

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ДЕФЕКТОВ И ПОВРЕЖДЕНИЙ КОНСТРУКЦИЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ФУНДАМЕНТОВ ПРИ ПОМОЩИ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН СТАНДАРТА G.652

© 2020 г. А.Д. Мехтиев^{1,2,*}, А.В. Юрченко^{1,**}, Е.Г. Нешина^{1,2,***}, А.А. Алькина^{2,****},
А.К. Кожас^{2,*****}, С.Р. Жолмагамбетов²

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия 634040 Томск, ул. Ленина, 30

²Карагандинский государственный технический университет,
Казахстан 100000 Караганда, пр-т Н. Назарбаева, 56
E-mail: *barton.kz@mail.ru; **niipp@inbox.ru; ***l_mail.ru;
****alika_1308@mail.ru; *****kozhas@bk.ru

Поступила в редакцию 27.08.2019; после доработки 06.12.2019
Принята к публикации 16.12.2019

Актуальность работы обусловлена важностью выявления скрытых дефектов строительных конструкций железобетонных фундаментов. Приведены результаты исследования дефектов и повреждений железобетонных конструкций. Предложено к использованию телекоммуникационное оптическое волокно стандарта G.652 в качестве сенсора для идентификации механических воздействий для объектов большой протяженностью. Оптическое волокно размещается непосредственно внутри железобетонного фундамента. В результате выявлены зависимости увеличения величины дополнительных оптических потерь в волокне, находящегося в бетонной балочке при изменении величин механических напряжений и деформации, возникающих в ней при увеличении нагрузки. На основе полученных данных предложены две схемы, позволяющие установить места дислокации локальных скрытых дефектов конструкций железобетонных фундаментов. Получены новые результаты измерения значений механических повреждений и деформаций бетонных балочек в режиме реального времени при изменении свойств света, проходящего через оптическое волокно стандарта G.652.

Ключевые слова: трещина, контроль дефектов, фундамент, строительные конструкции, оптическое волокно, волоконно-оптический датчик, сенсор, неразрушающий контроль, механическое напряжение, деформация.

DOI: 10.31857/S0130308220020062

ВВЕДЕНИЕ

При эксплуатации зданий и сооружений часто возникают проблемы с деформациями их несущих конструкций. Одними из причин возникновения такой ситуации могут быть неравномерные и местные просадки грунтового основания. Необходимо отметить, что деформации грунтовых оснований, дефекты и повреждения фундаментов сказываются на техническом состоянии всех строительных конструкций.

Проведенный анализ мировой литературы [1—8] показал, что к наиболее характерным дефектам и повреждениям фундаментов относят неравномерные осадки грунтов оснований, появление вертикальных и наклонных трещин в самих фундаментах, сколы, изломы и вывалы в теле фундаментов, оголение арматуры, коррозионные явления в теле бетонных фундаментов и т.п.

Существуют методы исследования свойств грунтов основания непосредственно в пределах глубины заложения фундаментов и под их подошвой, а также на глубину сжимаемой толщи. Количество геологических выработок, скважин и шурфов назначают в зависимости от размеров сооружения в плане, его типа, этажности, материала, протяженности, количества несущих стен и отдельно стоящих опор, наличия подвалов и подземных коммуникаций, сложности рельефа площадки, характера окружающей застройки, наличия архивных сведений о данном сооружении и проводившихся на площадке в предшествующие годы инженерно-геологических изысканиях [9, 10].

Существующие методы неразрушающего контроля прочности бетона железобетонных конструкций имеют определенную сложность и требуют проведения определенного объема дорожных подготовительных работ [11—16].

Наиболее часто на практике для определения прочности бетона используют косвенные методы неразрушающего контроля: метод ударного импульса, упругого отскока, ультразвуковой и прямые неразрушающие методы механического определения прочности: метод скалывания ребра, отрыва со скалыванием.

Метод отрыва со скалыванием (диапазон измерений 5—100 МПа) является единственным неразрушающим методом контроля прочности, для которого в стандартах прописаны градуировочные зависимости. Метод отрыва со скалыванием характеризуется наибольшей точностью, но и наибольшей трудоемкостью испытаний, обусловленной необходимостью подготовки шпуров для установки анкера. К недостаткам метода следует отнести также невозможность использования в густоармированных и тонкостенных конструкциях. Метод скалывания ребра конструкции используется главным образом для контроля линейных элементов (сваи, колонны, ригели, балки, перемычки и т.п.). В отличие от методов отрыва и отрыва со скалыванием, он не требует подготовительных работ. Однако при защитном слое менее 20 мм и повреждениях его данный метод неприменим [16]. Могут использоваться ультразвуковые приборы, их диапазон измерений позволяет контролировать прочность бетона класса В7,5—В60, также можно использовать их для контроля дефектоскопии, качества бетонирования и определения глубины, но они имеют следующие недостатки: построение градуировочной зависимости; возраст бетона должен быть не менее семи суток; требование высокой квалификации оператора, так как прибор очень чувствителен к изменению влажности, температуры, степени армирования бетона.

К примеру, можно использовать известный метод проведения инструментальных обследований строительных объектов, основанный на неразрушающем контроле прочности железобетонных и каменных конструкций с использованием приборов ИПС-МГ4, ИПА-МГ-4, УКС-МГ-4. Данные приборы предназначены для оперативного неразрушающего контроля прочности и однородности бетона и раствора методом ударного импульса по ГОСТ 22690. Область применения прибора — определение прочности бетона, раствора на предприятиях стройиндустрии и объектах строительства, а также при обследовании эксплуатируемых зданий и сооружений.

Практика показывает, что имеются некоторые недостатки указанных приборов [14—16]:

невозможность определения прочностных характеристик в ядре бетона при толщине железобетонных конструкций 1,2—1,5 м;

при толщине защитного слоя бетона свыше 12 см имеются неточности в определении диаметра стержневой арматуры;

при использовании приборов ПОС-50МГ4.ОД используются разрушающие методы контроля бетона — метод отрыва со скалыванием бетона.

При обследовании подземной части здания или сооружения (фундаментов) необходимо отрывать шурфы сечением приблизительно 1×1 или 1,2×1,2 м и глубиной до подошвы фундамента.

Все указанные методы имеют длительный процесс подготовки измерений и сопряжены со значительным объемом земляных работ, в некоторых случаях их приходится выполнять вручную. Также нет возможности проводить постоянный мониторинг напряженно-деформированного состояния фундамента и на ранних стадиях определять его дефекты. Указанные способы не позволяют с высокой точностью определить место просадки фундамента и расположение трещин, скрытых в грунте. Для поиска трещин необходимо устраивать шурфы на всю глубину фундамента и проводить инструментальное обследование.

СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ДЕФЕКТОВ КОНСТРУКЦИЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ФУНДАМЕНТОВ ПРИ ПОМОЩИ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН СТАНДАРТА G.652

С развитием волоконно-оптической техники за последние 50 лет произошел огромный скачок в области производства одномодового и многомодового оптических волокон, которые повсеместно используются в системах передачи информации и телекоммуникации [17, 18]. Волоконно-оптическая связь уникально подходит для подключения данных в режиме реального времени от датчиков окружающей среды и оборудования для обеспечения максимальной производительности при соблюдении самых высоких стандартов безопасности. Серьезный прорыв сделан не только в области повышения качества волокон и сокращения потерь при передаче импульса света, но и существенное снижение его рыночной стоимости. Например, кварцевое одномодовое оптическое волокно 9/125 мкм (OS2) Corning SMF-28e+® (стандарт ITU-T G.652.D) стоит около 9 долларов США за один километр. Существенно снизилась стоимость за последние годы полупроводниковых лазеров, которые используются в качестве источника излучения. Их шум значительно снижен, что позволяет добиться меньших помех в системах передачи данных. Сегодня передача информации в системах телекоммуникации на более чем 100 километров не вызывает проблем. На данный момент созданы волоконно-оптические датчики электрических и неэлектрических величин, превосходящие по своим параметрам классические системы, основанные на электрических сигналах. Одними из преимуществ использования оптических волокон (ОВ) в

качестве измерительного органа, является энергетическая пассивность и искробезопасность, так как световая энергия, передаваемая по волокну, находится на уровне или ниже определенного уровня мощности, способной воспламенить взрывоопасные среды. Также ОВ не подвержены влиянию шума и электромагнитных помех, распространенных в разных областях промышленности [19].

Основная идея работы связана в использовании телекоммуникационного оптического волокна стандарта G.652 в качестве чувствительного сенсора (измерительного органа), способного идентифицировать механические воздействия, причем объект может быть значительный по протяженности в несколько десятков километров. Оптическое волокно используется как сенсор и как направляющая система для передачи данных о проведенных измерениях. Относительная простота системы контроля дефектов конструкций железобетонных фундаментов при помощи оптических волокон стандарта G.652 позволяет использовать ее повсеместно. Для этого нужно на первоначальном этапе строительства заложить оптическое волокно внутрь тела конструкции железобетонного фундамента.

Система контроля дефектов и повреждений железобетонных фундаментов основана на использовании оптических волокон стандарта G.652. Физическая основа измерений механических нагрузок и установления места дефекта основана на изменении свойств света или повышении уровня дополнительных потерь, проходящего по ОВ при механическом воздействии на него, также оптическое волокно способно улавливать различного рода вибрации в диапазоне частот от 1 Гц до 1 МГц. При этом оптическое волокно находится в защитной силиконовой оболочке диаметром 1 мм, что не может снизить прочность фундамента. Изменения свойств света выражается в увеличении дополнительных потерь и появлении различного рода рассеяний (Релеевское, Бриллюэновское, Романовское). Для удобства описания основы предложенного метода дефектоскопии фундаментов при помощи ОВ можно использовать классическую теорию оптического интерферометра. Теоретическая основа работы данного устройства известна и является суммой сложения двух световых волн E_1 и E_2 , что проявляется в изменении результирующей интенсивности I , которую регистрирует фотоприемное устройство интерферометра [20].

На рис. 1 представлен процесс изменения свойств света, а именно его фазы, проходящего по оптическому волокну при внешнем механическом воздействии на него.

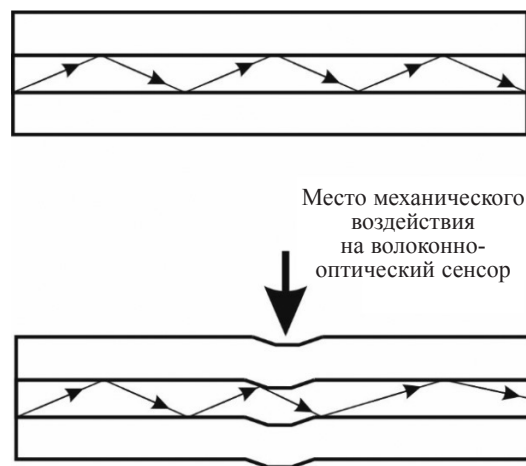


Рис. 1. Изменение свойств света, проходящего по оптическому волокну при внешнем механическом воздействии на него.

При механическом воздействии возникает фотоупругий эффект, который приводит к изменению свойств света, а именно его интенсивности $I(t)$. Соответственно меняются показатели преломления Δn . Изменение распространяющейся фазы световой волны $\Delta \varphi \sim \Delta n$ плюс изменение вектора электромагнитного поля волны E , оказывающего влияние на поляризацию. Источник генерирует когерентную световую волну, которая проходит по волокну, изменение ее интенсивности фиксирует фотоприемник. Интенсивность и напряженность связаны между собой $I \sim E^2$. На основе известной теории оптического интерферометра вектора когерентных волн представим математическую модель процесса:

$$E_1 = E_{01} \cos(\omega t - \varphi_1),$$

$$E_2 = E_{02} \cos(\omega t - \varphi_2).$$

При сложении волн получаем суммарный вектор $E = E_0 \cos(\omega t - \varphi)$ с амплитудой $E_0 = \sqrt{E_{01}^2 + E_{02}^2 + 2E_{01}E_{02} \cos(\Delta\varphi(t))}$ и фазой $\varphi = \arctg\left(\frac{E_{01} \sin \varphi_1 + E_{02} \sin \varphi_2}{E_{01} \cos \varphi_1 + E_{02} \cos \varphi_2}\right)$.

При этом разность фаз составит $\Delta\varphi = \Delta\varphi_n + \Delta\varphi(t)$, где $\Delta\varphi_n$ — начальная и имеющая случайный характер разность фаз интерферирующих световых волн; $\Delta\varphi(t)$ — разность фаз, связанная с изменением условий распространения в оптическом волокне под внешним механическим воздействием и деформации волокна, является малой поправкой на фоне первого слагаемого. Полная разность фаз является квазиначальной. Максимум интерференции достигается при $\Delta\varphi(t) = \pm 2\pi n$, где $n \in z$, когда $\cos\Delta\varphi + 1$ и соответственно $E_0 = E_{01} + E_{02}$. В процессе исследований установлено, что использование в чистом виде классического интерферометра Маха—Цандера не приемлемо для системы контроля дефектов строительных фундаментов при помощи оптических волокон стандарта G.652, так как имеется ряд существенных недостатков. Например, разность фаз интерферирующих световых волн $\Delta\varphi_n$ имеет случайный характер и требует постоянной корректировки, а изменение ее параметров является значительной проблемой в эффективности работы всей системы в реальных условиях. Это обстоятельство изменения начальных условий разности фаз из-за изменения температуры в пределах 1°C и более может привести к замиранию системы и ложному срабатыванию, при этом никакого механического воздействия на сенсор не было. На основании этого необходимо вести поиск и разработку более эффективных систем контроля дефектов фундаментов на основе эффекта фотоупругости оптических волокон, менее восприимчивой к колебанию температуры внешней среды.

Предлагаемый упрощенный вариант системы контроля дефектов и деформаций конструкций железобетонных фундаментов при помощи оптических волокон стандарта G.652 может быть основан на использовании классического интерферометра Маха—Цандера (рис. 2). Сенсор имеет три оптических волокна. Два волокна используются как чувствительные сенсоры и находятся в теле строительного фундамента, по ним подается свет, создаваемый полупроводниковым лазером, работающим в непрерывном режиме, а третье ОВ (выходное) служит для его дальнейшей передачи от оконечного оптического модуля до анализатора системы. При этом можно также использовать многогодное волокно, но лазер должен тогда работать в импульсном режиме. Когерентный источник излучения (лазер) по пассивному волокну подает луч света на начальный модуль (оптический разветвитель). В этом модуле излучение расщепляется на два пучка, которые подаются на два чувствительных волокна. На оконечном модуле происходит интерференция обоих лучей. Если оба плеча этого интерферометра находятся в невозмущенном состоянии, когда отсутствуют какие-либо деформации волокон, то интерференционная картинка на оконечном модуле остается неизменной. При этом сигнал, передаваемый с оконечного модуля по выходному оптическому волокну на анализатор, не имеет переменной составляющей. При деформациях или вибрациях сенсора оптическая разность хода в чувствительных волокнах (то есть в плечах интерферометра) изменяется, соответственно оконечный модуль регистрирует переменную составляющую сигнала, передавая ее на анализатор. Специфическая особенность данной интерференционной системы состоит в том, что она определяет относительную временную задержку регистрируемых сигналов в обоих плечах интерферометра.

Схема на рис. 2 позволяет с высокой точностью и линейностью характеристик идентифицировать механические воздействия на волоконно-оптический сенсор, расположенный в теле протяженного объекта, например, фундамента, но не позволяет точно установить место дефекта и развития трещины, еще есть ряд проблем с различного рода помехами, которые могут привести к ошибке в измерениях. Проведенные опыты показали, что внешняя температура может оказывать влияние на точность измерений.

Ранее авторами приведены результаты исследования данной схемы и сформулированы основные аспекты использования ее в распределенных системах для охранных периметров различных объектов [21]. В качестве сенсора (см. рис. 2) используется оптическое волокно 1, подключенное при помощи оптических коннекторов 2 (типа SC) к оптическому разветвителю 3. Источником непрерывного излучения является полупроводниковый лазер 4, при этом мощность оптического излучения разделяется в оптическом разветвителе в пропорции 50/50. Управление процессом осуществляется при помощи устройства согласования 5 и персонального компьютера 6 с программ-

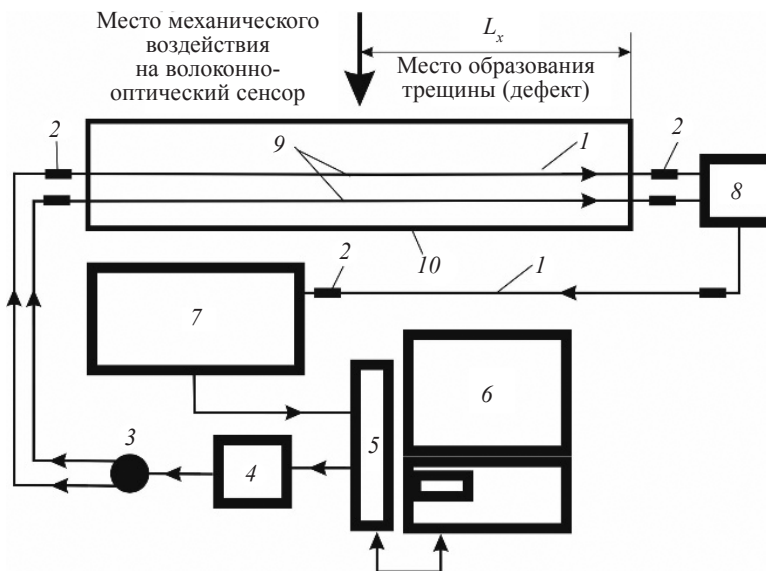


Рис. 2. Метод идентификации механических воздействий на основе оптического интерферометра.

ным обеспечением, позволяющим визуализировать контроль и измерение параметров. Предварительная обработка сигналов осуществляется в устройстве 7. Сенсоры подключены к устройству ввода 8, от которого световая волна попадает по обратному оптическому волокну в устройство для предварительной обработки сигнала 7. При деформации оптического волокна в месте механического воздействия 9 в теле балки 10. При механическом воздействии происходит изменение свойств света, проходящего по оптическому волокну, по которому можно установить численное значение механических напряжений или деформаций в теле балки и установить предельное значение, при котором возможно возникновение трещины.

Учитывая недостатки описанного выше метода, для решения практических задач по установлению места трещины (дефекта) фундамента, были разработаны две схемы (рис. 3, 4) для проведения лабораторных испытаний и создания методов неразрушающего контроля дефектов строительных фундаментов при помощи оптических волокон стандарта G.652, основой которых является представленная ранее схема на рис. 2.

Схема на рис. 3 позволяет определить значения механических напряжений и деформаций, возникающих в балке при ее нагружении и с высокой точностью установить место возникновения дефекта (трещины) на основе измерения значений отраженного света или его рассеяния. Как и ранее, в качестве чувствительного элемента 1 использовано кварцевое одномодовое оптическое волокно 9/125 мкм (OS2) Corning SMF-28e+® с низким «водным пиком» (стандарт ITU-T G.652.D). Данное волокно используется в телекоммуникационных кабелях для передачи информации. Волокно имело внешнюю оболочку и защитное покрытие диаметром ~1 мм.

Для коммутации чувствительного элемента и измерительной аппаратуры используются оптические коннекторы 2, марки SC оптическое соединение типа PhysicalContact. Важным элементом является оптический переключатель 3, который необходим для передачи импульса света от лазера в волокно, после чего он переключается на прием отраженного света или рассеяния. Источник когерентного излучения 4, в качестве которого используется полупроводниковый лазер мощностью 5—20 мВт с диапазоном длины волны 780—1650 нм. В эксперименте по волокну проходили световые волны длиной 1310 и 1550 нм. Устройство 5 обеспечивает регулировку накачки лазера для обеспечения настройки необходимого уровня излучения, чем длиннее дистанция, тем выше уровень излучения. Отраженный от неоднородностей ОВ сигнал через оптический переключатель попадает на фотоприемник 6. Оптический переключатель и система управления им являются очень важными и дорогостоящими частями данной схемы, так как они должны обладать высокими показателями быстродействия. После фотоприемника уже электрический сигнал поступает в устройство для предварительной обработки полученных данных 7. Устройство 8 необходимо для согласования с персональным компьютером 9, с помощью которого окончательно обрабатываются и хранятся данные экспериментов. Управление оптическим переключателем осуществляется через блок управления 10, который обеспечивает переключение в диапазоне времени от 30 до 300 нс после того, как зондирующий импульс лазера 3 распространился в волокне, на прием отраженной части светового импульса,

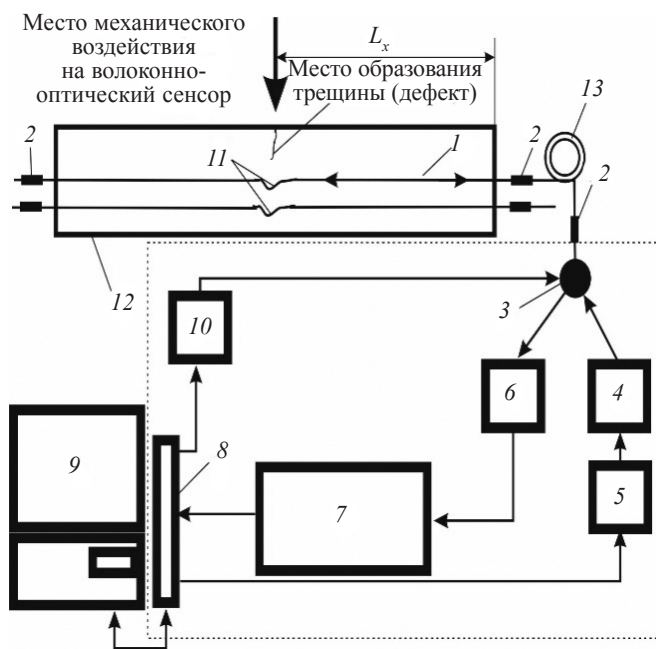


Рис. 3. Схема для измерения значений механических напряжений и установления места дефекта на основе эффекта рассеяния света.

который фиксируется фотоприемником 4. В нашем случае использовался диапазон 30—50 нс. Импульс отражается от неоднородностей, сформировавшихся в волокне, например, мест сварки, коннекторов микроизгибов и др. При возникновении микроизгиба часть излучения возвращается от неоднородностей к фотоприемнику. В месте механического воздействия на оптическое волокно образуется зона микроизгиба II, в которой происходит изменение свойств света и его отражение части обратно в сторону фотоприемника 6. Оптические волокна размещены в теле балки 12. С учетом того, что измерительная часть имеет определенное время срабатывания оптического переключателя, то образуется мертвая зона в пределах 400—500 м, для ее ликвидации необходимо обязательное применение компенсационной катушки длиной от 1000 м с оптическим волокном такого же типа. Сокращение мертвой зоны измерений требует повышения технического уровня измерительного устройства, в первую очередь фотоприемника и устройства обработки данных, это соответственно повышает стоимости всей измерительной части в целом. Аналогичные проблемы отмечены при проектировании и эксплуатации оптических рефлектометров. Недостатком этого метода является невозможность проведения измерений в реальном масштабе времени (время получения достаточно качественной рефлектограммы составляет в пределах 20—30 с).

Учитывая определенные технические сложности и значительную стоимость при построении системы контроля дефектов конструкций железобетонных фундаментов при помощи оптических волокон стандарта G.652, основанной на принципах оптической рефлектометрии OTDR (Optical Time Domain Reflectometer), приведенной ранее на рис. 3, была разработана упрощенная схема (рис. 4). Она позволяет определить значения механических напряжений, возникающих в балке при ее нагружении, а также установить зону дислокации дефекта фундамента (трещины). Данный метод позволяет установить место возникновения дефекта по зонам I—III, но зон может быть значительно большее количество, в зависимости от длины фундамента. Учитывая незначительные размеры испытуемой бетонной балочки, заложены три зоны. Данный метод отличается от предыдущего тем, что он более прост в техническом оснащении и более экономичный по материальным затратам. В сравнении с описанной ранее схемой имеется ряд отличий, в ней отсутствуют оптический переключатель и система управления, что является существенным упрощением. В данной схеме используется три отрезка оптического волокна I с оптическими коннекторами 2 марки SC оптическое соединение типа Physical Contact. Как показано на рис. 4, балка разделяется на три измерительных зоны, где контролируются механические напряжения. Идентификация механических напряжений позволяет установить их критическое значение, при котором возможно образование дефекта фундамента. Предложенная схема имеет полупроводниковый лазер 3 с системой регулирования его накачки 4. Измерительная часть представлена фото-

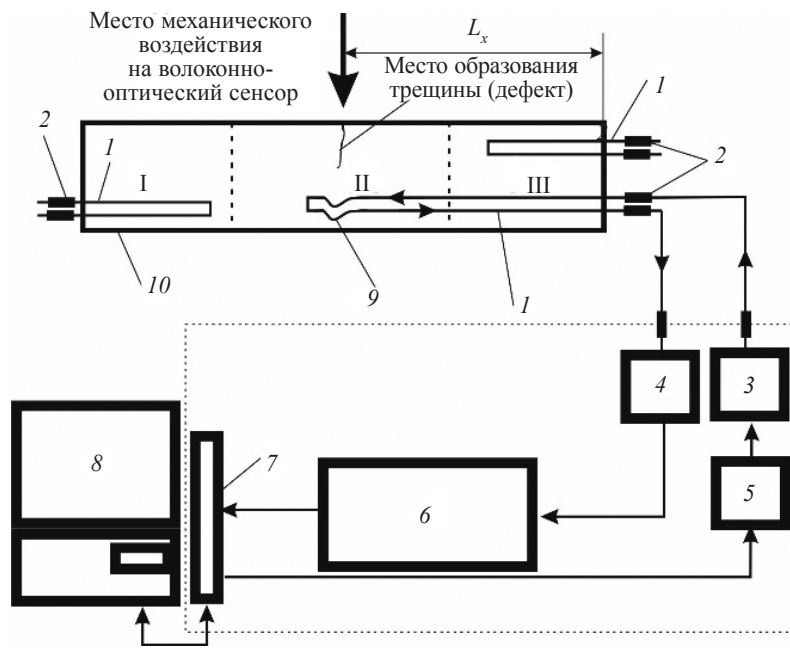


Рис. 4. Схема для измерения значений механических напряжений и установления места дефекта.

приемником 4. Электрический сигнал от фотоприемника 4 поступает в устройство для предварительной обработки полученных данных 6.

Устройство 7 необходимо для согласования с персональным компьютером 8, с помощью которого окончательно обрабатываются и хранятся данные экспериментов. Частично данная схема имеет одинаковые измерительные части и систему обработки данных. Оптическое волокно также расположено в теле балки 10. Метод позволяет производить измерение и контроль дефектов в режиме реального времени. Недостатком этого метода является, что определение места расположения дефекта устанавливается только по зонам I—III, это не позволяет установить точного места образования трещины. Свет от лазера может подаваться постоянно, а не коротким импульсом, как в первой схеме, поэтому нет необходимости в использовании дорогостоящего оптического переключателя и сложной системы управления им.

В экспериментах использовались цементные балочки размером 40×40 на пролете 100 мм, которые изготовлены из цемента марки ПЦ-400 Д.0, песок вольский (рис. 5). Изготовленные цементные балочки хранились в течение 28 суток в воде согласно ГОСТу. Условия твердения естественные.

Лабораторные испытания проводились в аккредитованной строительной лаборатории при Карагандинском государственном техническом университете. При эксперименте использовались испытательная машина МИИ-100, предназначенная для проведения статических испытаний, и пресс гидравлический измерительный ПГИ-500, предназначенный для испытания на прочность. Были проведены ряд экспериментов по определению потерь оптического волокна при различном значении давления в железобетонных конструкциях.

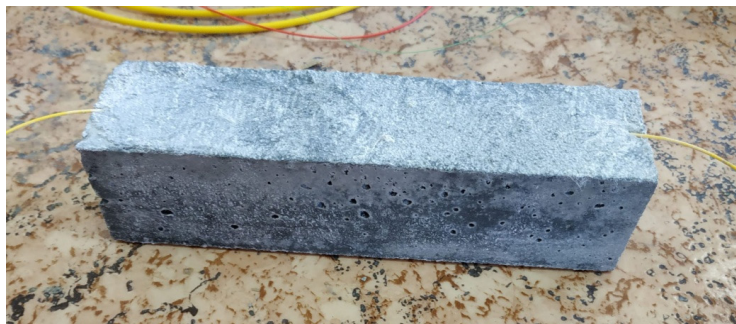


Рис. 5. Лабораторный образец балочки.

Измерительно-информационная система собрана с использованием элементной базы оптического рефлектометра OTDR VISA USB M2, для измерения мощности оптического излучения и потерь применили измеритель оптической мощности VIAVI (JDSU) SmartPocket OLP-38, работающий в динамическом диапазоне от -50 до $+26$ дБм, с диапазоном длины волны $780\text{—}1650$ нм. В качестве источника оптического излучения использовали SmartPocket OLS-34/35/36 со встроенными опциями Auto- λ и Multi- λ , SmartPocket OLP-38 может автоматически измерять уровень мощности и вносимые потери в одномодовом и многомодовом оптическом кабеле. Подключение к оптическому волокну производили через универсальный UPP 2.5 мм адаптер и оптические коннекторы типа SC.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ЛАБОРАТОРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ

Исследовали оптические волокна с длиной волны 1310 и 1550 нм.

1. Образцы-балочки были помещены в испытательную машину МИИ-100 (двухопорный изгиб), предназначенную для проведения статических испытаний (испытания на изгиб). Заводской номер 239, инвентарный номер 2235. Сертификат о поверке ГВЛ-2-03-1800003. Данная машина применяется для определения предела прочности при изгибе цементных образцов в соответствии с ГОСТ 310.4—81. Определяется предел прочности в кгс/см^2 при изгибе балочки сечением 40×40 на пролете 100 мм при постоянной скорости нарастания нагрузки 5 ± 5 кг/с. Средняя скорость нарастания испытательной нагрузки на образец $(0,05\pm 0,01)$ кН/с ($0,12\pm 0,02$ МПа/с в пересчете на единицу площади приведенного сечения балочки). Захват для установки образца снабжен цилиндрическими элементами, изготовленными из стали твердостью $56\text{—}61$. Образцы на опорных элементах закрепляются шарнирно.

Испытания (рис. 6) позволяют симитировать ситуацию с образованием трещин в теле фундамента, который представлен балочкой. Источником когерентного излучения является полупроводниковый лазер 1, подключенный через оптический коннектор к оптическому волокну 2. Оптическое волокно находится в теле балочки 3, а его концы выходят наружу. Испытательная машина 4 способна развивать давление до 100 кгс/см^2 . Вектор нагрузки направлен в область 5 и указан стрелкой F . Балочка закрепляется на двух стационарных опорах 6 для создания двухопорного изгиба, соответственно ее излом осуществляется в середине. Второй конец оптического волокна присоединен к измерителю оптической мощности 7. Механическое воздействие на балочку вызывает деформацию оптического волокна, что приводит к изменению свойств света и увеличивает значение дополнительных потерь света, проходящего по оптическому волокну, которые фиксируются измерителем оптической мощности. Это позволяет точно детектировать величину механических воздействий на балочку через изменение величины дополнительных потерь.

При повреждении или полном разрушении балки волокно остается не поврежденным, но в месте возникновения трещины сохраняется деформация волокна из-за микроизгиба, благодаря чему данную точку можно легко идентифицировать и определить расстояние до нее.

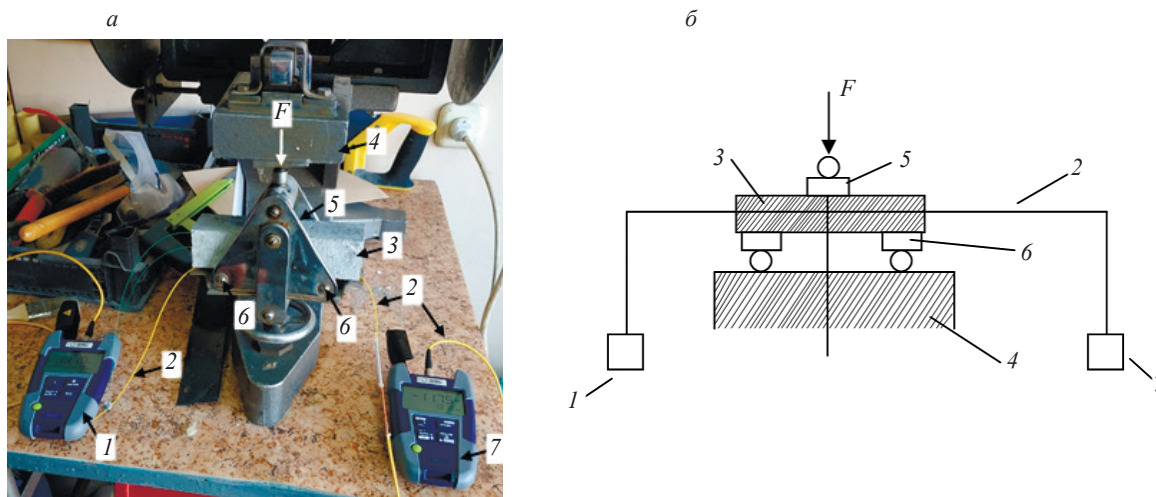


Рис. 6. Испытательная машина МИИ-100 (двухопорный изгиб):

a — фотография испытательной машины, b — схема нагружения испытательной машины. 1 — источник излучения; 2 — оптическое одномодовое волокно в защитной оболочке; 3 — балочка; 4 — испытательная машина МИИ-100; 5 — область приложения давления; 6 — стационарная опора; 7 — измеритель оптической мощности.

Граничное условие: энергия давления на волокно от 0 до 18 кгс/см² (при длине волны 1310 нм), от 0 до 97 кгс/см² (при длине волны 1550 нм), температура в помещении лаборатории 25 °С. Перемещение по осям до приложения давления $OX = 0$ м; $OY = 0$ м; $OZ = 0$ м. В результате автоматизированной аппроксимации данных получены однофакторные математические модели.

Каждое измерение проводилось 10 раз. Обоснование необходимого числа повторения производится для того, чтобы обеспечить достаточную достоверность результатов экспериментальных исследований, устанавливается исходя из коэффициента $K_{\text{вар}}$ и требуемой степени точности [22]. Численное исследование проведено с помощью программы Wolframalpha, которая является интерактивной системой для выполнения обработки результатов экспериментов и ориентирована на работу с массивами данных.

Все представленные ниже результаты экспериментов выполнены по более упрощенной схеме, представленной на рис. 4, и сводятся к изменению дополнительных потерь, по которым можно судить об изменении механических напряжений и деформаций. При повышении значений нагружения растут показатели механических напряжений и деформации, возникают проседания балочки, перед образованием трещины. При образовании трещины отмечен всплеск и скачкообразное повышение значений механических напряжений и его деформации, соответственно увеличиваются значения дополнительных потерь в прямом направлении прохождения световой волны по ОВ и в обратном в виде частичного ее рассеяния при растущем значении микроизгиба. При образовании трещины в фундаменте возможен разрыв ОВ, которое находится без защитной оболочки, это позволяет определить место трещины в фундаменте. Если волокно находится в защитной оболочке, то его разрыва не происходит, а место образования трещины легко устанавливается по повышенному уровню потерь в зоне (как показано на рис. 5) или его можно определить путем повышения значения рассеяния световой волны (как показано на рис. 4).

График зависимости значения потерь оптического волокна с длиной волны 1310 нм при пошаговом увеличении давления при проведении испытаний на изгиб представлен на рис. 7.

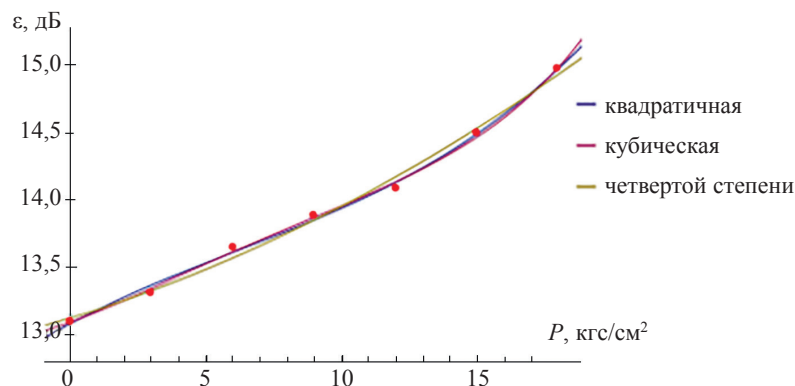


Рис. 7. Значение потерь оптического волокна с длиной волны 1310 нм при пошаговом увеличении давления на изгиб.

При проведении автоматической аппроксимации были получены следующие результаты:
 $-0,0000257202P^4 - 0,000668724P^3 + 0,00550926P^2 + 0,0723677P + 13,0917 = \varepsilon$ — аппроксимация четвертой степени;

$0,000257202P^3 - 0,00477513P^2 + 0,107487P + 13,081 = \varepsilon$ — аппроксимация третьей степени (кубическая);

$0,00216931P^2 + 0,0611905P + 13,1226 = \varepsilon$ — аппроксимация второй степени (квадратичная).

Так как наилучшей математической моделью считается модель с наименьшим значением критерия АИС (Информационный критерий Акаике), зависимость значений потерь в оптическом волокне лучше представить аппроксимацией четвертой степени, при которой информационный критерий Акаике составляет $-11,0164$, $R^2 = 0,9932$ (коэффициент детерминации).

График зависимости значения потерь оптического волокна с длиной волны 1550 нм при пошаговом увеличении давления при изгибе представлен на рис. 8.

При проведении автоматической аппроксимации были получены следующие результаты:
 $0,0853288P + 11,3063 = \varepsilon$ — аппроксимация линейная;

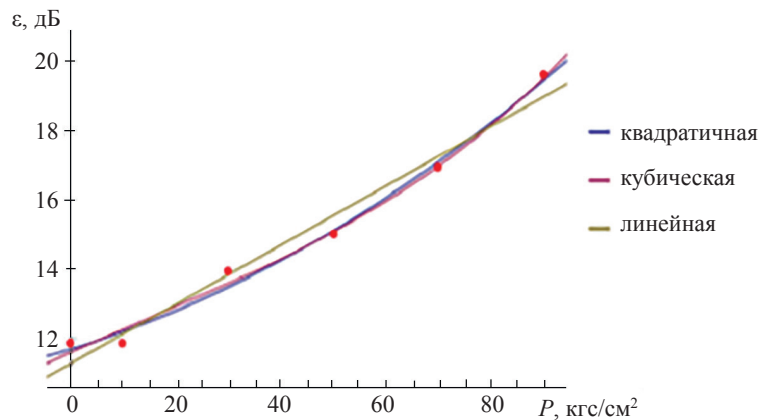


Рис. 8. Значение потерь оптического волокна с длиной волны 1550 нм при пошаговом увеличении давления на изгиб.

$5,02161 \cdot 10^{-6}P^3 - 0,000241176P^2 + 0,0689568P + 11,6265 = \epsilon$ аппроксимация третьей степени (кубическая);

$0,000442333P^2 + 0,0462459P + 11,7183 = \epsilon$ аппроксимация второй степени (квадратичная).

Так как наилучшей математической моделью считается модель с наименьшим значением критерия АИС (Информационный критерий Акаике), зависимость значений потерь в оптическом волокне лучше представить квадратичной аппроксимацией, при которой информационный критерий Акаике составляет $-10,2253$, $R^2 = 0,99$ (коэффициент детерминации).

2. Далее образцы-балочки были испытаны на прессе гидравлическом измерительном ПГИ-500, который предназначен для испытания на прочность. Заводской номер 166, инвентарный номер 00013993. Сертификат о поверке ВЛ-2-03-18000654. Машина предназначена для создания нормированного значения меры силы, испытания при сжатии строительных материалов в лабораторных условиях.

Испытания проводились аналогично испытаниям на МИИ-100, но с тем отличием, что давление на балочку осуществляется при помощи ПГИ-500 гидравлического пресса 8 (рис. 9). Половинку балочки помещают между двумя пластинками таким образом, чтобы боковые грани,

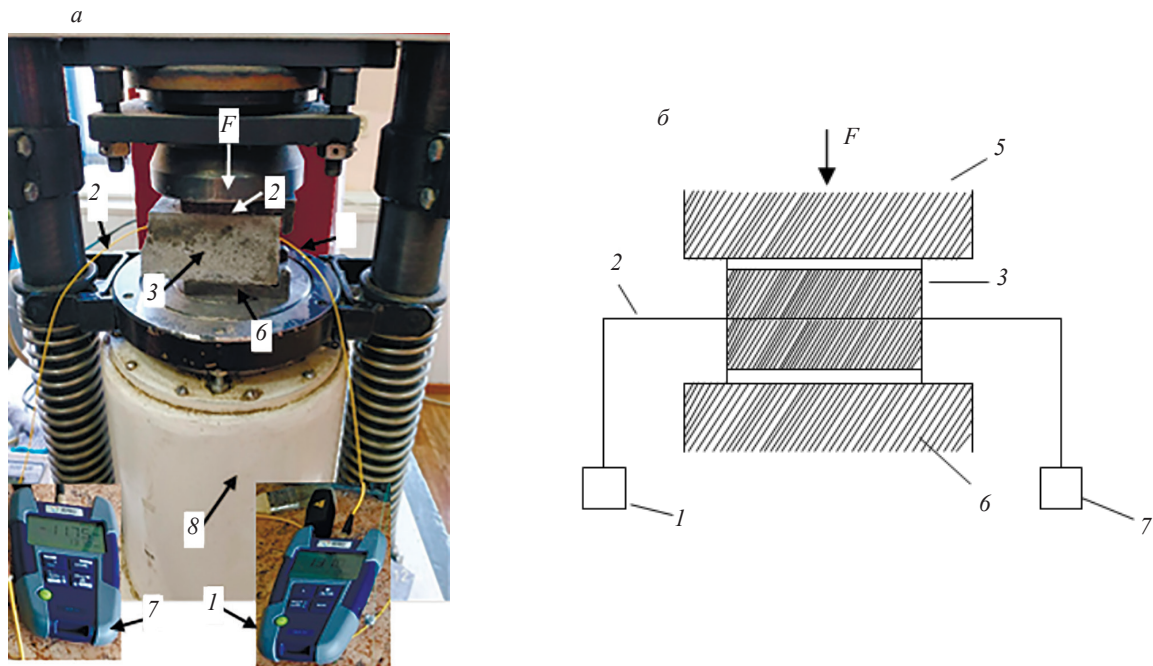


Рис. 9. Пресс гидравлический измерительный ПГИ-500:

a — фотография пресса, *б* — схема нагружения пресса; 1 — источник излучения; 2 — оптическое одномодовое волокно в защитной оболочке; 3 — балочка; 4 — испытательная машина МИИ-100; 5 — область приложения давления; 6 — стационарная опора; 7 — измеритель оптической мощности; 8 — пресс.

которые при изготовлении прилегли к стенкам формы, находились на плоскостях пластинок, а упоры пластинок плотно прилегли к торцевой гладкой плоскости образца. Образец вместе с пластинами центрируют на опорной плите пресса. Средняя скорость нарастания нагрузки при испытании 2,8 мм/мин. Половины балочек между пластинами закрепляются жестко. График зависимости значения потерь оптического волокна с длиной волны 1310 нм при пошаговом увеличении силы давления при действии пресса представлен на рис. 10.

Граничное условие: энергия давления на волокно от 0 до 18,2 кН (при длине волны 1310 нм), от 0 до 3,2 кН (при длине волны 1550 нм), температура в помещении лаборатории 25 °С. Перемещение по осям до приложения давления $OX = 0$ м; $OY = 0$ м; $OZ = 0$ м. В результате автоматизированной аппроксимации данных получены однофакторные математические модели. Каждое измерение проводилось 10 раз.

График зависимости значения потерь оптического волокна с длиной волны 1310 нм при пошаговом увеличении силы давления при действии пресса представлен на рис. 10.

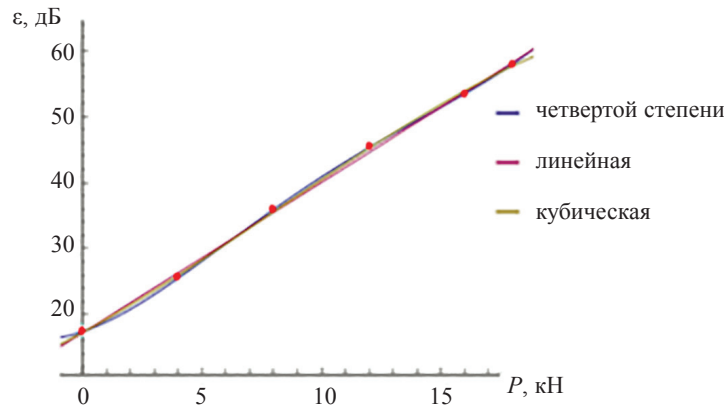


Рис. 10. Значение потерь оптического волокна с длиной волны 1310 нм при пошаговом увеличении силы давления пресса.

При проведении автоматической аппроксимации были получены следующие результаты:
 $0,000559605P^4 - 0,0226758P^3 + 0,285055P^2 + 1,20594P + 17,3754 = \varepsilon$ — аппроксимация четвертой степени;

$-0,002526663P^3 + 0,0615173P^2 + 1,95615P + 17,2432 = \varepsilon$ — аппроксимация третьей степени (кубическая);

$2,28045P + 17,2006 = \varepsilon$ — аппроксимация линейная.

Так как наилучшей математической моделью считается модель с наименьшим значением критерия АИС, зависимость значений потерь в оптическом волокне лучше представить аппроксимацией четвертой степени, при которой информационный критерий Акаике составляет $-2,88722$, $R^2 = 0,99$ (коэффициент детерминации).

График зависимости значения потерь оптического волокна с длиной волны 1550 нм при пошаговом увеличении давления при изгибе представлен на рис. 11.

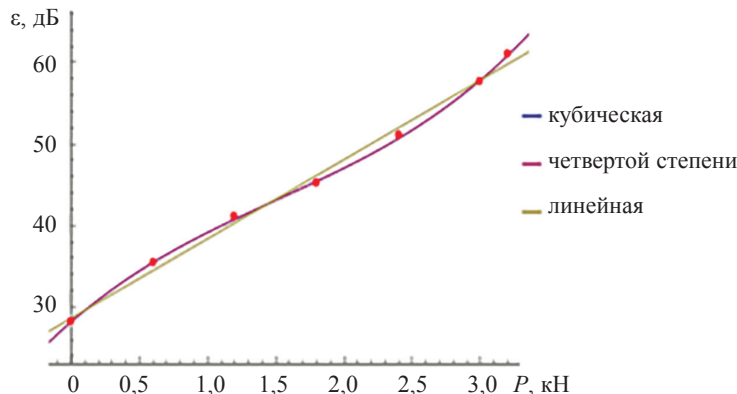


Рис. 11. Значение потерь оптического волокна с длиной волны 1550 нм при пошаговом увеличении давления на изгиб.

При проведении автоматической аппроксимации были получены следующие результаты:
 $9,74476P + 28,6191 = \varepsilon$ — аппроксимация линейная;
 $-0,0174078P^4 + 1,10795P^3 - 4,75095P^2 + 14,6446P + 28,1652 = \varepsilon$ — аппроксимация четвертой степени;
 $0,997536P^3 - 4,53536P^2 + 14,5163P + 28,1708 = \varepsilon$ — аппроксимация третьей степени (кубическая).
 Так как наилучшей математической моделью считается модель с наименьшим значением критерия АИС, зависимость значений потерь в оптическом волокне лучше представить кубической аппроксимацией, при которой информационный критерий Акаике составляет 9,22255, $R^2 = 0,99$ (коэффициент детерминации).

ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

1. Использование одномодового оптического волокна стандарта ITU-T G.652.D для неразрушающего контроля дефектов конструкций железобетонных фундаментов является весьма перспективным, так как разработанные на его основе волоконно-оптические датчики обладают достаточно высокой точностью, скоростью измерения и имеют хорошую линейность характеристик.
2. Применение приведенных выше методов позволит установить предполагаемое место дефектов (трещин) и повреждений железобетонных конструкций, что не могут использоваться существующие методы неразрушающего контроля прочности бетона. Возможно получение значений механических напряжений и деформаций в режиме реального времени с хранением полученных данных.
3. Появление возможности реализовать на практике на строительных объектах г. Нур-Султана объектные волоконно-оптические информационные системы измерений параметров и физических величин, диагностики технического состояния подземных и надземных строительных конструкций зданий и сооружений.
4. На основе полученных данных предложены две схемы, позволяющие установить места дислокации локальных скрытых дефектов (трещин) строительных фундаментов железобетонных конструкций, а также в перспективе использовать их на других строительных конструкциях большой протяженности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Fan L., Bao Y., Meng W., Chena G.* In-situ monitoring of corrosion-induced expansion and mass loss of steel bar in steel fiber reinforced concrete using a distributed fiber optic sensor // *Composites Part B: Engineering*. 2019. V. 165. P. 679 — 689.
2. *Nguyen W., Duncan J.F., Devine T.M., Ostertag C.P.* Electrochemical polarization and impedance of reinforced concrete and hybrid fiber-reinforced concrete under cracked matrix conditions // *Electrochimica Acta*. 2018. V. 271. P. 319 — 336.
3. *Nguyen W., Duncan J.F., Jen G., Ostertag C.P.* Influence of matrix cracking and hybrid fiber reinforcement on the corrosion initiation and propagation behaviors of reinforced concrete // *Corrosion Science*. 2018. V. 140. P. 168—181.
4. *Meng W., Khayat K.H.* Experimental and numerical studies on flexural behavior of ultra-high-performance concrete panels reinforced with embedded glass fiber-reinforced polymer grids // *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*. 2016. No. 2592. P. 38—44.
5. *Тишков Е.В., Пономаренко Ю.Е., Роскошный С.С., Мосин М.В.* Промерзание оснований фундаментов зданий и сооружений: причины и последствия // *Вестник СибАДИ*. 2015. № 5(45). С. 93—99.
6. *Fursa T.V., Petrov M.V., Dann D.D.* Developing a Nondestructive Method for Revealing Defective Areas in Reinforced Concrete Under Bending Conditions // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2019. V. 55. P. 293—298.
7. *Fursa T.V., Petrov M.V. and Dann D.D.* A method for evaluating failure in reinforced concrete under bending based on the response of electrical parameters to an impact action // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2018. V. 54. No. 7. P. 519—527.
8. *Guo F., Yu Z., Liu P. and Shan Z.* Practical issues related to application of electromechanical impedance-based method in concrete structural health monitoring // *Res. Nondestr. Eval*. 2015. V. 27. P. 26—33.
9. *Леденев В.В., Однолько В.Г., Колесникова А.В.* Причины повреждений и разрушений кирпичных зданий // *Вестник ТГТУ*. 2014. Т. 20. № 1. С. 141—151.
10. *Мулюков Э.И.* Последствия защелачивания глинистых грунтов оснований фундаментов // *Вестник академии наук РБ*. 2008. Т. 13. № 4. С. 44—49.
11. *Невзоров А.Л., Чуркин С.В.* Деформации здания на свайном фундаменте под действием сил морозного пучения // *Вестник ПНИПУ*. 2015. № 1. С. 79—90.

12. *Lushnikov V.V.* Building deformation measurements for estimation of eluvial deposit characteristics // *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2011. No. 3. P. 16—22.
 13. *Леденев В.В., Однолько В.Г.* Анализ причин аварий зданий и пути повышения их надежности // *Вестник ТГТУ*. 2012. Т. 18. № 2. С. 449—457.
 14. Техническое заключение по результатам экспертного обследования и оценке технического состояния с разработкой рекомендаций по восстановлению эксплуатационной пригодности несущих строительных конструкций блока «А» жилого пятиэтажного дома № 1 г. Кызылорды. Шифр № 12. ИР. 28. Караганда. 2012.
 15. Техническое заключение по комплексному исследованию прочности и устойчивости несущих строительных конструкций здания епархиального управления и духовно-культурного центра при Константино-Еленинском соборе, расположенного в г. Астана. Караганда. 2015.
 16. *Бербеков Ж.В.* Неразрушающие методы контроля прочности бетона // *Молодой ученый*. 2012. № 11. С. 20—23.
 17. *Mekhtiyev A., Bulatbayev F., Neshina Y., Siemens E., Alkina A. and Shaigarayeva T.* The external mechanical effects on the value of additional losses in the telecommunications fiber optic cables under operating conditions // *Proceedings of the 6 th International Conference on Applied Innovation in IT*. 2018. V. 1. No. 6. P. 123—127.
 18. *Yurchenko A.V., Mekhtiyev A.D., Bulatbaev F.N., Neshina Y.G., Alkina A.D. and Madi P.Sh.* Investigation of additional losses in optical fibers under mechanical action // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2019. No. 516. P. 1—6.
 19. *Yurchenko A.V., Mekhtiyev A.D., Bulatbayev F.N., Neshina Y.G., Alkina A.D.* The Model of a Fiber-Optic Sensor for Monitoring Mechanical Stresses in Mine Working // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2018. V. 54. No. 7. P. 528—533.
 20. *Калитеевский Н.И.* Волновая оптика. М.: Высшая школа, 1995. 463 с.
 21. *Yurchenko A., Mekhtiyev A., Alkina A. and Yugai V.* Passive Perimeter Security Systems Based On Optical Fibers Of G 652 Standard // *Proceedings of International Conference on Applied Innovation in IT*. 2019. V. 7. No. 1. P. 31—36.
 22. *Венцель Е.С., Овчаров Л.А.* Теория вероятностей и инженерные приложения. М.: Наука, 1988. 480 с.
-