волокна при действии прикладываемой силы, связывающей особенности оптического волокна с физико-механическими параметрами

Abstract. The article considers the problem of the lack of methods for calculating and selecting design parameters when developing and implementing a fiber-optic force sensor (FOFS) as a separate element or component of the system. To solve this problem, we propose to develop a transform function of the power loss of the optical signal from the bending radius of the fiber under the action of applied forces, linking the features of the optical fiber and physico-mechanical parameters of the base on which the fiber is located. Based on the

основания, на котором оно располагается. На основе выполненных расчетов предложен вариант конструкции прототипа ВОДУ.

Ключевые слова: функция преобразования, оптическое волокно, радиус изгиба волокна, макроизгиб, прогиб пластины, волоконно-оптический датчик усилий

calculations performed, a variant of the FOFS prototype design is proposed.

Keywords: conversion function, optical fiber, bending radius of the fiber, macrobending, deflection of the plate, fiber-optic force sensor

Введение

Отсутствие мониторинга состояния инфраструктурных объектов, таких как тросы, трубопроводы, мостовые и строительные конструкции, дамбы и т. д., приводит к различным авариям (нередко с тяжелыми последствиями и жертвами). По этой причине разработка устройств и систем для контроля состояния целостности объектов особого назначения является актуальной задачей в настоящее время. Решение указанной проблемы – использование волоконно-оптических датчиков, устанавливаемых на объекте мониторинга¹. Существующие решения имеют следующие недостатки: высокая стоимость чувствительного элемента датчика, его степень точности определения координаты внешнего силового воздействия на объект, конструктивная сложность при установке². Кроме того, компании, реализующие такие волоконные устройства, используют собственные, недоступные для широкого потребителя наработки, методы и алгоритмы при установке и настройке чувствительных элементов. Применяя эти датчики, необходимо учитывать тот факт, что волокно способно реагировать на события, только значительно деформируясь. Деформации оптического волокна относят к двум типам: на растяжение и на изгиб. Если деформации, связанные с растяжением волокна, уже достаточно хорошо изучены, и теоретические предположения подкрепляются практическими результатами³, то деформации, связанные с изгибом, исследованы мало, а они крайне важны. При конструировании различных систем, устройств, использующих оптическое волокно, возникают трудности по практическому согласованию изгибных особенностей волокна и тех материалов, с которыми оно устанавливается на объект, поскольку материалы должны удовлетворять оптимальным параметрам волокна как датчика, гарантирующим высокую надежность его работы и точность в определении координат силового воздействия на объект. В связи с этим целью данного исследования является разработка функции преобразования волоконно-оптического датчика усилий (далее – ВОДУ), а также его экспериментальное изучение и создание конструкции прототипа.

¹ Гончаренко И. А., Рябцев В. Н. Датчики контроля состояния инженерных и строительных конструкций на основе оптических волноводных структур // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2013. – № 2 (18). – С. 118–132.

² Яцеев В. А. Волоконно-оптическая система охранной сигнализации. № 2003111994/09. Патент РФ № 2311687. МПК G08B13/186; заявл. 24.04.2003; опубл. 27.11.2007.

³ Мильков А. В., Романов К. И., Букетин Б. В. Экспериментальное исследование кратковременной и длительной прочности оптического волокна и расчет его надежности. – URL: <https://docplayer.ru/40083053-Eksperimentalnoe-issledovanie-kratkovremennoy-i-dlitelnoy-prochnosti-opticheskogo-voлокna-i-raschet-ego-nadezhnosti.html> (дата обращения: 12.05.2020).

Основная часть

Теоретическая часть

Рассмотрим принцип работы оптического волокна (см. рис. 1). Световой луч, оказавшись в сердцевине волокна, распространяется в ней, многократно отражаясь на границе с оболочкой. Изгиб волокна приводит к тому, что часть моды светового потока попадает в оболочку и выходная мощность сигнала уменьшается. Если значения радиуса изгиба волокна близки к критическим ($R \leq 5$ мм), то происходит быстрый рост потерь¹.

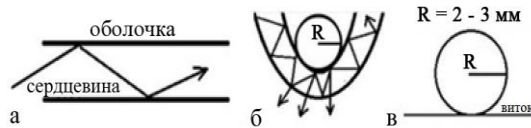


Рис. 1. Принцип работы оптического волокна:

а – распространение светового потока в волокне;

б – влияние изгиба на распространение света;

в – диапазон критических значений радиуса изгиба волокна

Необходимо следить за тем, чтобы величина радиуса изгиба оставалась в таких пределах, при которых волокно сохраняет свою целостность. При сильных изгибах есть вероятность его разрушить². Можно использовать волокно как чувствительный элемент – датчик (однако важно знать, в каких пределах изгиб волокна дает достаточные изменения величины потерь сигнала без разрушения самого волокна). Для того чтобы этот чувствительный элемент работал, необходимо произвести расчет материала основания, на которое волокно укладывается, после чего изгибается вместе с ним. Исходя из полученных расчетных данных реализуется функция преобразования потерь мощности оптического сигнала при действии прикладываемой силы.

В качестве основания могут выступать пластины. Пластинами называются упругие цилиндрические или призматические тела, толщина которых мала по сравнению с двумя другими размерами³. Необходимо произвести точный расчет прогиба пластины, на которую будет укладываться волокно. Важные параметры при расчете – размерные и упругие характеристики. Кроме того, стоит отметить, что «классическая теория» для расчета применима, если предполагаемый прогиб пластины будет мал (меньше половины толщины).

¹ Стенина Т. А. Изучение влияния изгибов на оптическое волокно // Евразийский союз ученых. – 2015. – № 2–2 (11). – С. 70–73.

² Зеневич А. О., Василевский Г. В., Новиков Е. В., Лукашик Т. М., Лагуттик А. А. Волоконно-оптический одномодовый аттенуатор на основе макроизгибов // Веснік сувязі. – 2019. – № 3 (155). – С. 55–59.

³ Справочник по технической механике / под редакцией А. Н. Динника. – Москва; Ленинград: Гостехиздат, 1949. – С. 543–546.

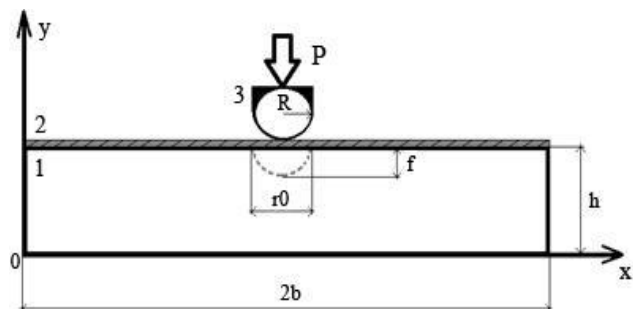


Рис. 2. Модель ВОДУ

На рис. 2 представлена модель ВОДУ, где 1 – упругая круглая пластина; 2 – оптическое волокно; 3 – элемент изгиба волокна и пластины; P – прикладываемая сила, Н; R – радиус элемента изгиба, м; r_0 – концентрический радиус прикладываемой силы, м; b – радиус пластины, м; h – высота пластины, м; f – прогиб пластины, м.

Предположим, что толщина пластины $h = 0,015$ м, ее радиус $b = 0,02$ м. Поскольку пластина имеет небольшие размеры, то сила, действующая на нее, будет сосредоточена равномерно по концентрическому кругу с радиусом $r_0 = 0,0025$ м.

Размеры пластины установлены. Теперь необходимо определиться с упругими характеристиками. Предположим, что в качестве материала пластины будем использовать каучук. Для расчета прогиба в центре воспользуемся формулой (1)¹:

$$f = \frac{3P(1+\mu^2)}{16\pi E h^3} \cdot \left[\frac{4(3+\mu)b^2}{1+\mu} - 4r_0^2 \ln \frac{b}{r_0} - \frac{(7+3\mu)r_0^2}{1+\mu} \right], \quad (1)$$

где μ – коэффициент Пуассона; E – модуль упругости, $\frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$.

Тогда прогиб в центре при $P = 800$ Н, $E = 8 \cdot 10^6 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$, $\mu = 0,47$: $f = 0,00508$ м ≈ 5 мм.

Расчет показывает, что, совершая воздействие сконцентрированной силой (ее величина примерно равна 80 кг), каучуковая пластина прогибается на 5 мм. Можно сделать следующий вывод: результат, во-первых, удовлетворяет условию «классической теории» расчета прогиба пластин, а во-вторых – условию диапазона значений волокна $R = 2-3$ мм, при которых возможна фиксация затухания светового сигнала.

Поскольку функция преобразования связывает оптические параметры с величиной прикладываемой силы, подставим в формулу (1) данные для других упругих материалов.

¹ Справочник по технической механике / под редакцией А. Н. Динника. – Москва; Ленинград: Гостехиздат, 1949. – С. 543–546.

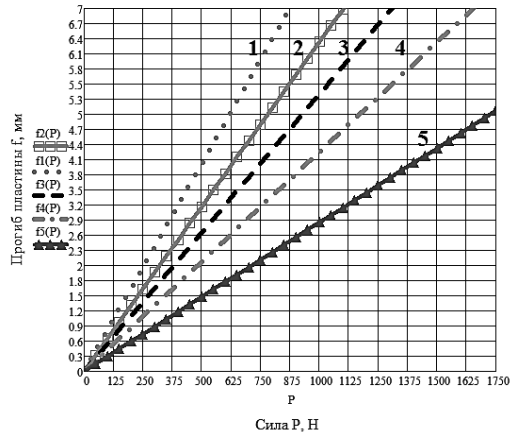


Рис. 3. Графики зависимости величины прогиба пластины от прикладываемой силы

для материалов с модулем упругости $(6,3 \cdot 10^6 \leq E \leq 41,06 \cdot 10^6) \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$:

- | | |
|--------------------------------|-----------------------|
| 1 – хлорированный полиэтилен; | 4 – пенополиуретан; |
| 2 – каучук; | 5 – нитрильный каучук |
| 3 – акрилэтиленовый сополимер; | |

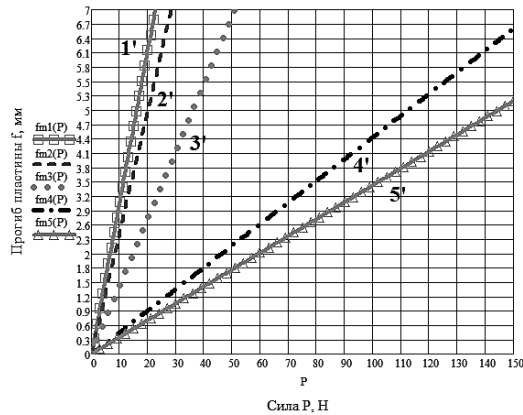


Рис. 4. Графики зависимости величины прогиба пластины от прикладываемой силы

для материалов с модулем упругости $(0,2 \cdot 10^6 \leq E \leq 1,8 \cdot 10^6) \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$:

- | | |
|------------------------------|---------------------------------|
| 1' – пенополиэтилен; | 4' – древесноволокнистая плита; |
| 2' – пенополиуретан; | 5' – вспученный вермикулит в |
| 3' – стекловолоконная плита; | полиэтиленовых матах |

Был рассмотрен ряд материалов с модулем упругости, лежащим в пределах $(6,3 \cdot 10^6 \leq E \leq 41,06 \cdot 10^6) \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$ (см. рис. 3). По графикам видно, что указанные материалы имеют необходимый прогиб в 5 мм, но при очень больших значениях прикладываемой силы. Тогда был рассмотрен ряд материалов с модулем упругости в дру-

гом диапазоне: $(0,2 \cdot 10^6 \leq E \leq 1,8 \cdot 10^6) \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$ (см. рис. 4). Прогиб пластины в таких случаях будет осуществляться уже при меньших прикладываемых силах. Так, например, для пенополиэтилена оказываемая сила для прогиба составит всего $P = 20 \text{ Н}$, что заметно упрощает потенциальные эксперименты с данным типом материала.

Определив диапазон необходимых значений радиуса изгиба волокна, а также характер прогиба пластины, найдем функцию преобразования потерь мощности оптического сигнала от радиуса изгиба волокна при действии прикладываемой силы.

Изменение оптической мощности по мере распространения света в волокне некоторой длины рассчитывается по формуле (2)¹:

$$P_{\text{вых}} = P_{\text{вх}} \cdot \exp(-\alpha_{\text{м}} l), \quad (2)$$

где $P_{\text{вых}}$ – мощность измененного светового сигнала на выходе волокна, Вт; $P_{\text{вх}}$ – значение мощности светового сигнала на входе волокна, Вт; $\alpha_{\text{м}}$ – потери мощности на макроизгибе, дБ; l – длина участка волокна, м.

Макроизгибом волокна называется такой изгиб, при котором потери выходной мощности сигнала начинают экспоненциально изменяться. Создавая изгиб волокна 2 посредством элемента 3 (см. рис. 2) с заданным радиусом R , можно рассчитать потери на макроизгибе по формуле (3)²:

$$\alpha_{\text{м}} = -10 \log \left(1 - \frac{d \cdot n_1}{R \cdot (NA)^2} \right), \quad (3)$$

где d – диаметр сердцевины волокна, м; n_1 – показатель преломления сердцевины волокна; NA – числовая апертура волокна.

Считаем величину прогиба f равной радиусу R , тогда:

$$\alpha_{\text{м}} = -10 \log \left(1 - \frac{d \cdot n_1}{f \cdot (NA)^2} \right). \quad (3.1)$$

Подставив формулу (1) в (3.1), получим выражение (4):

$$\alpha_{\text{м}}(P) = 10 \log \left(1 - \frac{d \cdot n_1}{\frac{3P(1+\mu^2)}{16\pi E h^3} \cdot \left[\frac{4(3+\mu)b^2}{1+\mu} - 4r_0^2 \ln \frac{b}{r_0} - \frac{(7+3\mu)r_0^2}{1+\mu} \right] (NA)^2} \right). \quad (4)$$

Подставив в выражение (4) соответствующие характеристики материала основания (E , μ), получим следующие семейства графиков зависимости потерь мощности $\alpha_{\text{м}}$ в волокне от прикладываемой силы P (см. рис. 5, 6).

¹ Основные составляющие оптических потерь. – URL: <http://foos.sfedu.ru/glava2/2.1.html> (дата обращения: 12.05.2020).

² Расчет затухания в оптическом волокне. – URL: <https://studfile.net/preview/8101677/page:7/> (дата обращения: 21.05.2020).

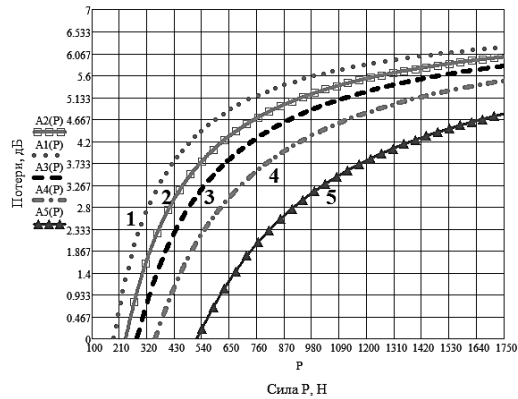


Рис. 5. Графики зависимости потерь α_m в волокне от прикладываемой силы P

для материалов с модулем упругости $(6,3 \cdot 10^6 \leq E \leq 41,06 \cdot 10^6) \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$:

- | | |
|--------------------------------|-----------------------|
| 1 – хлорированный полиэтилен; | 4 – пенополиуретан; |
| 2 – каучук; | 5 – нитрильный каучук |
| 3 – акрилатиленовый сополимер; | |

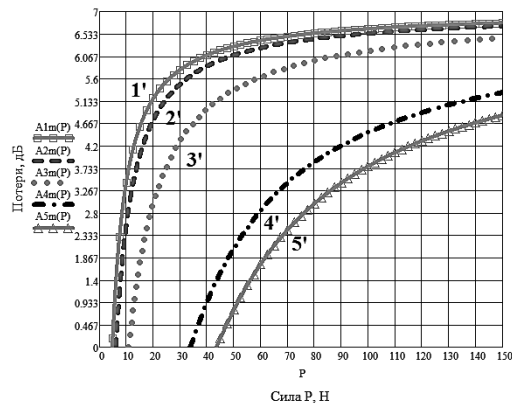


Рис. 6. Графики зависимости потерь α_m в волокне от прикладываемой силы P

для материалов с модулем упругости $(0,2 \cdot 10^6 \leq E \leq 1,8 \cdot 10^6) \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$:

- | | |
|------------------------------|---------------------------------|
| 1' – пенополиэтилен; | 4' – древесноволокнистая плита; |
| 2' – пенополиуретан; | 5' – вспученный вермикулит в |
| 3' – стекловолоконная плита; | полиэтиленовых матах |

Таким образом, с помощью выражения (4) можно оценить потери в оптическом волокне на макроизгибе вместе с тем материалом основания, на которое данное волокно укладывается. С учетом выбора необходимых геометрических и механических параметров материала основания определяется прогиб этого материала, соответствующий изгибу волокна с оптимальным радиусом изгиба, лежащим в диапазоне $R = 2\text{--}3$ мм. В результате потерь мощности оптического сигнала внутри волокна на

таким макроизгибе можно создавать волоконно-оптический датчик усилий. Справедливость аналитических рассуждений докажем с помощью эксперимента.

Экспериментальная часть

Из-за разнообразия типов одномодовых оптических волокон не существует точных экспериментальных данных о том, при каких критических значениях радиуса изгиба волокно разрушается. В работе А. О. Зеневича, Г. В. Василевского, Е. В. Новикова, Т. М. Лукашик и А. А. Лагутика «Волоконно-оптический одномодовый аттенуатор на основе макроизгибов»¹ указывается, что для типов волокна G.652.A и G.655.A при диаметре менее 5 мм может наступить излом. Для того чтобы найти критическое значение, приводящее к излому, был проведен эксперимент с помощью установки, схема которой показана на рис. 7.

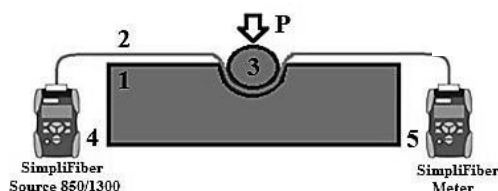


Рис. 7. Схема экспериментальной установки по определению оптимального диапазона радиуса изгиба оптического волокна:

- | | |
|---|----------------------------|
| 1 – площадка с пазом размещения
волокна; | 4 – оптический излучатель; |
| 2 – оптическое волокно; | 5 – измеритель мощности |
| 3 – конусообразный элемент для
изгиба волокна; | |

В качестве источников излучения и измерения мощности были выбраны устройства компании SimpliFiber, предоставленные для исследований НПЦ «Наука-Сервис».

Экспериментальную установку с конусообразным пазом создали с помощью технологии 3D-печати. Диаметр паза распределен от 20 до 3 мм (см. рис. 8).

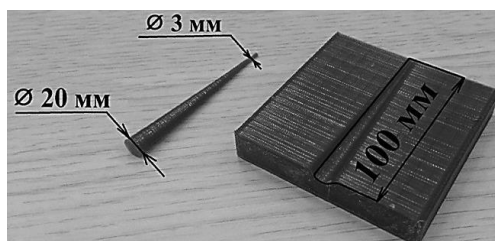


Рис. 8. Установка для определения оптимального диапазона радиуса изгиба оптического волокна

¹ Зеневич А. О., Василевский Г. В., Новиков Е. В., Лукашик Т. М., Лагутик А. А. Волоконно-оптический одномодовый аттенуатор на основе макроизгибов // Вестник связи. – 2019. – № 3 (155). – С. 55–59.

Опыт проводился следующим образом: волокно 2 марки ZHWCОММ стандарта G.652.D подключалось к источнику излучения 4 и укладывалось в паз на площадке 1 в поперечном направлении. С помощью конуса 3, имеющего такой же распределенный диаметр, осуществлялся изгиб волокна. Небольшая сила, воздействующая на конус, приводила к изгибу волокна таким образом, что оно принимало форму паза, т. е. принимало соответствующий радиус изгиба. С каждым новым изгибом волокно сдвигалось ближе к концу площадки, и с помощью измерителя мощности 5 выполнялся мониторинг изменения сигнала. Измерения проводились на длине волны $\lambda = 850$ нм. С каждым шагом уменьшения радиуса происходил рост потерь. Однако только при достижении радиуса изгиба, равного 5 мм, можно было достаточно уверенно регистрировать изменение потерь. В результате опытов по определению оптимального диапазона радиуса изгиба получены следующие данные: минимальный радиус изгиба волокна без его разрушения и сохранения функциональности: $R = 2$ мм. Диапазон значений радиуса изгиба, при которых можно гарантированно детектировать рост потерь световой энергии, составляет $R = 2\text{--}5$ мм.

Полученные результаты (при выбранной марке волокна и измерительном оборудовании) расширяют область возможного применения изгибных особенностей оптического волокна, определенных в аналитической части работы.

Проверим справедливость выражения (3) в отношении проведенного эксперимента. Подставим в формулу необходимые данные для волокна ZHWCОММ стандарта G.652.D: $d = 9 \cdot 10^{-6}$ м; $n_1 = 1,46085458$; $R = 0,005$ м; $NA = 0,113$. Величина потерь с указанным радиусом макроизгиба составит $\alpha_m = 0,7$ дБ.

Чтобы получить экспериментальную величину потерь, преобразуем формулу (2) и подставим в нее значения, соответствующие уровням входной и выходной мощности оптического сигнала при радиусе макроизгиба $R = 0,005$ м:

$$\alpha_m = -10 \log \left(\frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ВХ}}} \right) = -10 \log \left(\frac{6,90}{8,75} \right) = 1,032 \text{ дБ.}$$

Построим графики зависимости потерь мощности сигнала в волокне от радиуса макроизгиба, исходя из аналитических и экспериментальных результатов. При уменьшении радиуса изгиба волокна потери сигнала на создаваемом изгибе увеличиваются вследствие излучения большей части полезного сигнала в оболочку волокна (см. рис. 9).

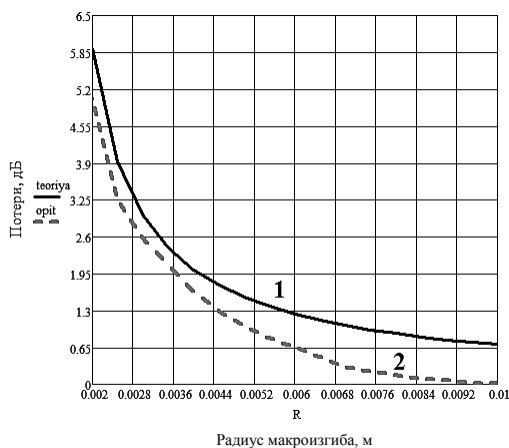


Рис. 9. Зависимость величины потерь от радиуса макроизгиба волокна:

1 – кривая, полученная аналитически; 2 – экспериментальная кривая

Расхождение экспериментального и аналитического графиков объясняется тем, что во время эксперимента при радиусе изгиба волокна $R > 8$ мм практически не изменяется уровень выходной мощности относительно входной, соответственно уровень потерь при таких изгибах приблизительно равен нулю. Аналитическая кривая придет в область потерь, близких к нулю, при больших радиусах (порядка десятков сантиметров).

Таким образом, экспериментально подтвердив диапазон радиуса изгиба оптического волокна и даже расширив его, на основе разработанной функции преобразования (4) предлагаем вариант конструкции ВОДУ (см. рис. 10).

ВОДУ содержит следующие компоненты:

- 1) основание 1 выполнено в форме стакана с крепежными отверстиями 2 для установки на объект мониторинга;
- 2) два оптических волокна 3 уложены перпендикулярно на эластичный материал 4;
- 3) эластичный материал 4 (круглая упругая пластина, прогиб которой рассчитывался в теоретической части) помещается в углубление стакана основания 1 и закрепляется в нем при помощи клея;
- 4) пазы 5 выполнены с целью расположения волокон 3 на стакане основания 1 и на нижнем основании упорной крышки 6;
- 5) упорная крышка 6 закрепляется на верхней части основания 1, содержит сквозное отверстие для доступа к волокнам 3 и имеет внутренний объем под демпфирующий материал 7 (например, тороидальной формы);
- 6) демпфирующий материал 7 располагается по всему внутреннему объему упорной крышки 6 и закрепляется внутри нее с помощью клея;
- 7) элемент изгиба 8 крепится на демпфирующем материале 7 вокруг отверстия при помощи клея;
- 8) изгибающая волокна 3 головка 9 свободно располагается внутри демпфирующего материала 7.

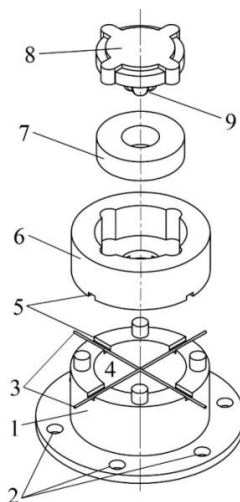


Рис. 10. Конструкция ВОДУ

ВОДУ может работать как датчик в системе мониторинга состояния объекта либо как независимый от системы чувствительный элемент.

Рассмотрим его работу в качестве чувствительного элемента системы мониторинга состояния объектов¹. Для этого входы оптических волокон 3 (выбранные ранее одномодовые волокна марки ZHWCMM стандарта G.652.D) подключим к источникам лазерного излучения, а выходы – к приемникам излучения измерительной системы.

В результате усилия, прикладываемого к основанию элемента изгиба 8, он начинает перемещаться вертикально вниз и сжимать демпфирующий материал 7. Сжатие происходит до того момента, пока изгибающая головка 9 элемента изгиба 8 полностью не пройдет через сквозное отверстие упорной крышки 6. Изгибающая головка 9 (см. рис. 11), приближаясь к основанию 1, захватывает предусмотренными пазами оптические волокна 3, которые лежат перпендикулярно в пазах 5 и на эластичном материале 4.

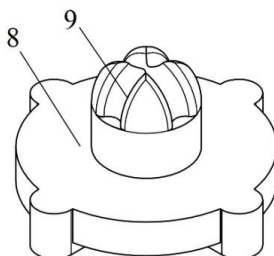


Рис. 11. Элемент изгиба 8 с изгибающей головкой 9

¹ Харахнин К. А., Вахрамеев П. С., Терешин Д. А., Курочкин К. А., Вахрамеев Д. В. Волоконно-оптическая система мониторинга состояния объекта. № 2019128614. Патент РФ № 196573. МПК G08B13/186; заявл. 11.09.2019; опубл. 05.03.2020.

В результате усилия, оказываемого головкой 9, волокна 3 вместе с эластичным материалом 4 начинают прогибаться вертикально вниз до того момента, пока данные волокна полностью не примут форму головки 9.

Именно в таком состоянии волокон 3 потери мощности оптических сигналов на их выходах будут регистрироваться программно-аппаратными средствами системы мониторинга. Ослабление внешнего усилия на элемент изгиба 8 приводит к тому, что эластичный материал 4 и демпфирующий материал 7 за счет своих упругих свойств начинают принимать недеформированное до сжатия состояние. В результате элемент изгиба 8 с головкой 9 возвращаются в исходное положение.

Физико-механические параметры эластичного материала 4 определяют чувствительность волоконно-оптического датчика усилий, физико-механические параметры материала 7 – диапазон измеряемых внешних усилий.

Поскольку в датчике применены два оптических волокна, то измеряемое усилие воздействия вычисляется как среднее арифметическое двух сигналов.

Установка двух оптических волокон в конструкцию датчика позволяет при их использовании в системе мониторинга длинномерных объектов определять координату силового воздействия.

Выводы

Таким образом, отсутствие полноценных сведений о том, как соотносятся оптические элементы и среда, с которой они взаимодействуют, доказало, что разработка математического аппарата для создания волоконного датчика является актуальной задачей в настоящее время. В связи с этим была представлена математическая модель ВОДУ; на ее основе рассчитана функция преобразования потерь мощности оптического сигнала при действии прикладываемой силы.

С помощью выражения (4) можно оценить потери в оптическом волокне на макроизгибе вместе с тем материалом основания, на которое данное волокно укладывается.

На основе выражения (4) и экспериментальных опытов была предложена конструкция ВОДУ, реализованная в виде прототипа, представленного на рис. 12.

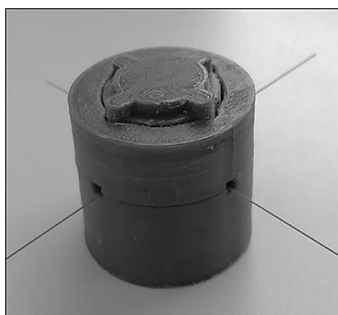


Рис. 12. Прототип волоконно-оптического датчика усилий

В дальнейшем планируется работа по улучшению конструкции датчика, а также требуется дополнительное изучение, тарировка датчика, выбор его упругих компонентов и проведение динамических исследований с целью определения частотных характеристик.

Литература

Гончаренко И. А., Рябцев В. Н. Датчики контроля состояния инженерных и строительных конструкций на основе оптических волноводных структур // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2013. – № 2 (18). – С. 118–132.

Зеневич А. О., Василевский Г. В., Новиков Е. В., Лукашик Т. М., Лагутик А. А. Волоконно-оптический одномодовый аттенуатор на основе макроизгибов // Веснік сувязі. – 2019. – № 3 (155). – С. 55–59.

Мильков А. В., Романов К. И., Букетин Б. В. Экспериментальное исследование кратковременной и длительной прочности оптического волокна и расчет его надежности. – URL: <https://docplayer.ru/40083053-Eksperimentalnoe-issledovanie-kratkovremennoy-i-dlitelnoy-prochnosti-opticheskogo-voлокna-i-raschet-ego-nadezhnosti.html> (дата обращения: 12.05.2020).

Основные составляющие оптических потерь. – URL: <http://foos.sfedu.ru/glava2/2.1.html> (дата обращения: 12.05.2020).

Расчет затухания в оптическом волокне. – URL: <https://studfile.net/preview/8101677/page/7/> (дата обращения: 21.05.2020).

Справочник по технической механике / под редакцией А. Н. Динника. – Москва; Ленинград: Гостехиздат, 1949. – 734 с.

Стенина Т. А. Изучение влияния изгибов на оптическое волокно // Евразийский союз ученых. – 2015. – № 2–2 (11). – С. 70–73.

Харахнин К. А., Вахрамеев П. С., Терешин Д. А., Курочкин К. А., Вахрамеев Д. В. Волоконно-оптическая система мониторинга состояния объекта. № 2019128614. Патент РФ № 196573. МПК G08B13/186; заявл. 11.09.2019; опубл. 05.03.2020.

Яцеев В. А. Волоконно-оптическая система охранной сигнализации. № 2003111994/09. Патент РФ № 2311687. МПК G08B13/186; заявл. 24.04.2003; опубл. 27.11.2007.

References

Goncharenko I. A., Riabtsev V. N. Datchiki kontrolya sostoianii inzhenernykh i stroitel'nykh konstruksii na osnove opticheskikh volnovodnykh struktur [Sensors to control the state of engineering and building constructions based on the optical waveguide structures]. *Vestnik Komandno-inzhenernogo instituta MChS Respubliki Belarus'* [Vestnik of the Institute for Command Engineers of the MES of the Republic of Belarus], 2013, no. 2 (18), pp. 118–132.

Zenevich A. O., Vasilevskii G. V., Novikov E. V., Lukashik T. M., Lagutik A. A. Volokonno-opticheskii odnomodovyi attenuator na osnove makroizgibov [Fiber-optic single-mode attenuator based on macrobending]. *Vesnik suvazi* [Vestnik of signal communication], 2019, no. 3 (155), pp. 55–59.

Mil'kov A. V., Romanov K. I., Buketin B. V. *Eksperimental'noe issledovanie kratkovremennoi i dlitel'noi prochnosti opticheskogo volokna i raschet ego nadezhnosti* [Experimental research into the short-term and long-term strength of the optical fiber and its reliability calculation]. Available at: <https://docplayer.ru/40083053-Eksperimentalnoe-issledovanie-kratkovremennoy-i-dlitelnoy-prochnosti-opticheskogo-voлокna-i-raschet-ego-nadezhnosti.html> (accessed: 12.05.2020).

Osnovnye sostavliaiushchie opticheskikh poter' [Major components of the optical losses]. Available at: <http://foos.sfedu.ru/glava2/2.1.html> (accessed: 12.05.2020).

Raschet zatukhaniia v opticheskom volokne [Calculation of attenuation in the optical fiber]. Available at: <https://studfile.net/preview/8101677/page/7/> (accessed: 21.05.2020).

Spravochnik po tekhnicheskoi mekhanike [Handbook on optical mechanics; ed. by A. N. Dinnik]. Moscow; Leningrad: Gostekhizdat, 1949. 734 p.

Stenina T. A. Izuchenie vliianiia izgibov na opticheskoe volokno [The study of the bend effects on optical fiber]. *Evrasiiskii soiuz uchenykh* [Eurasian Union of Scientists], 2015, no. 2–2 (11), pp. 70–73.

Kharakhnin K. A., Vakhrameev P. S., Tereshin D. A., Kurochkin K. A., Vakhrameev D. V. *Volonno-opticheskaya sistema monitoringa sostoyaniia ob"ekta. № 2019128614. Patent RF № 196573. MPK G08B13/186; zaivl. 11.09.2019; opubl. 05.03.2020* [Fiber-optical system of monitoring the item state. № 2019128614. Patent RF № 196573. IPC G08B13/186; applied for the patent 11.09.2019; publ. 05.03.2020].

Iatseev V. A. *Volonno-opticheskaya sistema okhrannoi signalizatsii. № 2003111994/09. Patent RF № 2311687. MPK G08B13/186; zaivl. 24.04.2003; opubl. 27.11.2007* [Fiber-optical system of security alarm. № 2003111994/09. Patent RF № 2311687. IPC G08B13/186; applied for the patent 24.04.2003; publ. 27.11.2007].

Для цитирования: *Харахнин К. А., Терешин Д. А., Вахрамеев Д. В., Вахрамеев П. С.* Волоконно-оптический датчик усилий: математическая модель, функция преобразования, разработка прототипа // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2020. – № 6 (99). – С. 45–58. DOI: 10.23859/1994-0637-2020-6-99-4

For citation: *Kharakhnin K. A., Tereshin D. A., Vakhrameev D. V., Vakhrameev P. S.* Fiber-optic force sensor: mathematical model, conversion function, prototype design. *Bulletin of the Cherepovets State University*, 2020, no. 6 (99), pp. 45–58. DOI: 10.23859/1994-0637-2020-6-99-4