

УДК 681.586

ПРИМЕНЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН В АНАЛИЗЕ ГЛУБОКИХ ФУНДАМЕНТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Д.Р. Денев, гл. ассистент, д-р, инж. Шуменского университета им. Епископа
Константина Преславского, Факультет технических наук, кафедра Коммуни-
кационной и компьютерной техники, г. Шумен, Болгария
e-mail: d.denev@shu.bg

Аннотация: *Распределенные оптические сенсорные системы (DFOS) с высоким пространственным разрешением широко используются для мониторинга деформаций, изменений температуры и напряжений в глубоких фундаментных конструкциях. Технология DFOS позволяет детально измерять спектральную дисперсию и смещения по длине каждого оптического волокна, предоставляя высокоточные данные о распределении температур и напряжений в сваях. Сезонные колебания температуры влияют на напряжения в слоистых грунтах, что влияет на профили напряжений. Полученные данные дают ключевую информацию о динамике взаимодействия окружающей среды и поведении конструкций фундамента при различных нагрузках и температурных условиях.*

Ключевые слова: *оптические измерения, температурный эффект, датчики*
Abstract: *Distributed Optical Sensing Systems (DFOS) with high spatial resolution are widely used in monitoring deformations, temperature variations and stresses in deep foundation structures. DFOS technology enables detailed measurement of spectral dispersion and displacements along the length of each optical fiber, providing high-precision data on the distribution of temperatures and stresses in the piles. Seasonal temperature fluctuations affect the stress in layered soils, which affects the stress profiles. The obtained data provide key information about the dynamics of interaction between the environment and the behavior of the foundation structures under different loads and temperature conditions.*

Keywords: *optical measurement, temperature effect, sensors*

ВВЕДЕНИЕ

Традиционные инструменты, такие как тензометрические датчики и динамометрические ячейки, долгое время использовались для измерения, анализа и взаимодействия с системами почвенных свай. Эти инструменты являются ключевыми для оптимизации эффективности свай, определения сопротивления по стволу и оценки распределения нагрузки при нагружении свай. Датчики деформации и сенсоры стратегически размещаются вдоль длины сваи для точного определения распределения усилий, вызванных приложенными нагрузками. В последние годы наблюдается растущий интерес к применению систем распределённых оптических датчиков (DFOS) для мониторинга напряжений и температуры в реальном времени в геотехнических конструк-

циях. Несмотря на широкое применение DFOS-систем на основе эффекта Бриллюэна в таких задачах, последние исследования начинают изучать потенциал DFOS-систем на основе эффекта Релея для мониторинга свай. Этот переход к оптической технологии ознаменовал значительный прорыв в геотехнической аппаратуре, обеспечивая улучшенную пространственную разрешающую способность и потенциал для непрерывного мониторинга с высокой точностью на протяжении длительных периодов.

РАСПРЕДЕЛЁННЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ АНАЛИЗАТОРЫ И КАБЕЛИ

Система DFOS состоит из двух основных элементов: оптического спектрального анализатора и оптического кабеля. Система включает следующие устройства: удалённый модуль, устройство опроса (IU) и выходной кабель. IU использует интерферометрию длины волны для измерения спектрального сдвига в обратном рассеянии Релея. Максимальная длина датчика устройства, использованного в рассматриваемом тесте, составила 20 м, а пространственное разрешение и разрешающая способность измерений составили соответственно 5,2 и 2,6 мм. Разрешающая способность измерений определяется как расстояние между двумя точками данных. В качестве датчиков могут использоваться оптические кабели ФО, стандартные телекоммуникационные волокна без покрытия или коммерчески доступные кабели с покрытием для измерения напряжений и температуры.

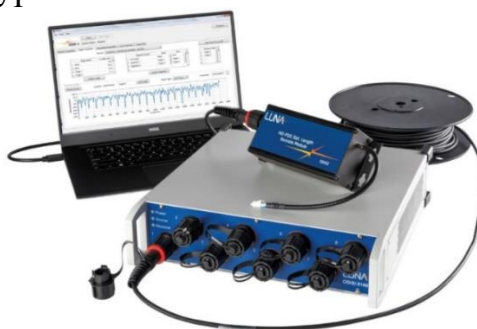


Рисунок 1 - Система измерения [6]

IU выполняет спектральное измерение оптических волокон. Это измерение прямо пропорционально температуре или изменению напряжения и обратно пропорционально свойствам волокна. Для стандартных телекоммуникационных волокон значения и коэффициенты могут варьироваться до 10%. В данном исследовании были выполнены измерения с использованием коэффициентов деформации и температуры ($0,634\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{GHz}$ и $-6,67\text{ }\mu\epsilon\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{GHz}$). Согласно данным производителя, точность IU составляет $\pm 25\text{ }\mu\epsilon$. После выполнения измерений был проведён сравнительный анализ с данными, полученными с помощью эталонного экстензометра, работающего в диапазоне от 0 до 10 000 $\mu\epsilon$. Его точность, составляющая 0,25%, аналогична точности коммерчески доступных вибрационных тензометрических датчиков. [3]

МОНТАЖ ОПТИЧЕСКИХ КАБЕЛЕЙ НА СВАИ

Распределённые кабели типа ФО традиционно делятся на две категории: кабели для передачи данных и маршрутизации. Первая категория используется для обработки и передачи информации, связанной с деформациями или

температурами. Вторая — для соединения сенсорной части с ИУ. При прокладке маршрутизирующих кабелей требуется использовать ФО-кабели со стабильными физическими свойствами. Обе категории соединяются с помощью оптического адаптера. Первый вариант соединения обеспечивает меньшие оптические потери по сравнению со вторым, однако безопасное выполнение пайки на месте может быть затруднительным. Поэтому ФО-кабели должны быть хорошо защищены. Основное преимущество внешней укладки кабелей заключается в их доступности для ремонта. Установка двух пар таких датчиков обеспечит резервную защиту в случае повреждения ФО-кабеля или предоставит возможность независимой проверки неожиданных результатов [4].

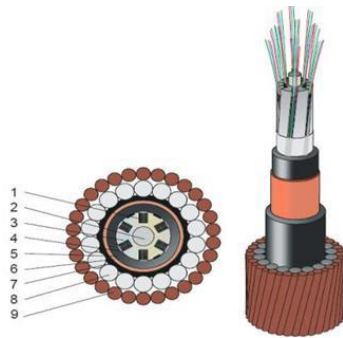


Рисунок 2 - Поперечное сечение ФО-кабеля [2]

Перед креплением ФО-кабеля к связке проводов стальная поверхность должна быть отполирована, обезжирена или очищена. Кабель ФО следует прикрепить к поверхности пучка проводов и покрыть эпоксидной смолой. Кабели размещаются в каналах и фиксируются с помощью эпоксидного клея. Перед тем как натянутые оптические кабели будут прикреплены к конструкции, рекомендуется предварительно натянуть кабель на величину, превышающую ожидаемое сжимающее напряжение. Предварительное натяжение между двумя известными точками вдоль элемента позволяет согласовать шкалу длины оптического кабеля. После установки ФО-кабеля на конструкции должны быть определены ключевые точки (головка сваи, определённые глубины и основание сваи). Следует избегать резких изгибов ФО-кабелей, так как это может привести к потере сигнала. Для оптических кабелей затухание может быть выражено через коэффициенты:

$$\alpha(dB/km) = -\frac{10}{L} \log_{10} \frac{P_{IN}}{P_{OUT}} \quad (1)$$

$$\beta(dB/km) = -\frac{10}{L} \log_{10} \frac{P_{IN}}{P_{OUT}} \quad (2)$$

Где P_{OUT} оптическая мощность на конце волокна, P_{IN} - мощность на входе волокна, а L — длина волокна. Для различных длин волн в диапазоне от $1535nm$ до $1560nm$ дисперсия может быть вычислена по формуле:

$$D(\lambda) = \left\{ \frac{d(1565nm) - D(1530nm)}{29} * (1665nm - \lambda) \right\} + D(1565nm) \quad (3)$$

$$(\lambda) = D(1565nm) + \sqrt[2]{(1665nm - \lambda)} \quad (4)$$

На основе вышеизложенного в таблице 1 приведены основные параметры оптических кабелей

Таблица 1 - Основные параметры оптических кабелей

Параметры	Лёгкие кабели	Одно экранные	Двух экранные
Номинальная сила на разрыв (кН)	44	132	186
Максимальная сила на разрыв (кН)	65	180	257
Внешний диаметр (мм)	10	20	31
Вес в воздухе (кг/м)	0,88	1,7	3,3
Вес в земле (кг/м)	0,65	1,4	2,8
Максимальное количество волокон	24	24	24

АНАЛИЗ ДАННЫХ И ИСПЫТАНИЯ

Измерения всегда относятся к начальному состоянию напряжения (или температуры) в кабеле. Поэтому важно установить надёжное эталонное значение измерений. Первоначальные данные состоят из нескольких измерений, проводимых при изменении процесса строительства, начиная с начальной установки и до начала испытаний или мониторинга изменений с течением времени. Каждый тест должен выполняться за короткий промежуток времени, чтобы исключить ошибки или помехи.

Распределённые ФО-датчики чувствительны как к напряжениям, так и к температурным изменениям. Поэтому для получения механически вызванных деформаций измеренные данные необходимо компенсировать с учётом температурных изменений [5].

Когда к CFA прилагается статическая нагрузка, распределение напряжения строится в зависимости от напряжения отдельного оптоволоконного кабеля. Это напряжение считывается как двенадцать ступеней нагрузки. Маленькие кружочки на графике 3 изображают деформации с увеличением максимальной нагрузки VW и разделены на четыре измеренных уровня. Каждый уровень, измеренный двумя системами, согласуется наиболее правильно. Вертикальная сплошная линия изображает фундаментальную структуру. Из диаграммы видно, что в оптоволоконном кабеле наблюдается локальное падение напряжения относительно проблемных зон усиления.

При измерении краткосрочных и долгосрочных изменений температуры на глубине в конструкциях, где температура варьируется в зависимости от сезона, важны определённые соображения. Данные температуры были зарегистрированы устройством VW, установленным на одной из стальных свай. График показывает, что температурный диапазон конструкции составляет 8 °C на глубине 1 м и не превышает 0,4 °C на глубине 5 м. Согласно стандарту IEEE, температура на значительной глубине должна соответствовать среднегодовой температуре воздуха в данном регионе. Данные, полученные на других тестовых площадках, демонстрируют схожие результаты. [6]

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предыдущие исследования подтвердили соответствие данных, полученных с помощью тензодатчиков VW и распределённых оптических кабелей на сваях. Настоящее исследование также подтверждает согласованность двух

инструментальных систем. Системы ФО обладают преимуществом перед традиционными периодическими измерениями (такими как тензометры VW или съёмные экстензометры), так как они обеспечивают непрерывную регистрацию деформаций и температуры. Анализаторы на основе эффекта Бриллюэна обеспечивают пространственное разрешение 0,5–1,0 м и разрешение выборки несколько сантиметров. В данном исследовании был использован анализатор на основе эффекта Рэлея с пространственным разрешением 5,2 мм и разрешением выборки 2,6 мм, что позволило выявлять трещины в конструкциях или локальные изменения жёсткости свай. Температурные изменения всегда будут влиять на ФО-кабели, независимо от материала конструкции, к которому они прикреплены. Это связано с температурной зависимостью показателя преломления сердцевины волокна.

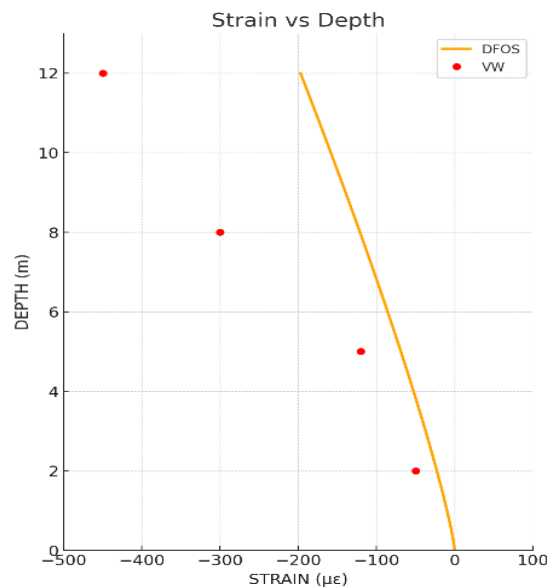


Рисунок 3 - Распределение деформации, полученное от датчиков, при увеличении нагрузки

Список литературы

1. Hua Z., Jingdong Z., Nan G., Distributed Optical Fiber Sensor for Dynamic Measurement, 2021, Journal of Lightwave Technology Volume: 39, Issue: 12, ISSN: 0733-8724 DOI: 10.1109/JLT.2020.3039812, pp. 3801 – 3811
2. Kersey D., Davis A., Patrick J., Fiber Grating Sensors, 2010, Journal of Lightwave Technology Volume: 15, ISSN: 0733-8724 pp. 1442-1463.
3. Klar A., Bennett J., Soga K., Distributed Strain Measurement for Pile Foundations, 2006, Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering 159, ISSN 1353-2618, pp. 135-144
4. Kreger S., Gifford K., Froggatt E., High Resolution Distributed Strain or Temperature Measurements in Single and Multi-Mode Fiber Using Swept-Wavelength Interferometry, 2015, Optical Fiber Sensors. Optical Society of America.
5. Mohamad H., Soga K., Pellew A., Performance Monitoring of a Secant-Piled Wall Using Distributed Fiber Optic Strain Sensing, 2011, ASCE Journal

of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 137(12), DOI:
10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000543, pp. 1236-1243.

6. Sorensen K., Fellenius B., Application of Distributed Fibre Optic Cables in Piles, 2020, Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA Vol. 51, No. 3, ISSN 0046-5828, pp. 1-9