УДК 69.059.28

© И. В. Рубцов, канд. техн. наук, доцент
(Научно-исследовательский Московский
государственный строительный университет)
E-mail: rubcovIV@mgsu.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2018-15-1-40-49

© I. V. Rubtsov, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
(National Research Moscow State University
of Civil Engineering)
E-mail: rubcovIV@mgsu.ru

ОСНОВЫ МЕТОДОЛОГИИ СОЗДАНИЯ РИСК-ОРИЕНТИРОВАННЫХ МОДЕЛЕЙ МОНИТОРИНГА

FUNDAMENTALS OF METHODOLOGY OF CREATING THE RISK-FOCUSED MONITORING MODELS

Исследована методология определения надежности строительных конструкций. Целью исследования является доказательство необходимости ведения наблюдений за параметрами воздействия и за параметрами сопротивления воздействию, включая не только их средние значения, но и дисперсию. Показано, что увеличение коэффициента вариации параметра сопротивления воздействию до 0,3 при прочих неизменных величинах приводит к недопустимому снижению надежности до 0,95. Рассмотрены средства мониторинга деформаций конструкции. Приведены критерии выбора мест установки датчиков деформации и их базы. Показана неоднозначность интерпретации деформации в механические напряжения конструкции. Приведенное теоретическое обоснование позволит создавать системы мониторинга за состоянием строительного объекта или его отдельных элементов, учитывающие изменение статистических характеристик измеряемых параметров, что повысит точность прогнозирования развития негативных процессов, способных привести к чрезвычайной ситуации, связанной с разрушением объекта.

Ключевые слова: мониторинг, системы наблюдения, выбор параметров измерения, вероятность разрушения.

The article presents the methodology of assessing the reliability of structural elements in construction. The purpose of the study is to prove the necessity of carrying out monitoring over the influence parameters and the resistance to the influence parameters including not only their average values but also the dispersion. It is shown that the increase of the variation coefficient of the resistance to the influence parameter up to the value of 0.3 with other parameters being unchanged causes a non-admissible reduction of the reliability value to 0.95. The means of monitoring over the structure deformations are considered. The criteria for choosing the places for installation of strain gauges and the gauges' bases are presented. The ambiguity of deformation interpretation in mechanical stresses in structural elements is shown. The suggested theoretical substantiation will allow developing the monitoring systems for observance over the construction projects or their structural elements considering the change in statistical characteristics of the measured parameters. The use of such monitoring systems will improve the accuracy of forecasting the development of negative processes that are able to cause emergency situations resulting in the failure of the structures concerned.

Keywords: monitoring, monitoring systems for observation, choosing the parameters of measurement, the probability of failure.

Следуя за пушкинским мудрецом из «Сказки о золотом петушке», можно утверждать: да, именно обнаружение «беды незваной», распознавание места ее расположения и своевременное оповещение о ней являются задачами мониторинга уникальных, большепролетных, высотных и потенциально опасных сооружений. Социально-экономические последствия разру-

шения таких сооружений настолько значительны, что не поддаются описанию в технических терминах. Даже небольшие аварии, связанные с видимыми повреждениями конструкций, инженерных сетей или оборудования, могут привести к панике, давке и большому количеству жертв.

В связи с этим в последние десятилетия все большее внимание уделяется систематическим

обследованиям таких сооружений. Обследования, проводимые с заранее заданной периодичностью, называют мониторингом технического состояния объекта или его отдельных конструкций. Мониторинг может осуществляться различными методами и средствами: геодезический мониторинг [1–3], деформационный мониторинг [4], мониторинг напряженно-деформированного состояния [5], акустический мониторинг [6–7], мониторинг на основе пьезоэлектрических датчиков [8–9] геотехнический мониторинг [10]. Мониторинг может осуществляться как за комплексом параметров строительного объекта [11–12], так и за его отдельными конструкциями [13–15] и тоннелями [16].

При мониторинге может быть использована как проводная, так и беспроводная сеть [17]. Одной из основных целей мониторинга является обеспечение надежности [18–19] для предотвращения развития чрезвычайных ситуаций [20]. Отдельно следует отметить наблюдение за мостами [21–22] и гидротехническими сооружениями [23].

В последнее время все большее внимание уделяется созданию систем мониторинга, позволяющих определить степень риска дальнейшей эксплуатации сооружения [24]. Избежать негативных последствий можно только за счет исключения причины возникновения подобных ситуаций, т. е. увеличивая надежность сооружения, его конструкций, узлов и систем. Надежность конструкции является функцией надежности ее элементов и их взаимодействия. Надежность элементов конструкции по выбранному критерию определяется соотношением соответствующего параметра воздействия (внешней среды) S и параметра конструкции (сопротивление этому воздействию) R . Например, силовому воздействию внешней среды соответствует параметр прочности конструкции и/или деформативности, водопритоку соответствует водонепроницаемость, климатическому температурному воздействию — термическое сопротивление, пожарной нагрузке — огнестойкость и т. п. В простейшем случае можно полагать, что параметр воздействия внешней среды — детерминированная величина, которая определяется документами или расчетом и не изменяется

во времени, в этом случае ее дисперсия σ_s равна нулю, а математическое ожидание S неизменно.

Для определения надежности конструкции при детерминированном показателе воздействия необходимо знать закон распределения параметра сопротивления этому воздействию. Для дальнейших исследований будем полагать, что это нормальный (гауссов) закон распределения [25–26], описываемый уравнением

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}} \cdot dx, \quad (1)$$

где a и σ — математическое ожидание и дисперсия случайной величины x соответственно.

Нормальная плотность вероятности определяется равенством

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}}. \quad (2)$$

На рис. 1, а приведены графики нормальной плотности вероятности для различных значений математического ожидания и дисперсии. В практике расчетов вероятности обычно применяют иную переменную [26], называемую нормированной случайной величиной:

$$z = \frac{x-a}{\sigma}. \quad (3)$$

В этом случае уравнение (2) может быть трансформировано в уравнение

$$\varphi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}}. \quad (4)$$

Графически эта функция представлена на рис. 1, б.

Вероятность нахождения случайной величины x в интервале $-\infty < x < x_1$ может быть определена по зависимости [26]

$$P(x < x_1) = 0,5 + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{z_1} e^{-\frac{z^2}{2}} dz. \quad (5)$$

На графике рис. 1, б эта вероятность соответствует заштрихованной зоне. Предельное значение случайной величины параметра сопротивления воздействию x может быть определено как $x_{\max} = ka$, где k — коэффициент запаса. Коэффициент вариации $v = \sigma/a$. Подставляя эти выражения в (3), получим

$$z_1 = (k-1)a/\sigma = (k-1)/v. \quad (6)$$

Таким образом, мы определили все составляющие выражения (5). Графическая интерпретация надежности конструкции P как функции коэффициента запаса k при различных значени-

Рис. 1. Графики нормальной плотности вероятности (а) и нормированной случайной величины (б):
1, 2, 3 — $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha$, $\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3$; 2, 4, 5 — $\alpha_2 < \alpha_4 < \alpha_5$, $\sigma_2 = \sigma_4 = \sigma_5$

ях коэффициента вариации v представлена на рис. 2.

Анализ приведенной выше зависимости (5) и отражающих ее графиков (см. рис. 2) показывает, что вероятность неразрушения конструкции всегда ниже 100 %. Она зависит не только от коэффициента запаса, но и от коэффициента вариации — неоднородности свойств материала конструкции. Но обе эти величины могут меняться во времени и не в лучшую сторону. Значит, надежность будет падать. Характерный пример уменьшения надежности приведен на графиках (рис. 3), построенных в результате численных расчетов по приведенной выше зависимости при условии снижения коэффициента запаса и увеличении коэффициента вариации. Исходные значения коэффициентов вариации и коэффициентов запаса приведены в таблице.

Итак, мы видим, что надежность конструкции, являясь функцией времени, снижается по мере старения здания. Но что такое надежность? Трансформируем понятие 80 %-ной надежности сооружений в бытовую плоскость. Это означает, что каждое пятое сооружение рухнет. Кому после этого захочется находиться даже рядом с таким опасным предметом? Следовательно, мы должны обеспечить надежность сооружения на уровне 0,999, или даже выше — на уровне 0,9999. Вероятность отказа (разрушения) таких сооружений составит 10^{-3} и 10^{-4} соответственно. Но процесс старения, т. е. снижения надежности закономерен и неизбежен. Хорошо, если проекти-

ровщик учел это в проекте, а если нет? Сработали обстоятельства, которые не были обнаружены при инженерно-геологических изысканиях, или обстоятельства, не предусмотренные проектом, или процесс строительства осуществлялся не надлежащим образом. Что тогда? Авария? Катастрофа? Мы не можем допустить такого исхода. Как же быть? Ответ на этот вопрос почти очеви-

Рис. 2. Номограмма для определения надежности конструкции P в зависимости от коэффициента запаса k при различных значениях коэффициента вариации:
1 — $v = 0,10$; 2 — $v = 0,20$; 3 — $v = 0,30$; 4 — $v = 0,40$;
5 — $v = 0,50$; 6 — $v = 0,60$

Рис. 3. Снижение надежности элемента конструкции при ее деструкции (номера расчетных случаев соответствуют таблице)

ден. Следить за факторами воздействия и сопротивления этому воздействию.

Рассмотрим эту задачу на примере силовых взаимодействий. Фактор воздействия — это напряжения, действующие в конструкции. Фактор сопротивления воздействию — прочность конструкции (допустимые напряжения). Следовательно, мы должны следить за напряжениями в конструкции, с одной стороны, и за ее прочностью — с другой. Действующие в конструкции напряжения традиционно определяются как произведение модуля упругости на относительную деформацию. Средством измерения деформации являются тензометры (электрические, струнные, волоконно-оптические и т. п.), работающие с достаточно высокой точностью. Они могут быть установлены в конструкцию как на этапе возведения, так и на этапе эксплуатации сооружения. Но как быть с определением изменяющегося модуля деформации непосредственно в конструкции в процессе эксплуатации? Для этого существуют различного рода ультразвуковые приборы, дающие некоторую корреляционную связь параметров прохождения звуковой волны в бетоне с его прочностью. Затем, проведя огромное количество экспериментов, мы сможем получить корреляционную связь прочности и модуля упругости. Можно сразу получить зависимость модуля упругости от измеряемых ха-

рактеристик звуковой волны, но и в этом случае, как показывают проведенные эксперименты, доверительные интервалы окажутся слишком велики. Получить значения модуля упругости с точностью хотя бы $\pm 15\%$ с вероятностью 95 % окажется невозможным.

Рассмотрим процесс воздействия на конструкцию знакопеременной нагрузки. При отсутствии нагрузки соответствующее ей напряжение σ равно нулю. Относительная деформация ϵ также равна нулю. Приложение к конструкции некоторого возрастающего усилия приведет к возрастанию относительной деформации (кривая 1 на рис. 4). Разгрузке конструкции в выбранной нами системе координат будет соответствовать кривая 2. Повторное загрузку будет проходить по кривой 3. В рассмотренной ситуации модуль упругости не является однозначно определяемой величиной. Более того, как бы он ни был определен, однозначной связи напряжений и деформации нет. Величине деформации ϵ_1 могут соответствовать значения напряжений σ_1 и σ_2 . Заметим, что совпадение кривых 1 и 2, а тем более 3, невозможно. Доказательством тому является весьма простое логическое построение. Площадь, ограниченная кривыми 2 и 3, определяет работу внутренних сил трения, присутствующих в любой конструкции. Совпадение кривых означало бы, что работа сил внутреннего трения

Исходные данные для расчета надежности конструкции при изменении коэффициента запаса прочности и коэффициента вариации свойств материала конструкции

Возраст конструкции, годы	Коэффициент запаса прочности	Коэффициент вариации					
		Расчетный случай					
		1	2	3	4	5	6
0	1,5	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
20	1,4	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20
40	1,3	0,10	0,14	0,18	0,22	0,26	0,30
60	1,2	0,10	0,16	0,22	0,28	0,34	0,40
80	1,1	0,10	0,18	0,26	0,34	0,42	0,50
100	1,0	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60

равна нулю, т. е. внутреннее трение отсутствует. Последнее невозможно, а следовательно, невозможно и совпадение кривых. Различие между кривыми 2 и 3 тем больше, чем больше потери на внутреннее трение.

Следовательно, показания тензометров не являются величиной, напрямую связанной с напряжениями в конструкции. Для определения напряжений мы должны знать всю историю процесса.

Как видим, на нашем пути уже возникла масса почти непреодолимых препятствий. Пой-

дем дальше. Нам необходимо измерить реальную прочность материала конструкции. Выход есть, но он не вполне нас устраивает. Опять те же ультразвуковые исследования с очень малой степенью корреляции. Кроме этого, в функции определения надежности присутствует не только математическое ожидание (средние значения) параметров воздействия и сопротивления воздействию, но и коэффициенты вариации этих величин. Какими способами измерять эти коэффициенты? Вероятно, только установкой множества датчиков на каждый контролируемый параметр в заданной зоне исследований.

Стоимость такого мониторинга выходит за рамки реальности даже на столь ответственных объектах, каковыми являются спортивные сооружения. Это означает, что предложенный выше путь является тупиковым с точки зрения определения надежности сооружения — вероятности его безотказной работы. Однако он чрезвычайно важен и необходим с научной точки зрения. Имея базу данных по измеряемым показателям за какой-то достаточно продолжительный период времени, полученным с весьма малыми интервалами, мы можем решить две задачи. Первая заключается в подтверждении верности проведенных инженерно-геологических изысканий и правомерности примененной при проектировании расчетной модели сооружения. Вторая задача связана с уточнением параметров, входящих в расчетные зависимости, выводом новых зависимостей и составлением соответствующих расчетных моделей. Она также может быть решена на основе анализа баз данных, полученных при мониторинге. Тем самым понесенные затраты оказываются не напрасными.

Рис. 4. Зависимость напряжений σ от относительной деформации ϵ при знакопеременной нагрузке: 1 — кривая нагружения элемента конструкции; 2 — кривая, характеризующая его разгрузку; 3 — кривая повторного нагружения; 4 — прямая, соответствующая работе идеального материала

Говоря о тензометрах, нельзя не остановиться на выборе их базы — длины рабочей части чувствительного элемента, на которой и происходят все измерения. Для выбора базы необходимо четко представлять, с какой целью осуществляется измерение. Если мы хотим измерить изменения уровня напряжений в конструкции с резко изменяющейся геометрией, изготовленной из материала со стабильными и хорошо изученными свойствами, тогда необходимо применение тензометров с предельно короткой базой. Если свойства материала, и в первую очередь модуль упругости E , изменяются по объему и приобретают значения $E_1, E_2, \dots, E_p$, то короткобазовый тензометр не даст ответа на поставленный вопрос о напряжениях, действующих в исследуемой зоне.

Допустим, мы абсолютно точно измерили относительную деформацию ϵ . Каковы при этом напряжения σ ? Их величина $\sigma_1 = E_1 \epsilon$, или $\sigma_2 = E_2 \epsilon$, или $\sigma_i = E_i \epsilon$? Бетон, как и сталь, является многокомпонентным материалом. Отличие состоит в том, что величина зерна в стали составляет от 10 до 100 мкм, в то время как заполнитель бетона может иметь размер до 100 и более мм. Отличие в размерах составляет три порядка. В машиностроении хорошо зарекомендовали себя тензометры с базой от 5 до 20 мм. С этих позиций база тензометров для бетона должна составлять от 5 до 20 м.

Подойдем к вопросу о длине тензометра с точки зрения математической статистики. Допустим, что длина тензометра τ много больше длины участка l , в пределах которого свойства материала остаются неизменными: $\tau = nl$, где n — количество участков в длине тензометра. Относительное удлинение каждого участка при постоянном напряжении, действующем в исследуемой зоне, обратно пропорционально модулю упругости E_i на этом участке. Поэтому за характеристику материала на данном участке примем величину, обратно пропорциональную модулю упругости.

Определим дисперсию D этого параметра на длине тензометра, исходя из того что дисперсия суммы независимых случайных величин равна сумме дисперсий, а постоянный множитель выносится за знак дисперсии в квадрате:

$$D\left(\frac{1}{E_{\text{эф}}}\right) = D\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{E_i}\right) = \frac{1}{n^2} D\left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{E_i}\right) = \\ = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n D\left(\frac{1}{E_i}\right) = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n D_0 = \frac{1}{n^2} n D_0 = \frac{D_0}{n}, \quad (7)$$

где $E_{\text{эф}}$ — эффективный модуль упругости; D_0 — дисперсия свойств данного материала на участке протяженностью l .

Отсюда следует вывод, что среднее квадратичное отклонение, определяемое как квадратный корень из дисперсии, для тензометра, в n раз более длинного, чем базовый, будет в n меньше среднего квадратичного отношения базового тензометра. То же относится и к коэффициенту вариации. Коэффициент вариации показаний двухсотмиллиметрового тензометра будет в три с лишним раза больше коэффициента вариации двухметрового тензометра. Отсюда следует вывод о том, что для исследований многокомпонентных структурно неоднородных материалов, к которым относится бетон, предпочтительны тензометры с большей базой.

Но стоит ли при этом контролировать именно напряжения? Может быть, ограничиться другими параметрами, в том числе входящими в рассмотренную выше схему определения механических напряжений?

Напряжения, имеющие размерность $[H/m^2]$, не являются одной из семи основных единиц системы СИ (System International, SI), принятой 11-й генеральной конференцией по мерам и весам (1960 г.), где основными единицами являются: единица времени — секунда; длины — метр; массы — килограмм; силы тока — ампер; температуры — кельвин; количества вещества — моль; силы света — кандела. Напряжения относятся ко множеству производных единиц, образованных из основных единиц с помощью формул и уравнений, связывающих соответствующие величины. Тем самым мы не можем измерить напряжения напрямую, можем только косвенно, а это дополнительные погрешности, возникающие при измерении основных величин, входящих в состав производной. Именно об этом мы говорили выше.

Избежать погрешности такого рода можно только за счет соответствующего выбора контролируемых параметров. Другими словами, мониторить лучше параметры, измеряемые основ-

ными единицами системы СИ. Следуя этой логике, мы приходим к выводу о том, что наименьшие погрешности измерений будут при мониторинге безразмерных величин, например относительной деформации или акустической эмиссии. На втором месте, с этой точки зрения, следует поставить мониторинг основных величин системы СИ, в частности геометрических характеристик объекта, измеряемых в метрах, т. е. геодезический мониторинг. На третьей позиции окажется мониторинг простейших производных величин системы СИ — например, частоты колебаний, измеряемой в $[1/c]$. И только на четвертой позиции мы сможем поставить мониторинг таких величин, как напряжения, с весьма сложной размерностью $[Pa = N/m^2 = (кг \cdot м/с^2) / м^2 = кг/(м \cdot с^2)]$.

Одним из важнейших вопросов мониторинга является вопрос о выборе зон установки датчиков. Приведем некоторые соображения по этому вопросу. Расчеты, производимые на современных вычислительных комплексах, позволяют подобрать оптимальные соотношения в конструкции как по материалу, так и по геометрии. В этом смысле сооружение становится равнопрочным. Контролировать все конструкции практически невозможно. Как быть? Вероятно, выход из этой ситуации заключается в контроле наиболее нагруженных участков. Таковые непременно имеются в конструкции хотя бы потому, что армирование железобетонных конструкций конструктивно назначается одинаковым на некоторой площади, несмотря на непостоянство действующих на ней напряжений. Основываясь на этом факте, мы можем выделить зоны с повышенными напряжениями. Эти зоны будут тем заметнее, чем дальше проектировщик отошел от равнопрочности в угоду «конструктивным» соображениям, которые зачастую оказываются экономически более выгодными.

Вторым критерием по выбору мест установки датчиков является наличие зоны концентрации напряжений. Такие зоны возникают в местах резкого изменения геометрических размеров конструкции. В монолитном железобетоне это, например, места сопряжения колонн и перекрытий, в металлоконструкциях — стыковочные узлы, места сварки отдельных элементов. В этих зонах напряжения всегда выше, чем в приле-

гающих зонах с постоянным сечением. Если мы хотим фиксировать наибольшие значения напряжений, возникающих в конструкции, то мы должны ставить тензометры именно в этих местах.

Изложенный выше материал позволяет сделать следующие выводы:

- при мониторинге строительных конструкций, осуществляемом в целях определения безопасности их эксплуатации, необходимо вести наблюдения не только за величинами параметров воздействия и сопротивления этому воздействию, но и за их дисперсией;
- выбор базы тензометров должен проводиться в соответствии с размерами зерна материала конструкции.

Библиографический список

1. Park H. S., Lee H. M., Adeli H., and Lee I. A new approach for health monitoring of structures: terrestrial laser scanning // Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. 2007. Vol. 22, no. 1. Pp. 19–30.
2. Назаров И. А., Лавриненко Е. Д., Титов П. В. Результаты эксплуатации системы автоматизированного мониторинга деформаций строительных конструкций // Приволжский научный журнал. 2011. № 4. С. 60–67.
3. Симонян В. В., Кузнецов А. И., Черненко Э. С., Пятницкая Т. А. Инструментальное определение кренов стен Борисоглебского монастыря // Вестник МГСУ. 2011. № 1-2. С. 239–243.
4. Маринин Е. И. Тотальный мониторинг деформаций строительных конструкций: учеб. пособие. Самара: СГАСУ, 2011.
5. Коргин А. В., Ранов И. И., Коргина М. А., Поляков Д. А. Мониторинг изменения напряженно-деформированного состояния строительных конструкций зданий и сооружений на основе МКЭ-анализа пространственно-координатных моделей // Вестник МГСУ. 2007. № 4. С. 83–87.
6. Сагайдак А. И. Опыт применения метода акустической эмиссии для оценки состояния строительных конструкций // Вестник НИЦ «Строительство». 2014. № 9 (32). С. 71–80.
7. Сагайдак А. И. Методы контроля несущей способности конструкций с применением акустической эмиссии // Промышленное и гражданское строительство. 2017. № 1. С. 21–23.
8. Wait J. R., Park G., and Farrar C. R. Integrated structural health assessment using piezoelectric active

sensors // Shock and Vibration. 2005. Vol. 12, no. 6. Pp. 389–405.

9. Giurgiutiu V. Structural health monitoring with piezoelectric wafer active sensors predictive modeling and simulation // INCAS Bulletin. 2010. Vol. 2, no. 3. Pp. 31–44.

10. Осокин А. И., Татаринцов С. В., Денисова О. О., Макарова Е. В. Система геотехнического мониторинга как средство обеспечения безопасности строительства // Жилищное строительство. 2014. № 9. С. 10–18.

11. Abdelgawad A., Yelamarthi K. Internet of Things (IoT) Platform for Structural Health Monitoring // Wireless Communications and Mobile Computing. 2017. Vol. 2017, Article ID 6560797. 10 pages. doi:10.1155/2017/6560797.

12. Пателье М., Морозов А., Пфлюг, Сагадиев, Криминский, Глушков. Системы мониторинга строительных конструкций зданий и сооружений // Энергонабзор. 2015. № 10 (74). С. 40–41.

13. Пименов В. А., Хрянин П. В. Механическая безопасность: мониторинг стальных строительных конструкций // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы междунар. науч.-техн. конф. Могилев, 14–15 апреля 2016 г. С. 224–225.

14. Гусев Н. Н., Прозоровская С. Д., Бажухин А. В. Мониторинг технического состояния строительных конструкций и грунтовых оснований зданий и сооружений при возникновении чрезвычайных ситуаций // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). 2015. № 1 (13). С. 5–9.

15. Abdelgawad A., Yelamarthi K. Structural health monitoring: internet of things application // Proceedings of the 59th IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS '16), Abu Dhabi, United Arab Emirates, October 2016.

16. Bo Wang, Zhe Zhang, Chuan He, Hao-Long Zheng. Implementation of a long-term monitoring approach for the operational safety of highway tunnel structures in severely seismic area of China // Structural Control Health Monitoring. Version of record online, 16 Feb 2017.

17. Lazo C., Gallardo P., and Céspedes S. A bridge structural health monitoring system supported by the Internet of Things // Proceedings of the IEEE Colombian Conference on Communications and Computing (COLCOM '15), pp. 1–6, Popayán, Colombia, May 2015.

18. Савин С. Н., Ситников И. В., Данилов И. Л. Современные методы технической диагностики мониторинга как средство безопасной эксплуатации строительных конструкций // В мире неразрушающего контроля. 2008. № 4 (42). С. 14–18.

19. Мусаев В. К., Дикова Е. В., Самойлов С. Н., Стародубцев В. В., Сергунов А. Б. О приоритете мониторинга эксплуатационной безопасности строительного объекта // Актуальные проблемы социально-

экономической безопасности поволжского региона: сб. материалов VII междунар. науч.-практ. конф. Казанский филиал МИИТ. 2015. С. 155–157.

20. Гусев Н. Н., Яковлев В. И., Бажухин А. В. Учет влияющих факторов при мониторинге состояния оснований строительных конструкций зданий и сооружений с целью предупреждения чрезвычайных ситуаций // Вестник Воронежского института ГПС МЧС России. 2014. № 4 (13). С. 29–36.

21. Tennyson R. C., Mufti A. A., Rizkalla S., Tadros G., and Benmokrane B. Structural health monitoring of innovative bridges in Canada with fiber optic sensors // Smart Materials and Structures. 2001. Vol. 10, no. 3. Pp. 560–573.

22. Овчинников И. Г., Овчинников И. И., Нугаматова О. И., Михалдыкин Е. С. Прочностной мониторинг мостовых сооружений и особенности его применения. Ч. 1. Международный и отечественный опыт применения мониторинга // Транспортные сооружения. 2014. Т. 1. № 1 (1). С. 1–32.

23. Гарибин П. А., Марлей В. Е., Ольховик Е. О. Разработка автоматизированной системы для непрерывного контроля технического состояния гидротехнических сооружений // Гидротехника. XXI век. 2013. № 2. С. 50–53.

24. Costrantino D., Angelini M. G. Structural monitoring with geodetic survey of quadrifoglio condominium (Lecce) // The international Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-5/W3.2013. The Role of Glomais in Hydrogeological Risk, 27–28 February 2013, Padua, Italy.

25. Ржаницын А. Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность. М.: Стройиздат, 1978. 239 с.

26. Степнов М. Н. Статистическая обработка результатов механических испытаний. М.: Машиностроение, 1972. 232 с.

References

1. Park H. S., Lee H. M., Adeli H., and Lee I. A new approach for health monitoring of structures: terrestrial laser scanning. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2007, vol. 22, no. 1, pp. 19–30.

2. Nazarov I. A., Lavrinenko E. D., Titov P. V. *Rezultaty ehkspluatatsii sistemy avtomatizirovannogo monitoringa deformatsiy stroitel'nykh konstruktсий* [Results of operation of the automated monitoring system for surveillance over the deformations of building constructions]. *Privolzhskiy nauchnyy zhurnal – Volga scientific journal*, 2011, no. 4, pp. 60–67.

3. Simonyan V. V., Kuznetsov A. I., Chernenko Eh. S., Pyatnitskaya T. A. *Instrumental'noe opredelenie krenov sten Borisoglebskogo monastyr'ya* [Tool definition of the walls' inclination in Borisoglebsky Monastery]. *Vestnik MGSU – Bulletin of MGSU*, 2011, no. 1–2, pp. 239–243.
4. Marinin E. I. *Total'nyy monitoring deformatsiy stroitel'nykh konstruksiy. Ucheb. posobie* [Total monitoring of building construction deformations. Teaching manual]. Samara, SGASU Publ., 2011.
5. Korgin A. V., Ranov I. I., Korgina M. A., Polyakov D. A. *Monitoring izmeneniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya stroitel'nykh konstruksiy zdaniy i sooruzheniy na osnove MKEh-analiza prostranstvenno-koordinatnykh modeley* [Monitoring of change of the intense deformed condition of buildings and constructions on the basis of the finite-element method (FEM) analysis of spatial and coordinate models]. *Vestnik MGSU – Bulletin of MGSU*, 2007, no. 4, pp. 83–87.
6. Sagaydak A. I. *Opyt primeneniya metoda akusticheskoy ehmissii dlya otsenki sostoyaniya stroitel'nykh konstruksiy* [Experience of applying the method of acoustic emission for assessment of building constructions' condition]. *Vestnik NITs «Stroitel'stvo» – Bulletin of Research Center “Stroitel'stvo”*, 2014, no. 9 (32), pp. 71–80.
7. Sagaydak A. I. *Metody kontrolya nesushchey sposobnosti konstruksiy s primeneniem akusticheskoy ehmissii* [Control methods of the bearing ability of designs with application of acoustic emission]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo – Industrial and civil engineering*, 2017, no. 1, pp. 21–23.
8. Wait J. R., Park G., and Farrar C. R. Integrated structural health assessment using piezoelectric active sensors. *Shock and Vibration*, 2005, vol. 12, no. 6, pp. 389–405.
9. Giurgiuțiu V. Structural health monitoring with piezoelectric wafer active sensors predictive modeling and simulation. *INCAS Bulletin*, 2010, vol. 2, no. 3, pp. 31–44.
10. Osokin A. I., Tatarinov S. V., Denisova O. O., Makarova E. V. *Sistema geotekhnicheskogo monitoringa kak sredstvo obespecheniya bezopasnosti stroitel'stva* [The system of geotechnical monitoring as an instrument for ensuring the safety of construction]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo – Housing construction*, 2014, no. 9, pp. 10–18.
11. Abdelgawad A., Yelamarthi K. Internet of Things (IoT) Platform for Structural Health Monitoring. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2017, vol. 2017, Article ID 6560797 10 p. DOI:10.1155/2017/6560797.
12. Patelè M., et al. *Sistemy monitoringa stroitel'nykh konstruksiy zdaniy i sooruzheniy* [Monitoring systems for observance of buildings and constructions' condition]. *Ehnergonadzor – Power surveillance*, 2015, no. 10 (74), pp. 40–41.
13. Pimenov V. A., Khryanin P. V. *Mekhanicheskaya bezopasnost': monitoring stal'nykh stroitel'nykh konstruksiy* [Mechanical safety: monitoring of steel building constructions]. *Trudy mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. «Materialy, oborudovanie i resursosberegayushchie tekhnologii»* [Proc. of the Int. sci.-tech. conf. “Materials, equipment and resource-saving technologies”]. Mogilev, April 14–15, 2016, pp. 224–225.
14. Gusev N. N., Prozorovskaya S. D., Bazhukhin A. V. *Monitoring tekhnicheskogo sostoyaniya stroitel'nykh konstruksiy i gruntovykh osnovaniy zdaniy i sooruzheniy pri vozniknovenii chrezvychaynykh situatsiy* [Monitoring of technical condition of building constructions and soil bases of buildings and constructions in case of emergency situations]. *Prirodnye i tekhnogennyye riski (fiziko-matematicheskie i prikladnye aspekty) – Natural and technological hazards (physical and mathematical and application-oriented aspects)*, 2015, no. 1 (13), pp. 5–9.
15. Abdelgawad A., Yelamarthi K. Structural health monitoring: internet of things application. *Proceedings of the 59th IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS '16)*, Abu Dhabi, United Arab Emirates, October 2016.
16. Bo Wang, Zhe Zhang, Chuan He, Hao-Long Zheng. Implementation of a long-term monitoring approach for the operational safety of highway tunnel structures in severely seismic area of China. *Structural Control Health Monitoring. Version of record online*, 16 Feb 2017.
17. Lazo C., Gallardo P., and Céspedes S. A bridge structural health monitoring system supported by the Internet of Things. *Proceedings of the IEEE Colombian Conference on Communications and Computing (COLCOM '15)*, pp. 1–6, Popayán, Colombia, May 2015.
18. Savin S. N., Sitnikov I. V., Danilov I. L. *Sovremennyye metody tekhnicheskoy diagnostiki monitoringa kak sredstvo bezopasnoy ehkspluatatsii stroitel'nykh konstruksiy* [Modern methods of technical diagnostics of monitoring as means of safe operation of building constructions]. *V mire nerazrushayushchego kontrolya In the world of nondestructive control*, 2008, no. 4 (42), pp. 14–18.
19. Musaev V. K., et al. *O prioritete monitoringa ehkspluatatsionnoy bezopasnosti stroitel'nogo obekta* [On the priority of monitoring of operational safety of a construction object]. *Trudy VII mezhdunar. nauch.-prakt. konf. «Aktual'nye problemy sotsial'no-ehkonomicheskoy bezopasnosti povolzhskogo regiona»* [Proc. of the VII Int. sci. – pract. conf. “Current problems of social and economic safety of the Volga region region”]. MIIT Kazan branch Publ., 2015, pp. 155–157.
20. Gusev N. N., Yakovlev V. I., Bazhukhin A. V. *Uchet vliyayushchikh faktorov pri monitoringe sostoyaniya osnovaniy stroitel'nykh konstruksiy zdaniy i sooruzheniy s tselyu preduprezhdeniya chrezvychaynykh situatsiy* [Accounting of the influence factors at monitoring the

condition of building and constructions bases for the purpose of preventing emergency situations]. *Vestnik Voronezhskogo instituta GPS MChS Rossii – Bulletin of Voronezh institute of GPS Emercom of Russia*, 2014, no. 4 (13), pp. 29–36.

21. Tennyson R. C., et al. Structural health monitoring of innovative bridges in Canada with fiber optic sensors. *Smart Materials and Structures*, 2001, vol. 10, no. 3, pp. 560–573.

22. Ovchinnikov I. G., Ovchinnikov I. I., Nigamatova O. I., Mikhaldykin E. S. *Prochnostnoy monitoring mostovykh sooruzheniy i osobennosti ego primeneniya. Ch. 1. Mezhdunarodnyy i otechestvennyy opyt primeneniya monitoring* [Strength monitoring of bridge constructions and feature of its application. P. 1. International and domestic experience of application of monitoring]. *Transportnye sooruzheniya – Transport structures*, 2014, vol. 1, no. 1 (1), pp. 1–32.

23. Garibin P. A., Marley V. E., Ol'khovik E. O. *Razrabotka avtomatizirovannoy sistemy dlya nepreryvnogo*

kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya gidrotekhnicheskikh sooruzheniy [Development of the automated system for continuous control of technical condition of hydraulic engineering constructions]. *Gidrotekhnika. XXI vek – Hydraulic engineering. 21st century*, 2013, no. 2, pp. 50–53.

24. Costrantino D., Angelini M. G. Structural monitoring with geodetic survey of quadrifoglio condominium (Lecce). *The international Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XL-5/W3.2013. The Role of Glomacis in Hydrogeological Risk, 27-28 February 2013, Padua, Italy.

25. Rzhantsyn A. R. *Teoriya rascheta stroitel'nykh konstruktsiy na nadezhnost'* [The theory of calculation of building constructions on reliability]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1978, 239 p.

26. Stepanov M. N. *Statisticheskaya obrabotka rezul'tatov mekhanicheskikh ispytaniy* [Statistical processing of results of mechanical tests]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1972, 232 p.