

09.5

Волоконно-оптический длиннобазовый деформометр для системы мониторинга горных пород бортов карьеров

© А.Д. Мехтиев¹, А.В. Юрченко², В.А. Калытка³, Е.Г. Нешина³, А.Д. Алькина³, П.Ш. Мади³

¹ Казахский агротехнический университет им. С. Сейфуллина, Нур-Султан, Казахстан

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

³ Карагандинский технический университет, Караганда, Казахстан

E-mail: 1_neg@mail.ru

Поступило в Редакцию 28 марта 2022 г.

В окончательной редакции 17 июня 2022 г.

Принято к публикации 18 июня 2022 г.

Разработан волоконно-оптический длиннобазовый деформометр, который может быть использован в системах мониторинга горных пород бортов карьеров. Предложенный деформометр основан на использовании метода контроля дополнительных потерь световой волны, распространяющейся в оптическом волокне. Волоконно-оптический датчик имеет довольно высокую линейность и стабильность выходного сигнала, а также не подвержен негативному возникновению фединга, свойственному волоконно-оптическим датчикам, созданным на основе интерферометра Маха–Цендера, при колебаниях внешней температуры и появлению ложных сигналов о смещении горных пород.

Ключевые слова: деформометр, интерферометр, система мониторинга, оптическое волокно.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.15.53129.19200

Оптические волокна можно использовать для построения распределенных и квазираспределенных измерительных систем мониторинга геотехнических параметров и обеспечения безопасности проведения горных работ в условиях карьеров [1]. Серьезная научная работа и анализ литературы по теме исследований настоящей работы отражены в [2,3]. В указанных источниках можно найти подробную информацию о разработке волоконно-оптических датчиков. Теоретической основой для разработки длиннобазовых деформометров послужила работа [4], в которой представлены результаты исследований длиннобазовых деформометров, предназначенных для мониторинга механических состояний крупномасштабных объектов. Авторам удалось частично решить важную проблему снижения фединга выходного сигнала деформометра при изменении внешней температуры. В [4] отмечено отсутствие сведений об испытании опытного образца волоконно-оптического датчика (ВОД) и его внедрении. Для ВОД на основе интерферометра Маха–Цендера существует проблема возникновения фединга выходного сигнала деформометра при изменении внешней температуры и появления ложных сигналов о смещении горных пород. Также можно отметить довольно сложную конструкцию ВОД [5]. С учетом указанного выше и мирового опыта разработки ВОД для контроля деформации горных пород принято решение создать принципиально новую упрощенную конструкцию длиннобазовых деформометров, функционирующих на совершенно ином принципе, с последующим использованием их для систем мониторинга предупреждения обрушения бортов карьеров.

Предложенный метод контроля деформации основан на известных принципах возникновения дополнительных потерь в оптическом волокне (ОВ) при механическом воздействии на него. Разработанный амплитудный ВОД проходящего типа имеет довольно простую конструкцию. На рис. 1 представлена измерительная схема ВОД, которая была использована при проведении эксперимента. Предложенная конструкция ВОД схожа с конструкцией ВОД, описанной в [5], но отличается от нее принципом функционирования измерительной части. Ее основой является одномодовое оптическое волокно типа G 652 (9/125 μm), которое эффективно работает в диапазоне длин световой волны от 1310 до 1625 nm с достаточно низкими потерями (до 0.2 dB/km). Это позволяет иметь довольно протяженный измерительный канал, а также располагать ВОД на расстоянии до 30 km от блока обработки данных [1].

Преимущества использования ВОД (их способность работать во взрывоопасных средах и низкое энергопотребление) описаны в [1–3,5]. Приборы, используемые в эксперименте: источник оптического излучения SmartPocket OLS-34/35/36 (США); измеритель оптической мощности SmartPocket OLP-38 (США) с погрешностью измерений $\pm 3\%$ и динамическим диапазоном измерения от -50 до $+26$ dB; измерительная шкала с ценой деления 1 mm и погрешностью измерения 0.5 mm. Смещение подвижной части датчика измерено при помощи линейки. Температура в помещении лаборатории колебалась от 23 до 25°C. Граничные условия смещения подвижной части относительно неподвижной: от 0 до 15 mm. В качестве компенсационной катушки использован одномодовый волоконно-оптический патч-

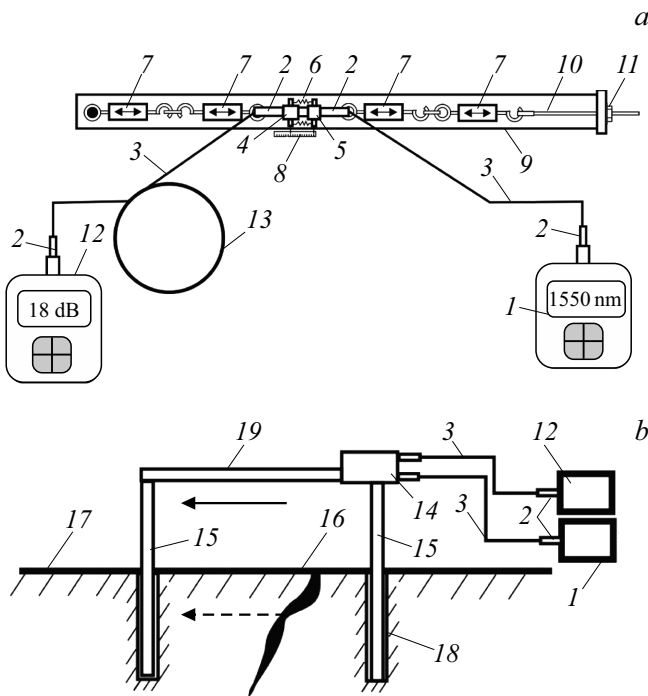


Рис. 1. Схема проведения эксперимента. 1 — источник излучения с длиной волны от 1310 до 1625 нм (полупроводниковый лазер), 2 — оптический коннектор SC, 3 — оптический одномодовый патч-корд, 4 — подвижная часть ВОД, 5 — неподвижная часть ВОД, 6 — пружина, 7 — натяжные муфты, 8 — измерительная шкала, 9 — основание для крепления элементов схемы, 10 — регулировочная шпилька М6, 11 — натяжная гайка М6, 12 — измеритель оптической мощности, 13 — компенсационная катушка, 14 — ВОД, 15 — репер, 16 — растущая трещина (с указанием направления), 17 — поверхность земли, 18 — шпур для погружения репера, 19 — соединительная балка. *a* — схема лабораторного стенда, *b* — схема размещения ВОД.

корд длиной 30 м с коннекторами типа SC. Подключение ВОД к источнику излучения и измерителю оптической мощности осуществлялось при помощи двух одномодовых волоконно-оптических патч-кордов через универсальный адаптер UPP 2.5 mm и оптические коннекторы типа SC. В реальных условиях эксплуатации системы на карьере диапазон температур колеблется в широких пределах, что может сформировать определенные помехи и нарушить процесс измерения. В дальнейшем при практических испытаниях в реальных условиях измерительные приборы, используемые в экспериментах, будут заменены аппаратно-программным комплексом контроля, который будет корректировать полученные от сенсоров данные с учетом изменения температуры. В отличие от интерферометра, который может реагировать на изменение температуры от 1°C, лабораторный образец предложенной системы не реагировал на изменение температуры в пределах 3°C, что позволяет предположить меньшую зависимость от изменения температуры.

Предложенный ВОД работает следующим образом: световая волна проходит от источника излучения 1 через датчик 14 к измерителю оптической мощности 12. При помощи натяжных муфт 7 устанавливается предварительное натяжение пружин 6 и обеспечивается движение подвижной части 4 относительно неподвижной 5, при их расхождении дополнительные потери возрастают в линейной зависимости. В начальном положении уровень дополнительных потерь минимальный и формируется элементами схемы. ВОД представляет собой две оптические ферулы диаметром 2.5 mm, расходящиеся на некоторое расстояние друг от друга, при этом они размещены в трубчатом световоде. Для исследуемого ВОД максимальное расстояние между ферулами равно 15 mm. Для увеличения зоны контроля необходимо увеличить длину ферул и трубки световода. В дальнейшем предложенный датчик будет модернизирован для увеличения его измерительной базы от 15 до 200 mm, а при необходимости и более за счет использования редукторного механизма, позволяющего подобрать необходимые параметры перемещения реперов. Также будет увеличена длина оптических ферул до 100 mm, что совместно с редукторным механизмом позволит увеличить измерительную базу датчика. Точность измерения будет достигаться путем повторной калибровки.

На рис. 2 приведена фотография опытного образца ВОД для контроля деформации горных пород, а также показана конструкция натяжного механизма.

На рис. 3 представлена зависимость дополнительных потерь оптической мощности от расстояния между ферулами в трубчатом световоде. Погрешность измерений может составлять примерно до 5%, т. е. ±0.2 dB.

В рамках данной модели ввиду экспериментальной направленности настоящей работы ограничимся методами геометрической и классической волновой оптики, не вдаваясь на этом этапе исследований в микроскопические релаксационные механизмы, связанные со взаимодействием регистрируемой световой волны (оптического сигнала) с веществом оптоволоконного элемента (одного из основных рабочих элементов датчика деформаций) [4], и в квантовую природу оптико-механических явлений в материале исследуемого экспериментального образца [6]. В общем случае запишем выражение для расчета теоретических значений измеряемой в эксперименте объемной плотности мощности электромагнитного поля волны (предварительно усредненной по периоду волны)

$$P_{V_i}(d; \theta; \alpha_0) = 2 \langle \text{Re}[\mathbf{E}] \times \text{Im}[i\omega \epsilon_0 \hat{\epsilon} \mathbf{E}] \rangle_T = \omega \epsilon_0 \text{Re}[\hat{\epsilon}] \times \mathbf{E}_0^2,$$

детектируемой чувствительным элементом экспериментального датчика деформаций, после преломления исходящего (первичного оптического сигнала) в деформированном образце:

$$\langle P_{V_i}(d; \theta; \alpha_0) \rangle_{\alpha_0} = \frac{2\omega}{c\pi} \int_0^\pi I(\alpha_0) n_\infty(d; \theta; \alpha_0) d\alpha_0.$$

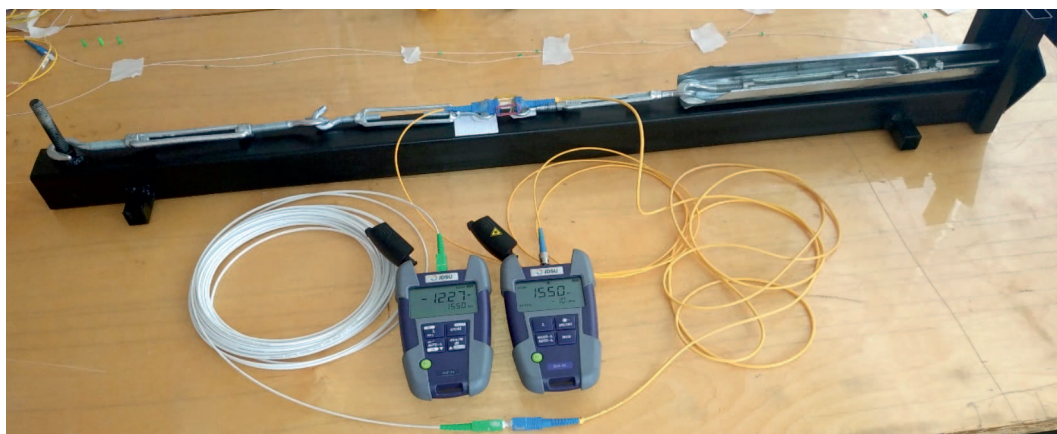


Рис. 2. Фотография опытного образца ВОД.

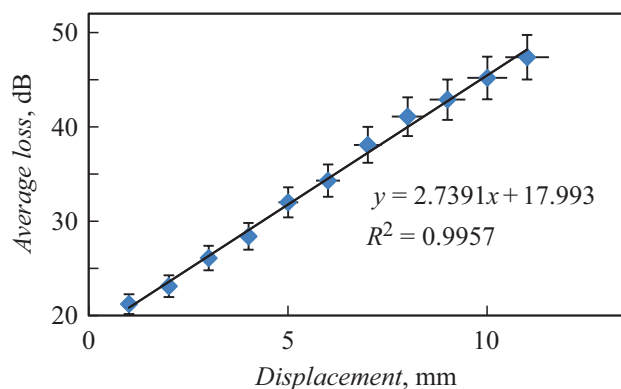


Рис. 3. Зависимость роста дополнительных потерь от смещения.

Здесь расчетная величина высокочастотного показателя преломления оптоволокна $n_{\infty}(d; \theta; \alpha_0)$ вычисляется в функции геометрических параметров (d — толщина образца, θ и α_0 — углы падения луча на поверхность ОБ и на поверхность чувствительного регистрирующего элемента соответственно) с учетом времени релаксации для электрооптических процессов в ОБ; $I(\alpha_0)$ — интенсивность оптического сигнала (преломленного в ОБ), распределенная по углу α_0 ; ω — круговая частота световой волны; c — скорость света в вакууме.

Таким образом, разработанный ВОД имеет довольно высокую линейность и стабильность выходного сигнала. Датчик не подвержен негативному возникновению фединга, свойственному ВОД, созданным на основе интерферометра Маха–Цендера, при колебаниях внешней температуры и появлению ложных сигналов о смещении горных пород.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] А.Д. Мехтиев, Е.Г. Нешина, П.Ш. Мадиди, Д.А. Горохов, Безопасность труда в промышленности, № 4, 19 (2021). DOI: 10.24000/0409-2961-2021-4-19-26
- [2] Ch. Lanciano, R. Salvini, Sensors, **20**, 1924 (2020). DOI: 10.3390/s20071924
- [3] T. Liu, Y. Wei, G. Song, B. Hu, L. Li, G. Jin, J. Wang, Y. Li, C. Song, Z. Shi, L. Zhao, J. Hu, W. Zhao, M. Hou, R. Li, J. Wang, Measurement, **124**, 211 (2018). DOI: 10.1016/j.measurement.2018.03.046
- [4] В.А. Калытка, А.Д. Мехтиев, А.В. Баширов, А.В. Юрченко, А.Д. Алькина, Изв. вузов. Физика, № 2, 91 (2020). DOI: 10.17223/00213411/63/2/91 [V.A. Kalytko, A.D. Mekhtiev, A.V. Bashirov, A.V. Yurchenko, A.D. Al'kina, Russ. Phys. J., **63** (2), 282 (2020). DOI: 10.1007/s11182-020-02033-3].
- [5] О.Т. Каменев, Ю.Н. Кульчин, Ю.С. Петров, Р.В. Хижняк, Письма в ЖТФ, **40** (3), 49 (2014). [O.T. Kamenev, Yu.N. Kul'chin, Yu.S. Petrov, R.V. Khizhnyak, Tech. Phys. Lett., **40** (2), 119 (2014). DOI: 10.1134/S1063785014020096].
- [6] V.A. Kalytko, A.D. Mekhtiev, P.Sh. Madi, A.V. Bashirov, J. Phys.: Conf. Ser., **2140**, 012028 (2021). DOI: 10.1088/1742-6596/2140/1/012028