

**В. В. ЮГАЙ, Н. Б. КАЛИАСКАРОВ\***

*Карагандинский технический университет, г. Караганда*

*slawa\_v@mail.ru, 90nurbol@mail.ru*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗРЫВОБЕЗОПАСНЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА КОНТРОЛЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ПОТЕРЬ**

*Представлены результаты исследования взрывобезопасных волоконно-оптических датчиков давления с использованием метода контроля дополнительных потерь, проводимые в рамках грантового проекта МОН РК №АР09562222. Проведены опыты по использованию различных источников оптического излучения для использования его в ВОДД. Определена зависимость значений деформации  $\varepsilon$ , которая представлена математической моделью с различными видами аппроксимации.*

***Ключевые слова:** оптическое волокно, датчики давления, мониторинг, ANSYS.*

**Введение.** Развитие волоконно-оптической техники и технологий позволило существенно повысить пропускную способность систем передачи информации. Оптическое волокно (ОВ) постоянно совершенствуется, а его стоимость ежегодно снижается, что обеспечивало его доминирование в направляющих системах связи. В конце прошлого века были решены ряд важнейших задач по сокращению потерь мощности световой волны, распространяющейся в оптическом волокне. Основное препятствие при распространении света – это затухание, которое обусловлено в основном наличием примесей в материале ОВ. Над повышением качества передачи информации по ОВ постоянно работают ученые и инженеры множества стран мира. Это позволило создать ОВ с наименьшими потерями распространения сигнала. Анализ показал, что множество работ, посвященных преимуществам использования оптического волокна в качестве среды распространения многоканального сигнала, имеют существенные преимущества перед традиционно используемыми медными кабелями и эфиром. Из ОВ изготавливают кабели связи, способные передавать информации на тысячи километров. Само по себе ОВ является легко повреждаемым, так как представляет собой тонкую стеклянную нить диаметром 125 мкм, поэтому требуется защищать его от различных внешних воздействий. По своей прочности на разрыв ОВ может превосходить стальную нить токового размера, но при изгибе может легко сломаться, если радиус будет менее допустимого. Например, для волоконно-оптического кабеля допустимый минимальный радиус изгиба составляет двадцать диаметров самого кабеля, но данное соотношение зависит от марки кабеля и его покрытия. Радиус изгиба влияет не только на прочность ОВ, но и на потерю мощности импульса излучения [1]. Импульс световой волны, передаваемой по оптическому волокну, называется модой. Волоконно-оптические кабели подвергаются различным воздействиям: температуры; механическим усилиям различного вида и происхождения; влажности; агрессивности окружающей среды; водородной

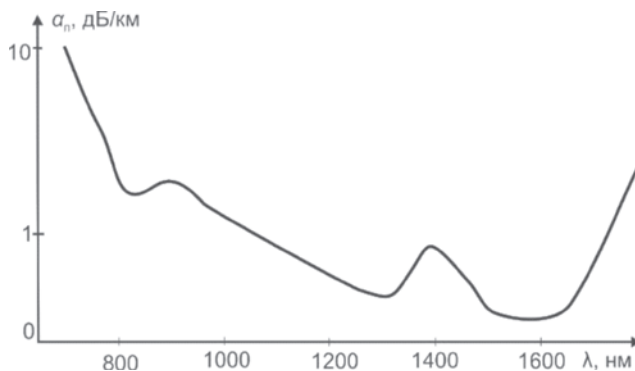
---

\* E-mail корреспондирующего автора: 90nurbol@mail.ru

коррозии из-за воздействия влаги, присутствующей в окружающей среде; радиации. Все перечисленные воздействия со временем ухудшают процесс передачи данных, а также ведут к увеличению дополнительных потерь мощности передаваемого сигнала. К примеру, изменение температуры ОВ влияет на его коэффициент затухания.

**Теоретическая основа исследований и постановка задачи.** Механические воздействия на ОВ, связанное его деформацией, приводит также к локальным повышениям затухания и изменению его передающих характеристик.

Для одномодового ОВ механическое воздействие вызывает изменение длины волны отсечки и увеличению дополнительных потерь на рассеяние. Описанные выше свойства ОВ можно использовать их не только как средство передачи данных, но и как датчики различных физических величин. В данной статье будут рассмотрены механические воздействия на ОВ, а именно случаи, связанные с изгибом, который снижает передаточные параметры. Можно выделить два варианта изгиба – это микроизгиб и макроизгиб. Микроизгиб возникает при локальном нарушении прямолинейности ОВ, это связано с процессом изготовления или при монтаже кабеля. Макроизгиб возникает при скрутке ОВ по всей длине кабеля или при его намотке на барабан. При изгибе возникают дополнительные потери оптической мощности моды, которые обусловлены излучением направляемых мод за пределы оболочки в окружающее пространство. Если изогнуть ОВ и пропустить по нему световую волну видимого диапазона, то в месте изгиба будет видно свечение, а при уменьшении радиуса изгиба свечение начинает усиливаться. Обычно для выявления обрывов и мест критических изгибов используется полупроводниковый лазер красного цвета. Изгиб ОВ до критического значения и менее того приведет не только к потере мощности излучения моды, но и к разрушению самого ОВ [1]. Критический радиус может составлять несколько миллиметров, для разных волокон это значение колеблется от 3 до 5 мм, например, у одномодовых ОВ, работающих в режиме с большой площадью поперечной моды и высокими параметрами апертуры, допустимый радиус изгиба составляет десятки сантиметров. Основные потери, возникающие в ОВ при прохождении световой моды, являются достаточно изученными, а также имеется значительный объем источников, описывающий этот процесс. На рисунке 1 приведен график зависимости основных потерь от длины волны оптического излучения.



**Рисунок 1** – График потерь, возникающих в оптическом волокне при различной длине световой волны на один километр

Из графика видно, что наименьшие потери возникают в ОВ при длинах волн 1310 и 1550 нм, которые используются в системах телекоммуникации. Также меньшие потери отмечены на длине волны 900 нм, этот диапазон используется для локальных вычислительных сетей, где расстояния не превышают 800 метров. На один километр длины ОВ приходится определенное значение затухания сигнала. Например, на длине волны 1550 нм затухание сигнала составляет 0,22 дБ/км, существуют ОВ с меньшими показателями затухания. Это очень важно при передаче импульса световой моды на значительные расстояния в сотни километров. Соответственно, чем ниже затухание, тем выше эффективности работы направляющей системы связи. Если на оптическое волокно оказать механическое воздействие, то потери увеличатся в несколько раз и будут зависеть от характера изгиба. Чем меньше радиус изгиба, тем выше значение дополнительных потерь. Соответственно если использовать описанные выше свойства ОВ вызывать дополнительные потери при механическом воздействии на него, можно создать различного рода датчики, способные измерять давление или смещения. Использование ОВ в качестве датчика давления и смещения рассматривалась ранее в [2,3]. Сама идея использования ОВ в качестве датчика не новая, уже имеются ранние разработки, описанные в [4,5], но до конца еще не исследованы все возможные варианты его использования, а также имеются пробелы в области их использования в горном деле [2,3]. Есть сведения об испытаниях различных типов датчиков и приведены сведения об их конструкции [6,7]. Имеется положительный опыт использования ВОД в медицине [8]. Численные и экспериментальные исследования сенсора на основе фотонно-кристаллического волокна высокого давления рассмотрены в [9]. Наиболее близким к настоящим исследованиям является работа, посвященная разработке датчика давления на основе боковой деформации [10], а также измерения давления, описанные в [11]. Изучив вышеперечисленные работы, принято решение, что конструкция датчика подразумевает наличие элементов, воздействующих на ОВ и вызывающих микроизгиб. При создании датчика будет учитываться возможность максимального изгиба ОВ без его повреждения. Имеются сведения о разработке волоконно-оптических датчиков (ВОД) для охраняемых систем [11].

Для точного вычисления критического радиуса изгиба ОВ можно воспользоваться известным выражением:

$$R_{кр} \approx \frac{3n_1^2 \lambda}{4\pi(n_1^2 - n_2^2)^{3/2}}, \text{ мм} \quad (1)$$

где  $n_1$ ,  $n_2$  – показатели преломления сердцевины и оболочки;  $\lambda$  – длина волны применяемого излучения.

Как видно из выражения, теоретической основой будущего датчика будет являться микроизгиб, который будет вызывать дополнительные потери в ОВ. С увеличением длины волны потери при изгибе сильно возрастают, это свойство тоже будет учитываться при создании датчика. Увеличение потерь в ОВ при изгибе волокна на больших длинах волн ограничивает диапазон пропускания. К примеру, ОВ, предназначенное для одномодового режима передачи данных при длине волны 850 нм, не может быть использовано для режима передачи данных при длине волны 1500 нм,

так как потери при изгибе на этой длине волны будут значительными. Можно отметить, что при строительстве и эксплуатации волоконно-оптических линий передачи присутствуют так называемые эксплуатационные потери, которые обусловлены скруткой, деформацией и изгибами, возникающими при наложении покрытий и защитных оболочек при производстве кабеля, а также в процессе его прокладки. На рисунке 2 представлена поясняющая схема микроизгиба, на которой показано, что часть излучения моды, распространяемой по сердцевине ОВ, выходит за пределы оболочки и теряется, рассеиваясь в окружающем пространстве. Когда радиус изгиба уменьшается до критического значения, что на практике составляет несколько сантиметров, то происходит процесс преобразования направляемых мод в моды излучения.

Создается условие, при котором отражение мод высокого порядка происходит под углами, при которых дальнейшее ее прохождение по сердцевине ОВ становится невозможным. Это сводится к тому, что импульс света покидает ОВ. Развитие технологии производства ОВ направлено на уменьшение этих микронеоднородностей и снижение потерь при изгибах. Учитывая это обстоятельство для волоконно-оптических изготовления датчиков, будет использовано ОВ стандарта G 652.

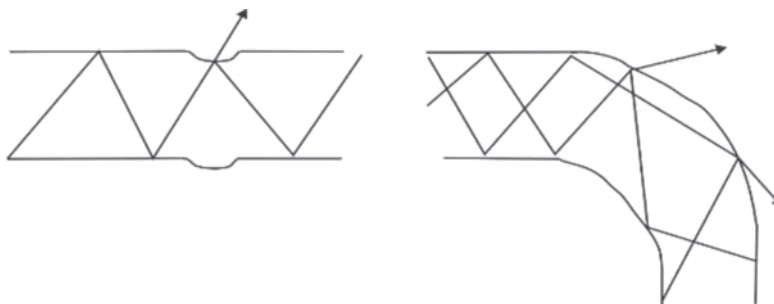


Рисунок 2 – Потери на изгибах волокна

Как известно, при распространении оптического сигнала внутри волокна происходит его экспоненциальное затухание, что вызывает потерю оптической мощности  $P$ . Этот процесс обусловлен различными линейными и нелинейными механизмами взаимодействия световых волн со средой ОВ.

Закон затухания можно выразить следующим выражением:

$$P = P_0 \exp(-\alpha l) \quad (2)$$

где  $P_0$  - мощность, вводимая в волокно;  $l$  - длина волокна;  $\alpha$  - коэффициент полных потерь световой энергии ОВ.

Взаимосвязь между параметрами  $\alpha_n$  и  $\alpha$  можно представить в следующем виде:

$$\alpha_n = \frac{10 \lg \left( \frac{P}{P_0} \right)}{l} = 4,343 \cdot \alpha, \text{ Дб/км} \quad (3)$$

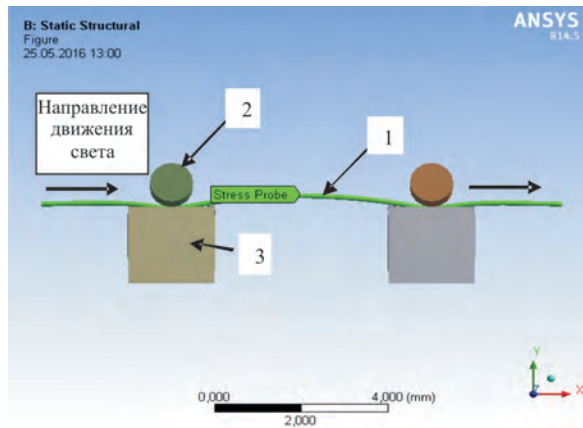
Представленная ранее, на рисунке 2, кривая потерь, возникающих в оптическом волокне при различной длине световой волны на один километр, позволяет выделить

три окна прозрачности с центрами в точках 850, 1300, 1550 нм. Имеются следующие закономерности, которые необходимо учитывать при создании датчика на основе ОВ. Оптическое волокно при механическом воздействии и изгибе на длинах волн 1625 нм имеет большие потери, чем на длинах волны 1550 и 1310 нм. При формировании угла изгиба, менее критического, наблюдается обратная зависимость: оптическое волокно на длинах волн 1625 нм имеет меньшие потери, чем на длинах волны 1550 и 1310 нм. Учитывая вышесказанное, задачей данного исследования является разработка лабораторного образца волоконно-оптического датчика давления (ВОДД) на основе метода измерения дополнительных потерь и проведение исследований его параметров. В дальнейшем данный датчик планируется использовать для измерения давления горных паров на элементы арочной крепи горных выработок угольных шахт. Актуальность разработки ВОДД заключается ряде технических преимуществ по отношению к традиционным электронным системам измерения и мониторинга. ВОДД обладает высокой степенью безопасности использования в взрывоопасной среде, полной искробезопасностью измерительных каналов; малой массой и размерами при значительной механической прочности; высокой надежностью и стойкостью к коррозии; высокими параметрами помехозащищенности, низкими затратами энергии для функционирования. Это делает ВОДД весьма перспективными для внедрения в горной промышленности.

#### **Компьютерное моделирование волоконно-оптического датчика давления на основе метода измерения дополнительных потерь**

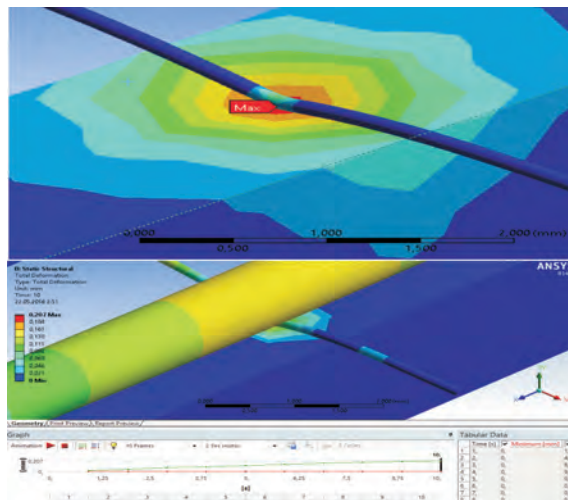
Для создания взрывобезопасных информационно измерительных систем (ИИС) на основе ВОДД были использованы методы компьютерного моделирования. Это позволило выполнить поиск конструктивного решения ВОДД, который будет измерять давление со стороны массива пород выработки на элементы крепи. Так же получена возможность спрогнозировать опасность внезапного обрушения горных пород свода выработки, что позволит заблаговременно усилить крепь. Также контроль горного давления позволит выбирать наиболее оптимальный по технико-экономическим затратам паспорт крепления. Работа ВОДД основана на использовании метода контроля дополнительных потерь в ОВ. Соответственно выполнена имитация давления на ОВ и визуализации картины его напряженно деформированного состояния. Величина дополнительных потерь напрямую зависит от величины механического воздействия. На рисунке 3 показана схема проведения компьютерного эксперимента с использованием программы ANSYS STATIC STRUCTURAL, основанную на методе конечных элементов. ОВ располагается на двух мягких опорах из резины. На ОВ сверху давит два металлических стальных стержня диаметром 1 мм.

В качестве измерительного элемента используем оптическое волокно диаметром 125/9 мкм, которое располагается на двух демпферах, которые представляют собой две резиновые прокладки. Давление передается на два стальных стержня, расположенные на расстоянии 4 мм, друг от друга. Источник оптического излучения принят с длиной волны тестового диапазона 1310 нм и 1550 нм.



1 – оптическое волокно, 2 – стальные стержни диаметром 1 мм,  
3 – упругая резиновая подкладка

**Рисунок 3** – Компьютерная модель ВОДД



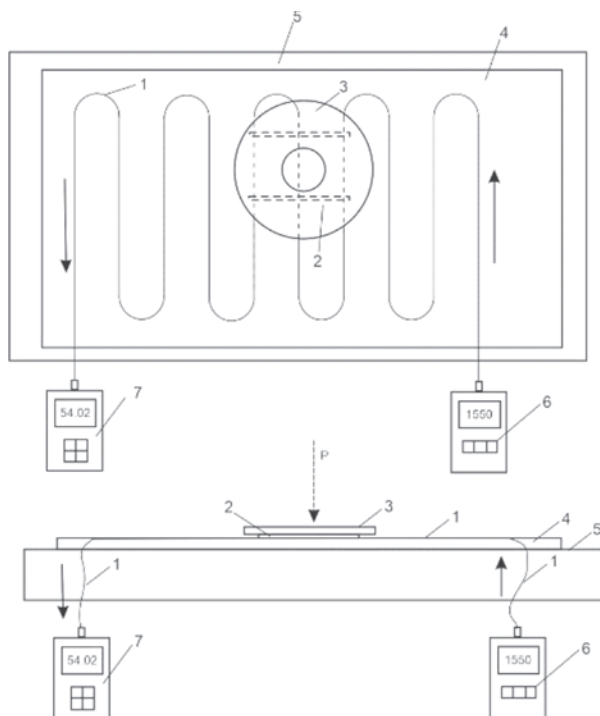
**Рисунок 4** – Визуализация механических напряжения трехмерного моделирования в программном пакете ANSYS

Программа ANSYS позволяет с достаточно высокой точностью рассчитать перемещения, деформации, напряжения, внутренние усилия, возникающие в теле под действием статической нагрузки. Выбор типа и размера конечного элемента при разбиении модели влияет на точность полученных данных. В соответствии с условиями проведения эксперимента элементам модели присвоены необходимые физические параметры. В расчёте использовались основные свойства контактных взаимодействий элементов. Результатом расчёта стало вычисление механического напряжения в области контакта оптическое волокно — стального стержня. Кроме того, была получена визуализация картины распространения механических напряжений и деформаций с точным отображением распределения напряжения в каждой точке компьютерной модели. На рисунке

4 представлены результаты трёхмерного моделирования и визуализация механических напряжения трёхмерного моделирования в программном пакете ANSYS.

Визуализация имеет различную цветовую гамму и более ярким участкам соответствует большее механическое напряжение. Также имеется информация о значениях механических напряжений и деформаций ОВ.

**Методы проведения лабораторных исследований.** Как сказано ранее, в исследованиях использовался метод измерения дополнительных потерь, возникающих в ОВ при его изгибе. В качестве источника оптического излучения использовался SmartPocket OLS-34/35/36 со встроенными опциями Auto- $\lambda$  и Multi- $\lambda$ . В качестве измерительного прибора использован оптический ваттметр SmartPocket OLP-38, который может автоматически измерять уровень мощности и вносимые потери в одномодовом и многомодовом оптическом кабеле. Для подключения к приборам использованы универсальный UPP 2.5 мм адаптер и оптические коннекторы типа SC и FC. Схема измерений приведена на рисунке 5. На рисунке 6 приведено фото лабораторного стенда. По ОВ 1 пропускается световая волна длиной от 650 до 1550 нм. Направление движения света показано стрелками. ОВ располагается на демпфере 4 и лежит на твёрдой поверхности 5, которая не деформируется при воздействии на нее груза. Основание 5 является поверхность стола. Направления давления груза показано стрелкой. На ОВ воздействуют два металлических стержня диаметром 1 мм. В опытах использовано ОВ стандарта G652 с диаметром 125/9 мкм, соответственно оболочки и сердцевины.



1 – Оптическое волокно, 2 – металлический стержень, 3 – диск, 4 – демпфер, 5 – основание стола, 6 – источник света, 7 – измеритель оптической мощности.

**Рисунок 5** – Схема измерений

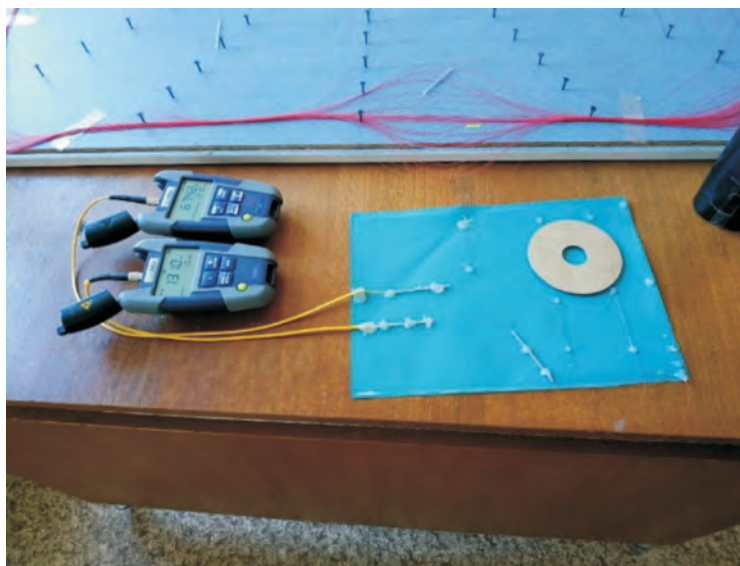


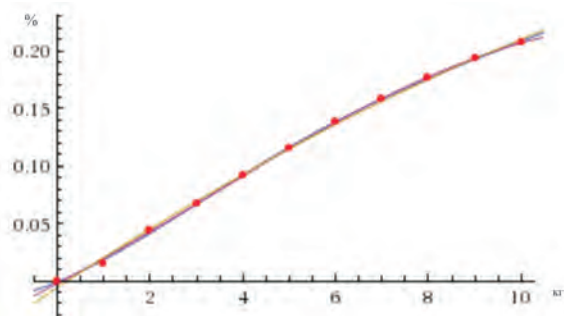
Рисунок 6 – Фото лабораторного стенда

Груз устанавливался на поверхность диска 3, который предавал нагрузку двум стержням 2, а те уже в свою очередь воздействовали на ОВ. Чем больше вес груза, тем больший изгиб ОВ. Соответственно большая деформация ОВ вызывает большие потери оптического излучения, которое передается от источника 6 к измерителю 7. Все измерения проводились при температуре 23 °С, при относительной влажности 54 %. Обработка результатов экспериментов проводу при помощи компьютерной программы Wolframalpha, а оценку результатов проведем, согласно выбранных критериев:

AIC – Информационный критерий Акаике, BIC – Байесовский информационный критерий,  $R^2$  – Коэффициент детерминации, Adjusted  $R^2$  – Скорректированный (adjusted)  $R^2$ .

**Результаты исследований лабораторного образца ВОДД.** Численное исследование модели ВОДД механических напряжений и деформации проведено с помощью ANSYS, а результаты экспериментов обработаны при помощи программы Wolframalpha, которая является интерактивной системой для выполнения обработки результатов экспериментов и ориентирована на работу с массивами данных. Граничное условие, давление на стальные стержни от 1 до 10 МПа с интервалом шага 1 секунда давление изменяется на 1 МПа, начальные условия давления  $Q = 0$  МПа, всего 10 шагов. Перемещение по осям после приложения давления  $Ox=0$  м;  $Oy=0$  м;  $Oz=0$  м. Температура в помещении лаборатории 23°С. В результате автоматизированной аппроксимации полученных данных эксперимента программой Wolframalpha получены следующие однофакторные математические модели. Wolframalpha работает на основе теории о вычислимости и представляет собой систему компьютерной алгебры, а также базу знаний и набор вычислительных алгоритмов на основе первого.





**Рисунок 7** – Значение деформации  $\varepsilon$  ОВ при пошаговом увеличении давления на металлические стержни

Зависимость значений деформации  $\varepsilon$ , которая представлена математической моделью с различными видами аппроксимации следующее:

$\varepsilon = 0,000018951Q^4 - 0,000472288 Q^3 + 0,0032662 Q^2 + 0,0165598 Q - 0,00127462$  (аппроксимация quartic)

$\varepsilon = -0,0000932673 Q^3 + 0,000897319 Q^2 + 0,0212976 Q - 0,00263909$  (аппроксимация cubic)

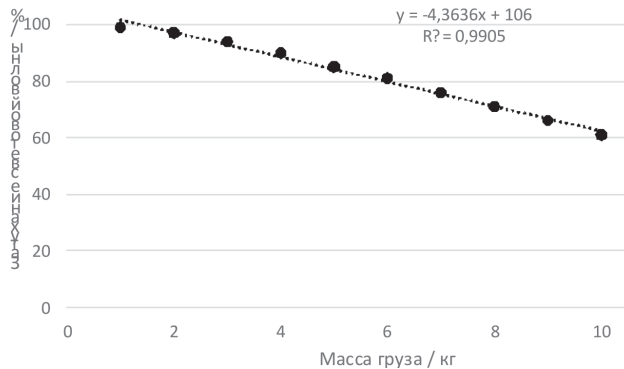
$\varepsilon = -0,00050169 Q^2 + 0,0266324 Q - 0,00599671$  (аппроксимация quadratic)

Аппроксимация	AIC	BIC	R <sup>2</sup>	Adjusted R <sup>2</sup>
quartic	-100,704	-98,3164	0,999263	0,999263
cubic	-97,2166	-95,2271	0,998959	0,998959
quadratic	-89,4635	-87,872	0,998232	0,99779

Проведены опыты по использованию различных источников оптического излучения для использования его в ВОДД. Использовалась длина волны оптического излучения 1310 и 1550 нм. График зависимости выходной мощности от приложенной нагрузки представлен на рисунке 4. Нагрузка изменялась от 2 до 10 кг с шагом 1 килограмм. На графике видно, что ВОДД имеет линейность характеристик. В качестве источника излучения использовались лазер с длиной волны 1550 нм, светодиод красный с повышенной яркости и инфракрасный, для упрощения системы измерения. В качестве приемника излучения использовался ваттметр оптический SmartPocket OLP-38.

Относительная погрешность измерений составила 2,112 %, коэффициент Стьюдента 1,092 с доверительным интервалом 0,95.

**Обсуждение и выводы.** ВОДД имеет незначительную нелинейность при приложенном давлении на стальные стержни от 1 до 10 МПа. Исследования показали, что разработанный ВОДД имеет незначительную нелинейность при нагрузке равной одному килограмму, при увеличении нагрузки от 2 до 10 кг сохраняется стабильная линейность характеристик. Нами поставлены опыты по использованию различных источников оптического излучения для использования его в ВОДД, наибольшая линейность достигнута при длине световой волны 1550 нм. Предложенный лабораторный образец способен с высокой точностью измерять горное давление на крепь



**Рисунок 8** – График зависимости выходной мощности от приложенной нагрузки при длине волны 1550 нм.

выработки, при этом быть взрывобезопасным и сохраняется стабильная линейность характеристик.

**Благодарности.** В основе публикаций лежат результаты научных исследований выполненных за счет средств проекта ИРН №АР09562222 «Информационно-измерительная система нового поколения на основе волоконно-оптических датчиков» (договор 254/12-2 от 15.07.21). Научные исследования выполнены с использованием лабораторий Казахского агротехнического университета им. С. Сейфуллина.

#### ЛИТЕРАТУРА

1 A.V. Yurchenko, A.D. Mekhtiev, N I Gorlov, AAKovtun. Research of the Additional Losses Occurring in Optical Fiber at its Multiple Bends in the Range Waves 1310nm, 1550nm and 1625nm Long. Journal of Physics: Conference Series 671 (2016) 012001 This content has been downloaded from IOPscience. Please scroll down to see the full text. (<http://iopscience.iop.org>) DIO:10.1088/1742-6596/671/1/012001).

2 A.D. Mekhtiev, F.N. Bulatbaev, E.G. Neshina, A.D. Al’kina. The Model of a Fiber-Optic Sensor for Monitoring Mechanical Stresses in Mine Workings. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2018, Vol. 54, No. 7, pp. 528–533. © Pleiades Publishing, Ltd., 2018

3 A. Yurchenko, A. Mekhtiev, A Alkina, F. Bulatbayev, E. Neshina. The Questions of Development of Fiber optic Sensors for Measuring Pressure with Improved Metrological and Operational Characteristics. VII Scientific Conference with International Participation “Information-Measuring Equipment and Technologies” (IME&T 2016), MATEC Web of Conferences 79, 01085 DOI: 10.1051/01085/mateconf/201679001085.

4 Hashemian, H.M., Black, C.L., and Farmer, J.P. Assessment of fiber optic pressure sensors. United States: N. p., 1995. Web. doi:10.2172/71391.

5 Juarez J.C. and Taylor H.F. Field test of a distributed fiber-optic intrusion sensor system for long perimeters // Applied Optics. – 2007. – Vol.46, No.11. – P. 1968–1971.

6 Shih-Chu Huang and Hermann Lin Counting signal processing and counting level normalization techniques of polarization-insensitive fiber-optic Michelson interferometric sensors // Applied Optics. – 2006.– Vol.45, No.35. – P. 8832–8838.

7 Jonas H. Osório, et al., “Simplifying the Design of Microstructured Optical Fibre Pressure Sensors,” Scientific Reports, 7, 2017.

8 Sven Poeggel, et al., “Optical Fibre Pressure Sensors in Medical Applications,” *Sensors* 2015, 15(7), 17115–17148.

9 Numerical and Experimental Studies for a High Pressure Photonic Crystal Fiber Based Sensor Juliano G. Hayashi, Cristiano M. B. Cordeiro, Marcos A. R. Franco, and Francisco Sircilli Citation: *AIP Conference Proceedings* 1055, 133 (2008); doi: 10.1063/1.3002521 View online: <https://doi.org/10.1063/1.3002521>

10 Frantisek Urban et al, Design of a Pressure Sensor Based on Optical Fiber Bragg Grating Lateral Deformation, *Sensors* 2010, 10, 11212-11225

11 Введенский Б.С. Волоконно-оптические сенсоры в системах охраны периметра // Мир и безопасность. – 2006.– №4-5. 7. Polyakov A.V., Ksenofontov M.A. Frequency fiber-optical alarm system // International Conference on Laser, Applications and Technologies (LAT-2007), Minsk, 28 May–1 June 2007.– Minsk, 2007. – P. 93.

## REFERENCES

1 A.V. Yurchenko, A.D. Mekhtiev, N I Gorlov, AAKovtun. Research of the Additional Losses Occurring in Optical Fiber at its Multiple Bends in the Range Waves 1310nm, 1550nm and 1625nm Long. *Journal of Physics: Conference Series* 671 (2016) 012001 This content has been downloaded from IOPscience. Please scroll down to see the full text. (<http://iopscience.iop.org>) DIO:10:1088/1742-6596/671/1/012001).

2 A.D. Mekhtiev, F.N. Bulatbaev, E.G. Neshina, A.D. Al’kina. The Model of a Fiber-Optic Sensor for Monitoring Mechanical Stresses in Mine Workings. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2018, Vol. 54, No. 7, pp. 528–533. © Pleiades Publishing, Ltd., 2018

3 A. Yurchenko, A. Mekhtiev, A Alkina, F. Bulatbayev, E. Neshina. The Questions of Development of Fiberoptic Sensors for Measuring Pressure with Improved Metrological and Operational Characteristics. VII Scientific Conference with International Participation “Information-Measuring Equipment and Technologies” (IME&T 2016), MATEC Web of Conferences 79, 01085 DOI: 10.1051/01085/mateconf/201679001085.

4 Hashemian, H.M., Black, C.L., and Farmer, J.P.. Assessment of fiber optic pressure sensors. United States: N. p., 1995. Web. doi:10.2172/71391.

5 Juarez J.C. and Taylor H.F. Field test of a distributed fiber-optic intrusion sensor system for long perimeters // *Applied Optics*. – 2007. – Vol.46, No.11. – P. 1968–1971.

6 Shih-Chu Huang and Hermann Lin Counting signal processing and counting level normalization techniques of polarization-insensitive fiber-optic Michelson interferometric sensors // *Applied Optics*. – 2006.– Vol.45, No.35. – P. 8832–8838.

7 Jonas H. Osório, et al., “Simplifying the Design of Microstructured Optical Fibre Pressure Sensors,” *Scientific Reports*, 7, 2017.

8 Sven Poeggel, et al., “Optical Fibre Pressure Sensors in Medical Applications,” *Sensors* 2015, 15(7), 17115–17148.

9 Numerical and Experimental Studies for a High Pressure Photonic Crystal Fiber Based Sensor Juliano G. Hayashi, Cristiano M. B. Cordeiro, Marcos A. R. Franco, and Francisco Sircilli Citation: *AIP Conference Proceedings* 1055, 133 (2008); doi: 10.1063/1.3002521 View online: <https://doi.org/10.1063/1.3002521>

10 Frantisek Urban et al, Design of a Pressure Sensor Based on Optical Fiber Bragg Grating Lateral Deformation, *Sensors* 2010, 10, 11212-11225

11 Vvedenskij B.S. Volokonno-opticheskie sensory v sistemah ohrany perimetra // *Mir i bezopasnost'*. – 2006.– №4-5. 7. Polyakov A.V., Ksenofontov M.A. Frequency fiber-optical alarm system // International Conference on Laser, Applications and Technologies (LAT-2007), Minsk, 28 May–1 June 2007.– Minsk, 2007. – P. 93.

**В. В. ЮГАЙ, Н. Б. КАЛИАСКАРОВ**

*Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ.*

**ҚОСЫМША ЖОҒАЛУЛАРДЫ БАҚЫЛАУ ӘДІСТЕРІН ҚОЛДАНА  
ОТЫРЫП ЖАРЫЛЫСҚА ҚАУІПСІЗ ОПТИКАЛЫҚ-ТАЛШЫҚТЫ  
ҚЫСЫМ ДАТЧИКТЕРІН ЗЕРТТЕУ**

*Мақалада ҚР БжҒМ гранттық қаржыландырылған АР09562222 жобасы аясында жүргізілген Қосымша шығындарды бақылау әдісін қолдана отырып, жарылысқа қарсы талшықты-оптикалық қысым датчиктерін зерттеу нәтижелері ұсынылған. ОТҚД пайдалану үшін оптикалық сәулеленудің әртүрлі көздерін пайдалану бойынша тәжірибелер жүргізілді.  $\epsilon$  деформация мәндерінің тәуелділігі анықталды, ол жуықтаудың әртүрлі түрлері бар математикалық модельмен ұсынылған.*

*Түйін сөздер: оптикалық талшық, қысым датчиктері, мониторинг, ANSYS.*

**V. V. YUGAY, N. B. KALIASKAROV**

*Karaganda technical university, Karaganda, Kazakhstan*

**INVESTIGATION OF EXPLOSION-PROOF FIBER-OPTIC PRESSURE  
SENSORS USING THE METHOD OF ADDITIONAL LOSS CONTROL**

*The results of the study of explosion-proof fiber-optic pressure sensors using the method of monitoring additional losses, carried out within the framework of the grant project of the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan АР09562222. Experiments have been conducted on the use of various sources of optical radiation for its use in fiber-optic pressure sensors. The dependence of the strain values is determined, which is represented by a mathematical model with various types of approximation.*

*Key words: optical fiber, pressure sensors, monitoring, ANSYS.*