

УДК 53.06: 53.08:535.8: 691.3: 699.8

## Применение волоконных световодов с сердечником и оболочкой из кварца и покрытием из пластика в качестве индикаторов появления трещин в кирпичной кладке

© 2020 г. **А. Уртадо де Мендоса-Лопес**, МАГИСТР ТЕХН. НАУК;  
**С. Хотяинцев**, КАНД. ТЕХН. НАУК;  
**Г. Х. Гузман-Ольгин**, МАГИСТР ТЕХН. НАУК;  
**Д. А. Эрнандес-Рейес**; **Х. А. Лопес-Мансера**;  
**М. А. Зуньига-Браво**, МАГИСТР ТЕХН. НАУК

Национальный автономный университет Мексики, Мехико, Мексика  
E-mail: sergeikh@unam.mx

Поступила в редакцию 07.11.2019

DOI:10.17586/1023-5086-2020-87-02-82-87

Волоконные световоды могут применяться в качестве индикаторов (свидетелей) появления трещин в кладке из строительного керамического кирпича. В настоящей работе исследована взаимосвязь между типом и размерами волоконного световода и величиной раскрытия трещины, при которой волоконный световод разрывается. Эта взаимосвязь исследована экспериментально путём физического моделирования раскрытия трещины на специальном стенде. Детально исследованы два типоразмера многомодовых волоконных световодов с сердечником и оболочкой из кварца и покрытием из полиметилметакрилата (акрила). Полученные результаты могут быть полезны для практического воплощения данного метода в виде автоматических оптико-электронных систем обнаружения растрескивания в кирпичных зданиях и сооружениях.

**Ключевые слова:** волоконные световоды, оптические волокна, оптоволоконные датчики, строительные конструкции, растрескивание кирпичной кладки.

**Коды OCIS:** 120.0120, 060.2370, 060.2400.

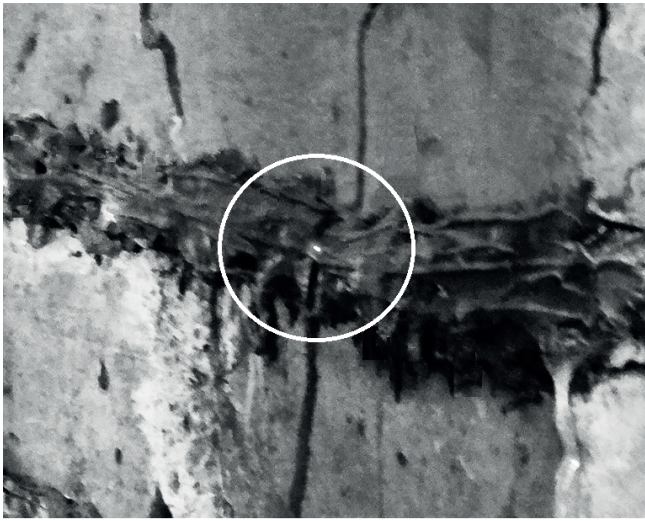
### ВВЕДЕНИЕ

Появление и рост трещин в строительных конструкциях — опасное явление, чреватое тяжелыми последствиями. Поэтому своевременное обнаружение трещин в зданиях и сооружениях имеет большое практическое значение [1]. В частности, конструкции из кирпичной кладки очень распространены во всем мире. Однако традиционные средства и методы наблюдения за трещинами в строительных конструкциях трудоёмки и не позволяют автоматизировать обнаружение трещин [2].

Среди инженеров-строителей нет единого мнения о значимости и степени опасности трещин различной ширины в строительных конструкциях. Применительно к последствиям землетрясений считается, что трещины в кирпичной кладке ши-

риной менее 0,2 мм несущественны (класс I степени опасности). Трещины шириной от 0,2 мм до 1 мм, от 1 мм до 3 мм, свыше 3 мм и свыше 3 мм в сочетании с другими повреждениями относят к II, III, IV и V классам степени опасности соответственно, где класс V степени опасности соответствует наиболее тяжким повреждениям, вплоть до полного разрушения сооружения [3]. Наибольший интерес для практики представляет раннее обнаружение трещин II–IV класса степени опасности, поскольку такая информация позволяет своевременно принять надлежащие меры и тем самым избежать более тяжелых последствий.

Одним из простых и надёжных методов индикации появления трещин служит разрыв волоконного световода, закреплённого на конструкции



**Рис. 1.** Разрыв и свечение волоконного световода, закреплённого эпоксидным клеем на кирпичной стене вследствие появления в ней трещины (фотография).

или встроенного в неё [4–7]. При этом световод играет роль разрушаемого «свидетеля» раскрытия трещины сверх некоторой пороговой величины (рис. 1).

Достоинствами волоконных световодов в данном применении является их нечувствительность к электромагнитным помехам и наводкам, разрядам молний, паразитным электрическим токам и потенциалам разной природы, а также устойчивость к химической коррозии. Указанные факторы весьма затрудняют применение электрических и электромеханических средств измерений на таких объектах, как здания и сооружения, особенно больших размеров, с пространствами, открытыми атмосферным воздействиям и пр. Другое достоинство волоконных световодов — это возможность создавать измерительные сети различной топологии и с помощью соответствующих оптико-электронных систем автоматически обнаруживать повреждение зданий и сооружений.

В нашей предыдущей работе [8] описан успешный эксперимент по обнаружению растрескивания колонны из кирпичной кладки с помощью набора волоконных световодов в качестве свидетелей появления трещин. «Метод свидетеля» по своей сути предназначен для индикации нарушения целостности предметов и объектов. В то же время важно знать, при какой ширине трещины происходит разрыв волоконного световода того или иного типа и размера. Поэтому цель настоящей работы состояла в исследовании количественной взаимосвязи между параметрами волоконного световода, используемого как свидетеля растрескивания, и величиной раскрытия трещины в кирпичной кладке, при которой данный тип волоконного световода разрывается.

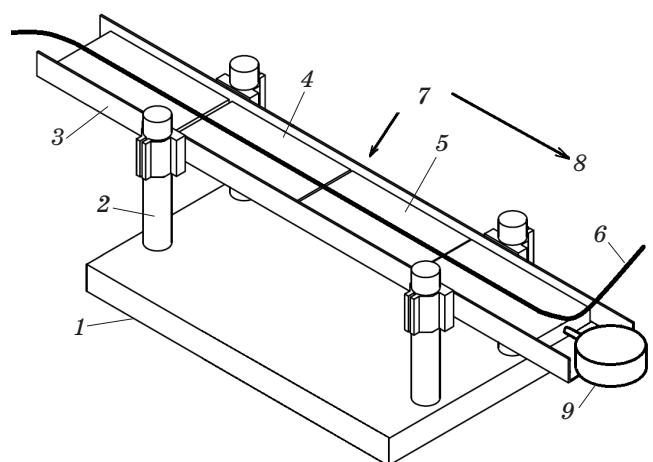
## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Описываемая здесь методика обнаружения трещин в строительных конструкциях из кирпичной кладки состоит в использовании волоконных световодов в виде групп, матриц или сетей, размещаемых на конструкции по определённой геометрической схеме и закрепляемых на её поверхности с помощью клея. В случае возникновения в конструкции трещины, которая пересекает оптическое волокно, это волокно разрывается при раскрытии трещины сверх некоторой предельной ширины. Разрыв оптического волокна приводит к резкому снижению его оптического пропускания, что автоматически регистрируется соответствующей аппаратурой и свидетельствует о наличии трещины.

Мы исследовали работу волоконного световода в таком применении экспериментально. Возникновение трещины в кирпичной кладке моделировалось на специальном стенде (схема стенда показана на рис. 2). Измерялась ширина трещины, при которой происходил разрыв испытуемого волоконного световода.

## 1. ВОЛОКОННЫЕ СВЕТОВОДЫ

Мы исследовали возможность применения волоконных световодов с кварцевым сердечником и оболочкой и внешним покрытием из полиметилметакрилата (акрила), полиамида (капрона) и фторполимера (тефлона). Два последних полимера известны низкой адгезией между ними и другими материалами, однако полиамиды и фторполимеры более стойки к внешним воздействиям, чем акрил. Поэтому световоды с полиамидным и фторполимерным



**Рис. 2.** Схема экспериментального стенда. 1 — основание, 2 — опоры, 3 — направляющие, 4 — испытуемые образцы керамического кирпича, неподвижная группа, 5 — испытуемые образцы керамического кирпича, подвижная группа, 6 — испытуемый волоконный световод, 7 — имитируемая трещина, 8 — направление перемещения подвижных образцов, 9 — датчик перемещения.

покрытием также были испробованы в данном применении.

Все волоконные световоды приклеивались к поверхности керамического кирпича эпоксидным клеем, который широко используется в строительстве для закрепления различных датчиков и т.п. на поверхности кирпичной кладки. Эксперимент показал, что волоконный световод с покрытием из акрила и кварцевой жилой диаметром до 220 мкм, приклеенный на длине от 50 мм и более, надёжно удерживается на поверхности керамического кирпича при приложении продольной растягивающей силы и её увеличении вплоть до наступления разрыва световода. В отличие от этого, волоконные световоды с покрытием из полиамида и фторполимера, приклеенные на длине вплоть до 450 мм, несмотря на их обжатие застывшим эпоксидным клеем, проскальзывали в нём при приложении продольной силы всего в несколько ньютонов.

Поэтому световоды с покрытием из полиамида и фторполимера были исключены из дальнейшего рассмотрения. Все дальнейшие исследования были проведены с волоконными световодами типа кварц/кварц/акрил двух типоразмеров:

А) с сердечником, оболочкой и внешним покрытием диаметрами  $d_1 = 50$  мкм,  $d_2 = 125$  мкм и  $d_3 = 250$  мкм соответственно;

Б) с сердечником, оболочкой и внешним покрытием диаметрами  $d_1 = 200$  мкм,  $d_2 = 220$  мкм,  $d_3 = 350$  мкм соответственно.

Эти световоды являются многомодовыми, со ступенчатым профилем показателя преломления, с сердечником из чистой двуокиси кремния и однородным показателем преломления, оболочкой из двуокиси кремния, легированной фтором, и наружным покрытием из акрила. Как сердечник, так и оболочка имеют низкую концентрацию ионов гидроксидов ( $\text{OH}^-$ ), что способствует высокой прозрачности в видимой и инфракрасной области спектра (длина волны  $400 < \lambda < 2400$  нм). Численная апертура (ЧА) и оптические потери  $\alpha$  световодов обоих типоразмеров практически одинаковы:  $\text{ЧА} = 0,22$  и  $\alpha = 8$  дБ/км на длине волны  $\lambda = 808$  нм, соответственно.

Мы использовали многомодовые, а не одномодовые световоды, во-первых, потому что в данном применении ширина полосы оптических сигналов весьма невелика, и поэтому широкополосность одномодовых световодов не даёт здесь никаких преимуществ. Во-вторых, прочность на разрыв волоконного световода с кварцевым сердечником и оболочкой определяется диаметром оболочки  $d_2$ . Это связано с тем, что в рассматриваемых волоконных световодах кварцевые сердечник и оболочка структурно едины и образуют монолитную кварцевую жилу. Сердечник и оболочка отличаются только степенью легирования примесями, создающими некоторую разность их показателя прелом-

ления, необходимую для существования световода. А значительно более эластичное и менее прочное внешнее пластиковое покрытие на прочность волоконного световода практического влияния не оказывает.

Как известно, минимальный стандартный диаметр оболочки одинаков для одномодовых и многомодовых волоконных световодов и равен  $d_2 = 125$  мкм. Большие значения диаметра оболочки  $d_2$  предусмотрены стандартами только для многомодовых волоконных световодов. Так что существенно разное сопротивление на разрыв, которое представляет интерес для обнаружения трещин разной ширины, можно встретить только среди имеющейся номенклатуры многомодовых волоконных световодов с различным диаметром оболочки  $d_2$ .

Что касается других важных различий между одномодовыми и многомодовыми световодами, то, благодаря относительно большому диаметру сердечника многомодовых световодов, источниками излучения для них могут служить светодиоды либо инфракрасные излучающие диоды вместо лазеров, которые необходимы в случае одномодовых световодов. Это значительно упрощает и удешевляет всю оптико-электронную аппаратуру, предназначенную для обнаружения трещин, и является преимуществом многомодовых световодов по сравнению с одномодовыми, в том числе и для реализации волоконно-оптического варианта «метода свидетеля».

## 2. КЛЕЯЩИЕ ВЕЩЕСТВА

Ввиду отсутствия в литературе конкретных рекомендаций по склеиванию акрила с керамикой, мы испытали следующие варианты:

А) Двухкомпонентный эпоксидный клей, который представляет собой термореактивный полимер, отверждаемый при смешивании с катализатором. Этот клей мы использовали для закрепления световодов на поверхности кирпичной кладки в нашей предыдущей работе [8]. Однако при длине клеевого соединения менее 50 мм при приложении продольной силы световод заметно проскальзывал в клеевой прослойке. Другой недостаток эпоксидного клея в том, что его компоненты должны смешиваться небольшими дозами непосредственно перед употреблением, что трудоёмко и неудобно.

Б) Однокомпонентный акриловый клей, который представляет собой раствор метилметакрилата в дихлорметане. Этот клей был выбран ввиду идентичности его основного вещества и материала покрытия световода, что позволяло ожидать частичного растворения акриловой оболочки в дихлорметане и хорошей адгезии между клеевой прослойкой и оболочкой световода.

### 3. КИРПИЧНАЯ КЛАДКА

Был использован рядовой строительный керамический кирпич из глины размером 229×110×25 мм. Кладка моделировалась четырьмя кирпичами, установленными в один ряд на специально сконструированном стенде, схематически показанном на рис. 2.

Стенд смонтирован на стальном основании 1, где на четырёх опорах 2 закреплены две направляющие 3, выполненные из металлических уголков сечением 20×40 мм и длиной 1 м. Имитирующие кладку четыре керамических кирпича 4 и 5 установлены на этих направляющих в одну линию. Испытуемый волоконный световод 6 наклеен на все четыре кирпича по их середине. Два левых по схеме кирпича 4 закреплены неподвижно, а группа их двух правых 5 может перемещаться в продольном направлении (указанном стрелкой 8) с помощью механического привода (на рис. 2 не показан). Перемещение правой группы приводит к увеличению зазора между левой и правой группой кирпичей, что моделирует раскрытие трещины в кирпичной кладке.

#### Наклеивание волоконных световодов

Верхняя поверхность кирпичей зачищалась металлической щёткой с диаметром прутка 0,3 мм, и пыль удалялась. Отрезок испытуемого волоконного световода общей длиной 3 м располагался на кирпичах, по их средней продольной линии. Поверх световода вручную шпателем наносился клей полосой, шириной 10 мм. В случае эпоксидного клея, приготовленный образец выдерживался 24 ч при температуре +24 °С для полной полимеризации клея. В случае акрилового клея, образец выдерживался 48 ч при температуре +60 °С до полного высыхания растворителя и обретения клеевым соединением номинальной прочности.

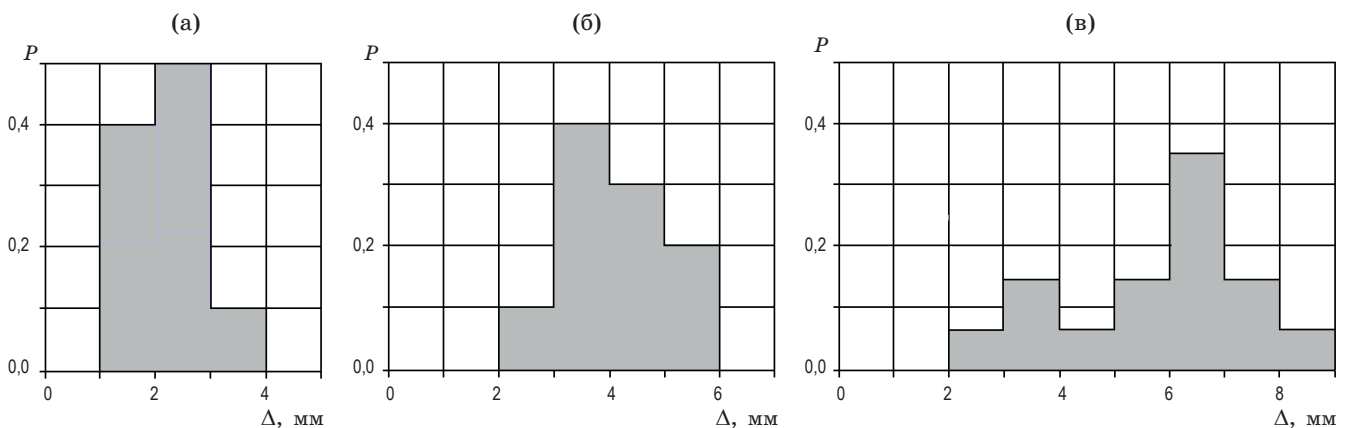
#### Проведение испытаний

Торцы световодов скалывались под прямым углом, и один подсоединялся к источнику оптического излучения, а другой — к фотоприёмнику. Для упрощения ввода излучения в световод источником служил гелий-неоновый лазер мощностью 1 мВт с длиной волны излучения  $\lambda = 633$  нм, диаметром луча 0,48 мм и расходимостью луча 1,7 мрад. Излучение модулировалось по интенсивности механическим модулятором и с помощью линзы фокусировалось на сердечник световода. Уровень выходного сигнала фотоприёмника измерялся мультиметром и наблюдался на осциллографе. Кроме того, при разрыве световода факт и место разрыва наблюдались визуально и фотографировались.

Два подвижных кирпича 5 перемещались вместе с постоянной скоростью 0,2 мм/с. При этом измерялось их перемещение (равное ширине моделируемой трещины  $\Delta$ ), при котором происходил разрыв испытуемого волоконного световода.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты эксперимента приведены на рис. 3 для трёх испытанных сочетаний типоразмера световода и вида клея. Эти результаты приведены в виде гистограмм вероятности разрыва волоконного световода  $P$  от ширины трещины  $\Delta$ . В таблице приведены основные статистические характеристики экспериментальных данных: разброс (размах)  $W = \Delta_{\max} - \Delta_{\min}$ , где  $\Delta_{\max}$  и  $\Delta_{\min}$  — максимальное и минимальное значение ширины трещины  $\Delta$ , соответственно; среднее арифметическое ширины трещины, при которой происходил разрыв волоконного световода  $A = (\Delta_1 + \dots + \Delta_n)/n$ , где  $\Delta_i$  — измеренные частные значения ширины трещины  $\Delta$ ,  $n$  — количество измерений; стандартное отклонение  $\sigma = \sqrt{((\Delta_1 - A)^2 + \dots + (\Delta_n - A)^2) / n}$ .



**Рис. 3.** Вероятность разрыва волоконного световода  $P$  в зависимости от ширины трещины  $\Delta$  для последовательных интервалов шириной 1 мм каждый. (а) — волоконный световод с  $d_2 = 125$  мкм, эпоксидный клей; (б) — волоконный световод с  $d_2 = 220$  мкм, эпоксидный клей; (в) — волоконный световод с  $d_2 = 125$  мкм, акриловый клей.



## Основные статистические характеристики экспериментальных данных

Статистические характеристики	Диаметр кварцевой жилы волоконного световода		
	125 мкм	220 мкм	125 мкм
	Вид клея		
	Эпоксидный	Эпоксидный	Акриловый
Количество измерений	10	10	14
Разброс (размах) $W$ , мм	2,38	3,53	5,45
Среднее арифметическое ширины трещины $A$ , мм	2,11	4,08	5,83
Стандартное отклонение $\sigma$ , мм	0,81	0,59	1,63

Как следует из представленных в таблице данных, при использовании эпоксидного клея разрыв волоконного световода с кварцевой жилой диаметром  $d_2 = 220$  мкм происходил при ширине трещины  $\Delta$ , примерно в два раза большей, чем в случае световода с жилой диаметром  $d_2 = 125$  мкм. Это отличие объясняется существенно большим (в 3,1 раза) поперечным сечением кварцевой жилы и, соответственно, большим пределом прочности на разрыв световода с кварцевой жилой диаметром  $d_2 = 220$  мкм.

Обращает на себя внимание тот факт, что эпоксидный и акриловый клеи дают существенно разные результаты с одним и тем же волоконным световодом (с оболочкой диаметром  $d_2 = 125$  мкм). В случае акрилового клея разброс ширины трещины  $W$ , среднее арифметическое ширины трещины  $A$  и стандартное отклонение ширины трещины  $\sigma$  значительно больше, чем при использовании эпоксидного клея (в 2,3, 2,8 и 2 раза соответственно). Мы полагаем, что среднее арифметическое ширины трещины  $A \approx 5,83$  мм и разброс ширины трещины  $W \approx 5,45$  мм, полученные с акриловым клеем, чрезмерно велики для надёжного обнаружения трещин меньшей ширины (трещин II–IV классов степени опасности), которые наиболее важны для практики. По этой причине, мы считаем, что испытанный нами однокомпонентный акриловый клей не пригоден для применения в настоящем методе обнаружения трещин с помощью волоконных световодов.

Отличие результатов, полученных с двумя видами клея, может объясняться как слабой адгезией между акриловым клеем и керамикой, так и меньшей вязкостью акрилового клея при его нанесении по сравнению с эпоксидным. Поэтому акриловый клей быстро и сильно впитывается в поры керамического кирпича, и плёнка клея, которая в итоге образуется на поверхности, получается тонкой и неоднородной по толщине и ширине. В противоположность этому, свежеприготовленный эпоксидный клей весьма вязок, и поэтому его легче наносить полосой равномерной толщины

и ширины поверх волоконного световода, помещённого на поверхность керамического кирпича. В итоге слой эпоксидного клея получается толстым и однородным и в результате лучше удерживает волоконный световод, чем акриловый клей.

## ВЫВОДЫ

Исследовано экспериментально применение волоконных световодов с кварцевым сердечником и оболочкой и покрытием из некоторых полимеров в качестве индикаторов (свидетелей) появления трещин в кладке из строительного керамического кирпича. Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Кварцевые волоконные световоды с внешним покрытием из акрила хорошо удерживаются на поверхности керамического кирпича эпоксидным клеем. Эти волоконные световоды разрываются при раскрытии трещины в кладке свыше нескольких миллиметров. Указанные свойства позволяют применять их в качестве надёжных индикаторов растрескивания строительных конструкций из кирпичной кладки.

2. В случае использования однокомпонентного акрилового клея раствор метилметакрилата в дихлорметане не пригоден для применения в настоящем методе обнаружения трещин.

3. Волоконные световоды с внешним покрытием из полиамида (капрона) и фторполимера (тефлона) плохо сцепляются с эпоксидным клеем (и, насколько известно, с другими клеящими веществами) и поэтому не пригодны для применения в настоящем методе обнаружения трещин.

4. Применяя кварцевые волоконные световоды с внешним покрытием из акрила и кварцевой жилой диаметром 125 и 220 мкм, можно определять появление трещин III и IV класса в кладке из керамического кирпича, что соответствует повреждениям средней и большой тяжести соответственно.

5. Можно предположить, что, используя волоконные световоды с покрытием из акрила и другим

диаметром кварцевой жилы, можно обнаруживать трещины большей и меньшей ширины по сравнению со значениями, полученными в этой работе.

Настоящая работа выполнена при поддержке Национального автономного университета Мексики (Universidad Nacional Autonoma de Mexico) [грант DGAPA — PAPIIT IT101618].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Добромислов А.Н. Диагностика повреждений зданий и инженерных сооружений. 2-е изд. М.: Издательство Ассоциации Строительных Вузов, 2008. 304 с.
2. Rodriguez M., Castrillon E. Manual de evaluacion postsismica de la seguridad estructural de edificaciones // Informe № 569. Instituto de Ingenieria, UNAM, Mexico. 1995. 84 p.
3. Шварц В.М., Иванников В.В., Николаев А.Г., Рябов О.Б., Степанов В.Н. Трещины в кирпичных стенах зданий. Диагностика, ремонт, усиление // Химическая техника. 2015. № 10. С. 22–25.
4. Hale K.F., Hockenhull B.S., Christodoulou G. The application of optical fibres as witness devices for the detection of plastic strain and cracking // Strain. 1980. V. 16. № 4. P. 150–154.
5. Balageas D., Bourasseau S., Dupont M., Bocherens E., Dewynter-Marty V., Ferdinand P. Comparison between non-destructive evaluation techniques and integrated fiber optic health monitoring systems for composite sandwich structures // J. Intelligent Material Systems Structures. 2000. V. 11. P. 426–437.
6. Khotiaintsev S., Beltran-Hernandez A., Gonzalez-Tinoco J.E. Structural health monitoring of concrete elements with embedded arrays of optical fibers // Proc. SPIE. 2013. V. 8695. P. 1–6.
7. Gonzalez-Tinoco J.E., Martinez-Gonzalez D.M., Miron-Carrasco J., Khotiaintsev S., Guzman-Olguin H.J., Lopez-Bautista M.C., Zuñiga Bravo M.A., Ovando-Shelley E., Sanchez-Ramirez A.R. Specialized optical fibre sensor array for structural damage detection // 10th IEEE/IET International Symposium on Communications Systems, Networks & Digital Signal Processing (CSNDSP'16). Prague, Czech Republic, 20–22 July 2016. P. 1–4.
8. Gonzalez-Tinoco J.E., Khotiaintsev S., Lopez-Bautista M.C., Timofeev V.I., Vountesmyer Yu.V. Arrays of optical fibers as detectors of cracks in brick structural elements // IEEE 38<sup>th</sup> International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). Kiev, Ukraine, 24–26 April 2018. P. 717–720.