

УДК 621.372.8.029.7 : 681.586.36

## ДАТЧИК КОНТРОЛЯ БЕЗОПАСНОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ МИКРОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДОВ С НЕСКОЛЬКИМИ СЕРДЦЕВИНАМИ

Гончаренко И.А., д.ф.-м.н., доцент, Рябцев В.Н.  
Командно-инженерный институт МЧС Республики Беларусь  
e-mail:mail@kii.gov.by

*Описан оптический датчик, позволяющий измерять направление и величину изгибов и напряжения в строительных конструкциях. Чувствительным элементом датчика является микроструктурированное волокно с тремя сердцевинами. Проанализировано распределение полей мод в сердцевинах волокна в зависимости от величины его изгиба и структуры. Описана оптимизация параметров чувствительного элемента датчика в зависимости от его назначения.*

*In paper the optical sensor allowing measuring both a direction and bend and stress values in building structures is described. The sensitive element of the sensor is the microstructured fibre with three cores. Distribution of mode fields in fibre cores depending on fibre structure and bend value is analysed. The optimisation of the sensitive element parameters depending on the purpose of use is proposed.*

(Поступила в редакцию 27 января 2011 г.)

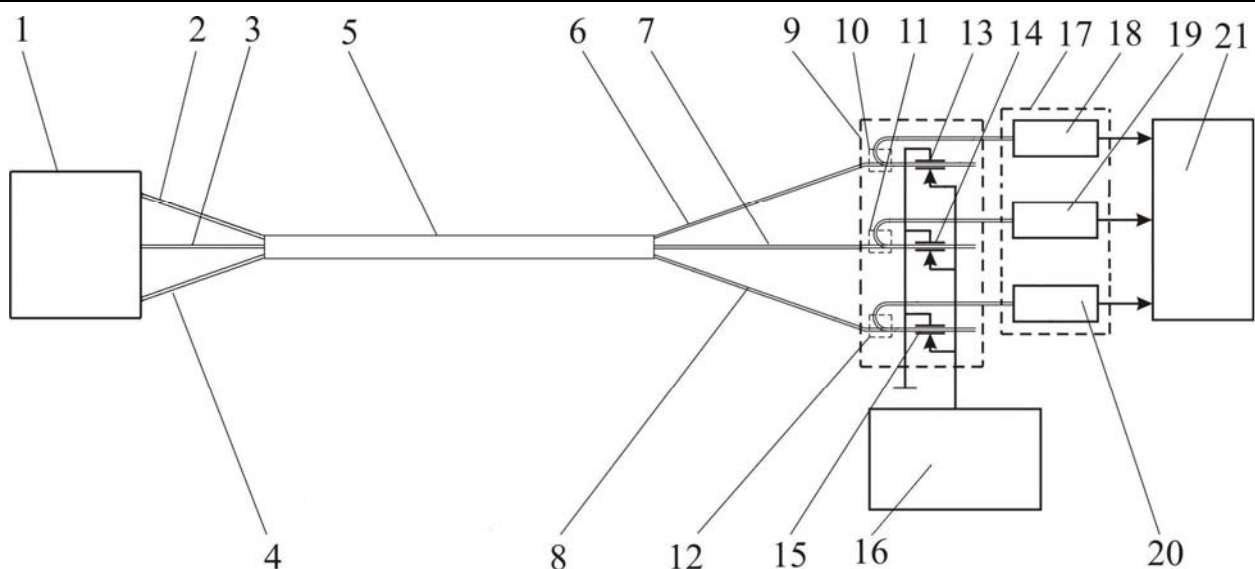
### ВВЕДЕНИЕ

Для того чтобы обеспечить безопасное функционирование зданий, мостов, туннелей, дамб и других сооружений, необходимо осуществлять постоянный контроль за их состоянием, т. е. измерять напряжения, нагрузки, вибрации конструкций и материалов, изменение их температуры и т. д. В последнее время для этих целей активно используются волоконно-оптические датчики [1–3]. Датчики на основе оптического волокна имеют значительные преимущества перед традиционными устройствами. Они имеют высокую механическую прочность, стойкость к повышенным температурам, вибрациям и другим воздействиям окружающей среды, химически инертны, позволяют производить бесконтактные и дистанционные измерения. Сенсоры на основе волокна не подвержены временному дрейфу и потому не требуют перекалибровки. Внедрив волоконно-оптические сенсоры в структуру сооружений, можно отслеживать изменение их состояния в течение времени, собирая на центральном пункте слежения большое число непрерывных измерений.

В работе рассмотрены структурная схема и принципы функционирования векторного датчика изгибов и напряжений на основе микроструктурированного волокна [4], который может быть использован в качестве точного измерителя величины и направления изгиба и напряжений различных деталей строительных конструкций, проведена оптимизация параметров датчика в зависимости от его назначения.

### СТРУКТУРНАЯ СХЕМА И ПРИНЦИП РАБОТЫ ДАТЧИКА

Структурная схема датчика представлена на рис. 1. Сенсорным элементом устройства служит микроструктурированное волокно. Микроструктурированные волокна – это волокна, изготовленные из диэлектрического материала с периодической решеткой воздушных отверстий по длине волокна [5]. Такие волокна проводят свет на основе двух различных эффектов: эффекта фотонной запрещенной зоны или из-за разности эффективных показателей преломления между областью дефекта, которая формирует сердцевину, и остальной периодической областью, которая действует как оболочка.



1 – широкополосный источник излучения; 2 – первое подводящее оптическое волокно; 3 – второе подводящее оптическое волокно; 4 – третье подводящее оптическое волокно; 5 – микроструктурированное волокно; 6 – первое выводящее оптическое волокно; 7 – второе выводящее оптическое волокно; 8 – третье выводящее оптическое волокно; 9 – управляемый спектральный фильтр; 10 – первый Y-образный разветвитель; 11 – второй Y-образный разветвитель; 12 – третий Y-образный разветвитель; 13 – первая волоконно-оптическая брэгговская решетка; 14 – вторая волоконно-оптическая брэгговская решетка; 15 – третья волоконно-оптическая брэгговская решетка; 16 – блок управляющего напряжения; 17 – блок фотоприемников; 18 – первый фотоприемник; 19 – второй фотоприемник; 20 – третий фотоприемник; 21 – измеряющее устройство

**Рисунок 1 – Структурная схема волоконно-оптического векторного датчика изгиба**

Датчик состоит из широкополосного источника излучения 1 в виде матрицы светодиодов, подводящих оптических волокон 2–4, микроструктурированного волокна 5 с тремя сердцевинами (чувствительного элемента), выводящих оптических волокон 6–8, спектрометра 9, Y-образных разветвителей 10–12, волоконно-оптических брэгговских решеток (ВБР) 13–15, блока управляющего напряжения 16, блока фотоприемников 17 и измеряющего устройства 21.

При подаче на управляющие электроды ВБР управляющего напряжения происходит изменение показателя преломления в электрооптическом материале, что приводит к изменению длины световой волны  $\lambda$ , при которой отражение от ВБР максимально. Свет от широкополосного источника излучения 1 одновременно поступает через подводящие оптические волокна на соответствующие входы сердцевины микроструктурированного волокна 5. Изгиб микроструктурированного волокна 5 приводит к перераспределению оптической мощности световых мод между сердцевинами [6, 7]. Разность между амплитудами мод в различных сердцевинах возрастает с уменьшением радиуса изгиба. Таким образом, сравнивая измеренную мощность в сердцевинах микроструктурированного волокна, можно определить величину радиуса изгиба волокна. Изменение направления изгиба приводит к противоположному распределению полей мод. Направление изгиба определяется по соотношению амплитуд излучения отдельных диапазонов длин волн в сердцевинах микроструктурированного волокна.

С выходов сердцевины микроструктурированного волокна 5 свет поступает через выводящие оптические волокна на соответствующие входы управляемого спектрального фильтра 9, которые являются одновременно входами Y-образных разветвителей. С первых выходов Y-образных разветвителей свет поступает на ВБР, которые отражают излучение с одной и той же длиной волны в обратном направлении. Отраженное излучение, пройдя соответствующие Y-образные разветвители, поступает на фотоприемники блока фотоприемников 17, где и регистрируется. Электрические сигналы, пропорциональные амплитудам световых мод с выхода первого 18, второго 19 и третьего 20 фотоприемников блока фотоприемников 17, поступают одновременно в измеряющее устройство 21 для определения необходимых параметров.

Датчики подобного типа могут применяться как для измерения изгибов и смещений строительных конструкций, так и для измерений их внутренних напряжений. В связи с этим возникает необходимость разработки и оптимизации сенсорных элементов датчиков в зависимости от условий их использования. Для этого необходимо провести расчет распределения полей в сердцевинах волокна и оценить его зависимость от изгибов и структуры волокна.

### РАСЧЕТ ПОЛЕЙ МОД И ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ ДАТЧИКА

Для расчета распределения полей мод и дисперсионных характеристик микроструктурированных волокон с несколькими сердцевинами использовался алгоритм, основанный на методе линий [8–11]. На основе разработанного алгоритма были рассчитаны эффективные показатели преломления и поперечное распределение полей, распространяющихся по волокну мод при различных величинах изгиба, а также различных параметрах волокна (отношения диаметра отверстия  $d$  к расстоянию между отверстиями  $\Lambda$ , разнесения сердцевин).

Результаты расчетов приведены на рис. 2–4. На рис. 2 представлены контурные изображения распределения интенсивности оптического излучения с длиной волны  $\lambda = 1,5$  мкм в сердцевинах изогнутого микроструктурированного волокна с разнесением сердцевин в два отверстия,  $d/\Lambda = 0,2$  и радиусом изгиба  $R = 10$  см (см. рис. 2, *a*) и  $d/\Lambda = 0,4$ ,  $R = 25$  см (см. рис. 2, *б*), а также разнесением в пять отверстий,  $d/\Lambda = 0,2$ ,  $R = 25$  см (см. рис. 2, *в*).

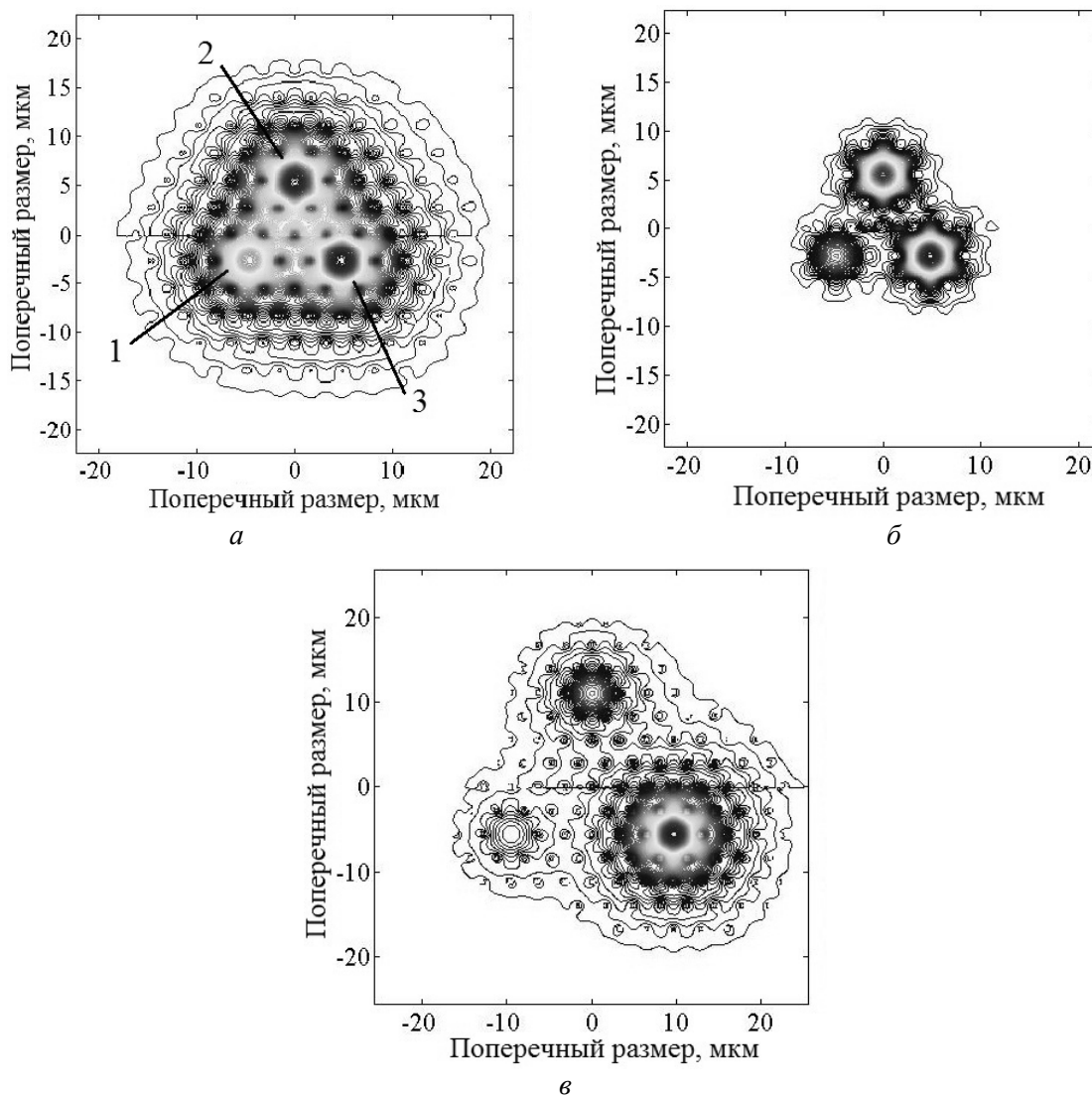
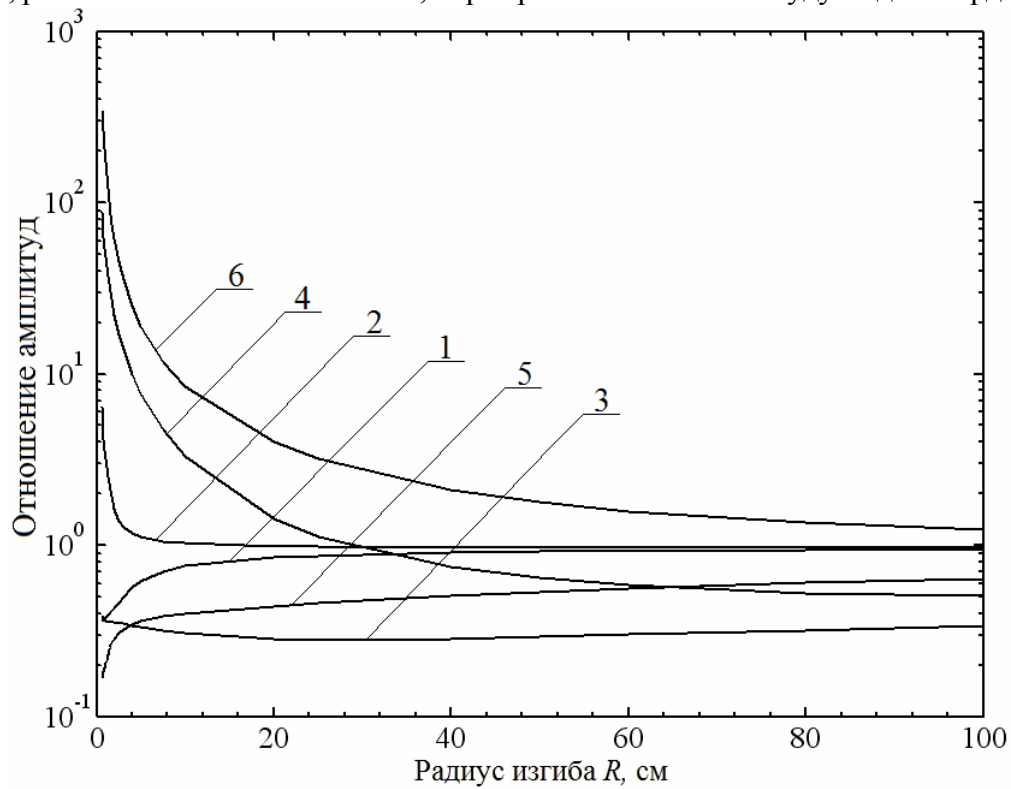
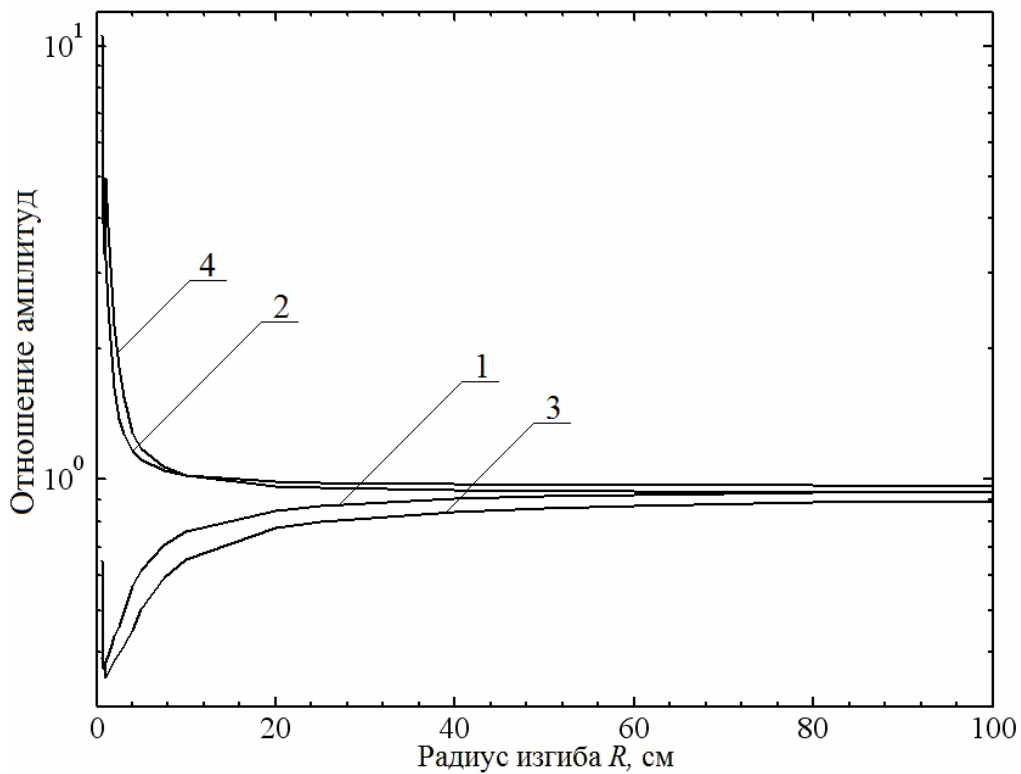


Рисунок 2 – Контурное изображение распределения интенсивности оптического излучения в сердцевинах изогнутого микроструктурированного волокна

На рис. 3 приведены максимальные значения амплитуд полей мод в сердцевинах 1 и 3 волокна, расположенных на оси изгиба, нормированных на амплитуду моды в сердцевине 2.

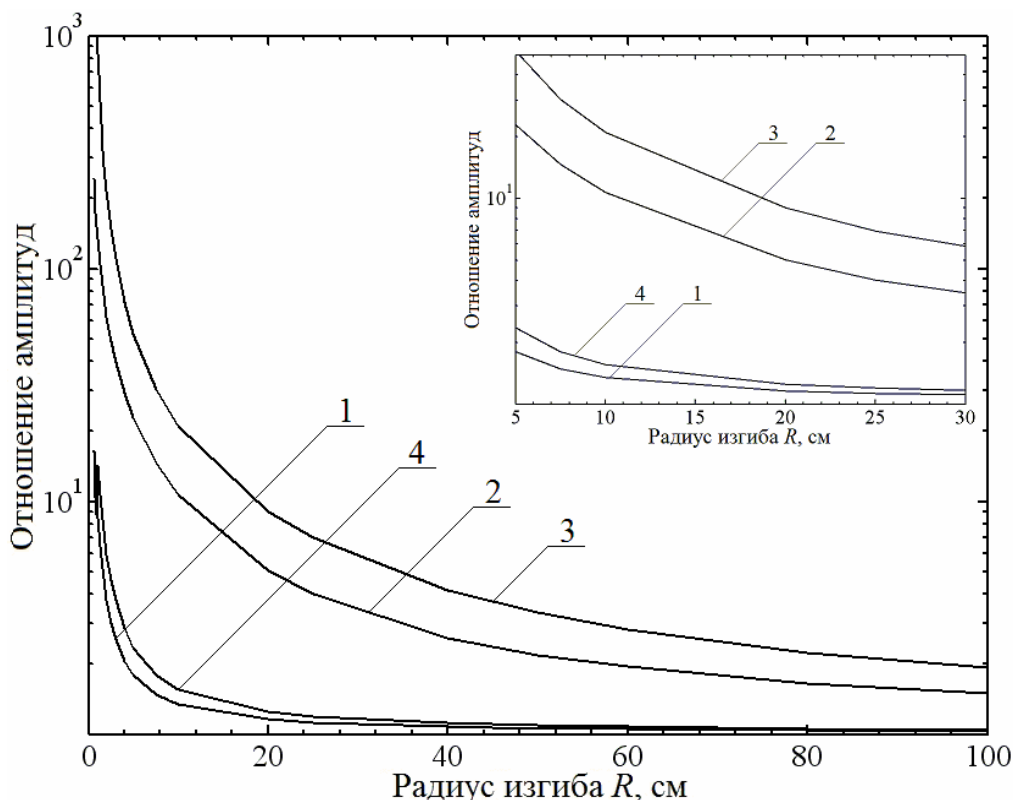


*a*



*б*

Рисунок 3 – Максимальные значения амплитуд полей мод в сердцевинах волокна, расположенных на оси изгиба



**Рисунок 4 – Относительные амплитуды полей в сердцевинах, расположенных на оси изгиба**

Номера сердцевин показаны на рис. 2, а. Кривые 1 и 2 описывают, соответственно, распределение мод в 1-й и 2-й сердцевинах волокна с  $d/\Lambda = 0,2$  и разнесением сердцевин в два отверстия, кривые 3 и 4 – в сердцевинах волокна с  $d/\Lambda = 0,4$ , разнесением в два отверстия, 5 и 6 – в волокнах с  $d/\Lambda = 0,2$  и разнесением в пять отверстий для излучения с длиной волны  $\lambda = 1,5$  мкм (см. рис. 3, а). Кривые 3 и 4 (см. рис. 3, б) построены при параметрах, аналогичных, соответственно, кривым 1 и 2, но для  $\lambda = 1,3$  мкм.

На рис. 4 показаны относительные амплитуды полей в правой и левой по отношению к изгибу сердцевинах для волокон с разнесением сердцевин в два отверстия и  $d/\Lambda = 0,2$  (кривая 1),  $d/\Lambda = 0,4$  (кривая 2) и разнесением в пять отверстий и  $d/\Lambda = 0,2$  (кривая 3) для длины волны  $\lambda = 1,5$  мкм. Кривая 4 построена для параметров, аналогичных кривой 1, но для  $\lambda = 1,3$  мкм.

Как следует из рисунков, при изгибе волокна происходит перераспределение энергии моды между сердцевинами. Причем отношение оптических мощностей, распространяющихся по двум сердцевинам, расположенным на направлении изгиба, определяет его величину, а относительная доля оптической энергии в каждой из трех сердцевин зависит от направления изгиба. Таким образом, по соотношению интенсивностей оптического излучения в трех сердцевинах волокна можно определить как направление, так и величину его изгиба. Например, на рис. 2 направление изгиба соответствует линии, соединяющей сердцевин 1 и 3, и перераспределение оптической энергии вследствие изгиба происходит в основном между этими сердцевинами. При изменении направления изгиба на  $60^\circ$  перераспределение энергии происходит в основном между сердцевинами 1 и 2 и т. д.

Волокна с большим отношением диаметров воздушных отверстий  $d$  к расстоянию между отверстиями  $\Lambda$ , т. е. с большим воздушным заполнением, а также волокна с большим разнесением сердцевин оказываются более чувствительными к изгибам. В таких волокнах поля мод сильнее сконцентрированы в отдельных сердцевинах, и любое нарушение стационарных условий приводит к значительной перекачке энергии из одной сердцевины в другую. В волокнах с

меньшими величинами отношения  $d/\Lambda$  или меньшим разнесением сердцевин поля мод в различных сердцевинах сильнее взаимодействуют друг с другом, и такая конфигурация оказывается более устойчивой к внешним воздействиям. Так для волокон с  $d/\Lambda = 0,2$  и разнесением сердцевин в два отверстия заметная перекачка оптической мощности между сердцевинами происходит при радиусах изгиба порядка 500 см, а при увеличении разнесения сердцевин до пяти отверстий – при  $R$ , меньших 900 см. Резкое увеличение концентрации мощности в одной сердцевине, которая уже непригодна для измерения, и сопутствующие этому большие потери на излучение наступают для таких волокон при радиусах изгиба соответственно около 1,5 и 10 см.

Уменьшение длины волны оптического излучения также приводит к увеличению чувствительности датчика. Но поскольку изменение  $\lambda$  возможно лишь в ограниченном диапазоне, то таким образом можно только незначительно увеличить перекачку мощности мод из одной сердцевины в другую при изгибе волокна.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе проанализированы структура и принципы функционирования оптического векторного датчика изгибов и напряжений на основе микроструктурированного волокна с несколькими сердцевинами. Проведена его оптимизация на основе численных расчетов параметров и распределения полей мод по сердцевинам волокна при различных величинах изгиба. Проведенное моделирование показало, что для измерения гибких конструкций, подверженных большим изгибам, удобнее использовать волоконно-оптические датчики, сенсорным элементом которых служит волокно с малым разнесением сердцевин и малым воздушным заполнением (меньшим  $d/\Lambda$ ). Такие датчики будут обладать большим диапазоном измерения величины изгиба. Например, волокно с  $d/\Lambda = 0,2$  и разнесением сердцевин в два отверстия позволяет измерять изгибы до  $R = 1,5$  см. Волокна с большим значением  $d/\Lambda$  и/или большим разнесением сердцевин более чувствительны к изгибу. Поэтому их целесообразнее использовать для измерения малых изгибов и отклонений жестких строительных конструкций, т. е. тех эффектов, которые вызывают внутренние напряжения в таких элементах и могут приводить к их разрушениям. Например, волокна с  $d/\Lambda = 0,4$  позволяют измерять изгибы, начиная с радиуса изгиба  $R = 800$  см. Такие датчики могут обеспечить большую точность измерения достаточно малых изгибов и отклонений строительных деталей. Следует иметь в виду, что значительное увеличение разнесения сердцевин волокна или воздушного заполнения фотонно-кристаллической оболочки приведет к тому, что сердцевинки окажутся полностью изолированными друг от друга, моды такой структуры будут соответствовать модам отдельных волокон, и перекачка оптической мощности между сердцевинами будет отсутствовать.

Меняя длину волны оптического излучения, можно корректировать чувствительность датчика на небольшую величину.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Гуляев, Ю.В. Волоконно-оптические технологии, устройства, датчики и системы / Ю.В. Гуляев [и др.] // «Фотон-экспресс» – Наука. – 2005. – № 6. – С. 114–127.
2. Гармаш, В.Б. Возможности, задачи и перспективы волоконно-оптических измерительных систем в современном приборостроении / В.Б. Гармаш [и др.] // «Фотон-экспресс» – Наука. – 2005. – № 6. – С. 128–140.
3. Connolly, C. Structural monitoring with fibre optics / Connolly C. // Europhotonics. – 2009. – № 2–3. – Р. 16–18.
4. Гончаренко, И.А. Волоконно-оптический векторный датчик изгиба : Пат. №89251 РФ / И.А. Гончаренко, А.И. Конойко, Г.В. Синицын. // Изобретения. Полезные модели. – 2009. – № 33.
5. Knight, J.C. Photonic bandgap guidance in optical fibers / J.C. Knight [et al.] // Science. – 1998. – V. 282. – Р. 1476–1478.
6. Гончаренко, И.А. Излучение и потери на изгибе в микроструктурированных волокнах с несколькими сердцевинами / И.А. Гончаренко // Вестн. Фонда фундаментальн. исслед.. – 2006. – № 3. – С. 91–98.

7. Goncharenko, I.A. Analysis of propagation of orthogonally polarized supermode in straight and curved multicore microstructured fibres / I.A. Goncharenko, M. Marciniak // *J. Telecommunications and Information Technology*. – 2007. – № 4. – P. 63–69.
8. Pregla, R. The method of lines as generalized transmission line technique for the analysis of multilayered structures / R. Pregla // *Int. J. Electron. Commun. (AEÜ)*. – 1996. – V. 50. – P. 293–300.
9. Pregla, R. The method of lines for the analysis of dielectric waveguide bends / R. Pregla // *J. Lightwave Technology*. – 1996. – V. 14. – № 4. – P. 634–639.
10. Pregla, R. Modeling of optical waveguide structures with general anisotropy in arbitrary orthogonal coordinate systems / R. Pregla // *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics*. – 2002. – V. 8. – № 6. – P. 1217–1224.
11. Helfert, S.F. The method of lines: a versatile tool for the analysis of waveguide structures / S.F. Helfert, R. Pregla // *Electromagnetics*. – 2002. – V. 22. – № 8. – P. 615–637.