

Применение комплексного подхода к определению остаточного ресурса промышленного здания с деформированными стропильными фермами

УДК 69.059.14

Шутова М.Н.

Канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленное гражданское строительство, геотехника и фундаментостроение» ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова» (г. Новочеркасск); e-mail: Shutovapublish@mail.ru,

Евтушенко С.И.

Д-р техн. наук, профессор, почетный работник высшего образования Российской Федерации, советник РААСН, член РОМГиФ, профессор кафедры «Информационные системы, технология и автоматизация строительства», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (г. Москва); e-mail: evtushenkosi@mgsu.ru

Статья получена: 12.10.2019. Рассмотрена: 08.11.2019. Одобрена: 10.11.2019. Опубликовано онлайн: 26.11.2019. ©РИОР

Аннотация

Статья посвящена проблеме объективной оценки остаточного ресурса на основе комплексного подхода, использующего вероятностные методы и теорию графов. В качестве объекта для оценки выбрано одноэтажное здание промышленного цеха в г. Таганроге. При обследовании выявлены типичные для промышленных зданий дефекты и повреждения — замачивание, выветривание раствора, коррозия и отсутствие лакокрасочного покрытия, а также нетипичные дефекты — гибели механической природы в различных элементах ферм. Данные повреждения являются концентраторами напряжений, поэтому для расчета напряженно-

деформируемого состояния на таких участках была создана трехмерная модель стропильной фермы с имитацией повреждений и рассчитана конечно-элементная модель в ПК ANSYS. По результатам расчета установлено, что в наиболее нагруженном сечении с дефектом (опорный раскос) возникают значительные напряжения, близкие к расчетному сопротивлению металла, чем понижают общую вероятность безотказной работы фермы. Расчет надежности фермы был проведен с использованием вероятностных методов, относительная надежность остальных конструкций была определена на основе внешних признаков и проверке характеристик конструкций методами неразрушаю-

APPLICATION OF A COMPLEX APPROACH FOR THE DETERMINATION OF THE RESIDUAL LIFE OF AN INDUSTRIAL BUILDING WITH DEFORMED SLING TRUSSES

Marina Shutova

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Industrial Civil Engineering, Geotechnics and Foundations, Platov South-Russian State Polytechnical University (NPI), Novocherkassk; e-mail: Shutovapublish@mail.ru

Sergey Evtushenko

Doctor of Engineering, Professor, Honored Worker of Higher Education of Russia, Professor, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow; e-mail: evtushenkosi@mgsu.ru

Manuscript received: 12.10.2019. **Revised:** 08.11.2019. **Accepted:** 10.11.2019. **Published online:** 26.11.2019. ©RIOR

Abstract.

The article is devoted to the problem of objective estimation of residual resource based on a complex approach using probabilistic methods and graph theory. A single-storey building of the industrial workshop in Taganrog was chosen as an object for

evaluation. The survey revealed typical defects and damages for industrial buildings - soaking, weathering of the solution, corrosion and absence of paint coating, as well as atypical defects - cuts of mechanical nature in various elements of farms. These damages are stress concentrators, so a three-dimensional model of the sling truss with damage simulation was created to calculate the stress-strain state at such sites and a finite element model was calculated in the ANSYS. According to the calculation results, it was found that in the most loaded section with defect (reference brace) there are significant stresses close to the design resistance of the soil, which reduces the total probability of failure-free operation of the truss. The calculation of the probability of failure-free operation for the truss was carried out using probabilistic methods, the relative reliability of the rest of the structures was determined on the basis of external characteristics and inspection of the characteristics of the structures by non-destructive testing methods. It has been established that the residual life in the calculation by the combined method is 17,3 years.

Keywords: residual life, survey of buildings and structures, technical condition of structures, probabilistic methods, graph theory.

шего контроля. Установлено, что остаточный ресурс при расчете комбинированным методом составляет 17,3 года.

Ключевые слова: остаточный ресурс, обследование зданий и сооружений, техническое состояние конструкций, вероятностные методы, теория графов.

Определение остаточного срока службы зданий и сооружений производится различными способами, в зависимости от действующей в каждой стране нормативной документации и исторически сложившихся подходов к определению остаточного ресурса.

Многие подходы являются стандартными (расчет максимальной нагрузки как статической переменной в наиболее опасном поперечном сечении участка [1], но многие подходы являются новаторскими: например, в работе [2] основным критерием вычисления при определении параметров индекса надежности является стоимость.

Масштабное исследование остаточного ресурса было проведено А. Патроном, К. Кремоном с использованием данных наблюдений 120 европейских мостов старше 100 лет [3]. Остаточный срок службы был найден в предельном состоянии с учетом неопределенности механических характеристик металлов и их усталостного разрушения. Основными методами определения остаточных характеристик долговечности и надежности являются *FORM* (надежность первого порядка) и *ISM* (отбор проб) [4].

В настоящее время в России существует несколько методов определения показателей долговечности и надежности, в том числе и остаточного ресурса), основанных на детерминистических расчетах и аппарате теории вероятностей.

По ограничивающим условиям (детерминистический расчет) остаточный срок службы определяют следующими методами: по статической прочности; скорости коррозии; усталостной прочности металла; по ухудшению физических свойств [5].

У большинства российских экспертов наиболее распространен метод А. Н. Добромыслова [6; 7] на основе визуального осмотра (физического износа), в котором определяется относи-

тельная надежность зданий и остаточный срок службы.

В качестве объекта исследования авторами рассмотрен существующий цех промышленного предприятия в г. Таганроге Ростовской области.

Обследование технического состояния строительных конструкций здания цеха было проведено в октябре 2019 г., в результате чего было выявлен ряд серьезных дефектов, влияющих на техническое состояние и работоспособность конструкций.

Здание цеха представляет собой одноэтажное трехпролетное промышленное здание, прямоугольное в плане. Дата ввода в эксплуатацию — 1973 г.

Размеры здания в осях 120 × 66 м, ширина пролетов по 24 м и 18 м (рис. 1–3).

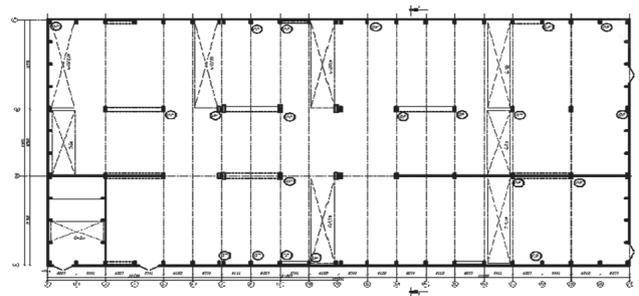


Рис. 1. План цеха

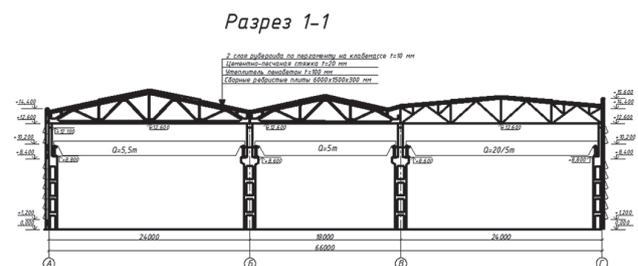


Рис. 2. Разрез поперечный

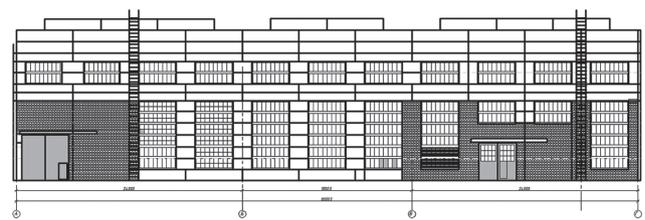


Рис. 3. Фасад А-Г

По конструктивной схеме здание цеха является каркасным. Фундаменты под колонны цеха — железобетонные монолитные стакан-

ного типа. Колонны — сборные железобетонные, стропильные фермы в осях «А-В» — сборные железобетонные, стропильные фермы в осях «В-Г» — металлические, подстропильные фермы — металлические.

При обследовании строительных конструкций здания цеха были выполнены следующие работы: определение соответствия строительных конструкций здания проектной документации и требованиям нормативных документов, выявление дефектов и повреждений элементов и узлов конструкций здания с составлением ведомостей дефектов и повреждений; определение пространственного положения строительных конструкций здания, их фактических сечений и состояния соединений; определение фактической прочности материалов и строительных конструкций здания в сравнении с проектными параметрами; определение степени коррозии арматуры и металлических элементов строительных конструкций.

Для определения категории технического состояния (относительной надежности) здания был выбран метод с использованием сетевого графа. Сетевая модель системы «Здание» (рис. 4) состоит из следующих вершин, характеризующих относительную надежность (вероятность безотказной работы) для следующих случаев: 1 — исправное состояние объекта; 2 — состояние коммуникаций; 3 — состояние отделки, в том числе гидроизоляции; 4 — состояние прилегающей территории, 5 — состояние ограждающих конструкций (стен и плит покрытия); 6 — состояние металлических стропильных ферм; 7 — состояние железобетонных колонн; 8 — состояние оснований и фундаментов; 9 — разрушение объекта; ребра — проявление взаимодействий подсистем [6; 7].

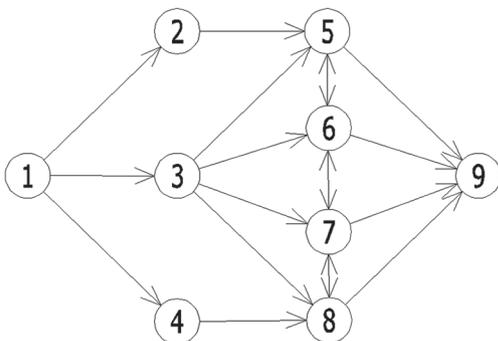


Рис. 4. Сетевая модель системы «Здание»

Согласно графу разрушение здания (пусть между вершинами 1 и 9) может пройти по любому из полных путей.

Относительная поврежденность j -той системы равна ϵ_j . Для данной сетевой модели:

$$Y_{\text{общ}} = 1 - \prod_{j=1}^{15} f_j.$$

Категория технического состояния, как и показатели надежности (вероятность отказа и безотказной работы) для всех конструкций, кроме стропильных металлических ферм, оценивались согласно методике [8; 9] и сведены в табл. 1.

При обследовании стропильных ферм обнаружены следующие дефекты и повреждения: ветхое состояние антикоррозионного лакокрасочного покрытия части здания в осях В-Гх1-21, поверхностная коррозия элементов металлических ферм; местные погибы верхних и нижних полков, расколов и стоек фермы (рис. 5, табл. 2); выгиб стойки фонаря.

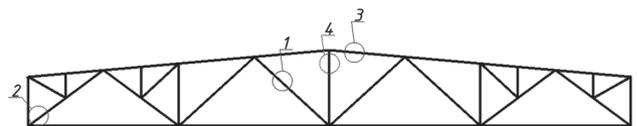


Рис. 5. Схема расположения точек погибов элементов фермы

Расчет был произведен с использованием метода конечных элементов в ПК ANSYS. К стропильной ферме в месте опирания прогонов была приложена узловaя нагрузка от веса кровельного настила и прогонов, временная нагрузка на покрытие (снеговая, рис. 6, а). Нагрузка от собственного веса фермы задана автоматически (рис. 6, б).

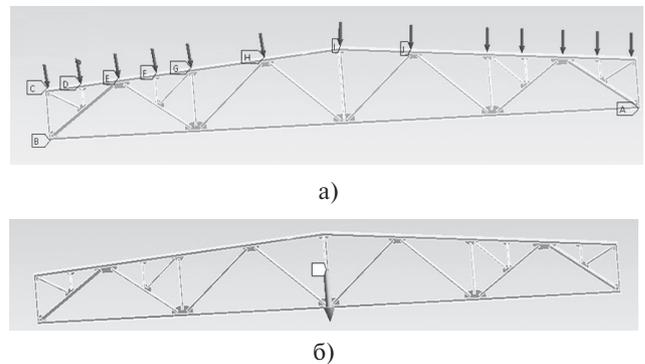


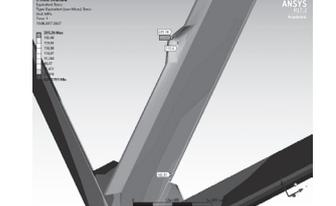
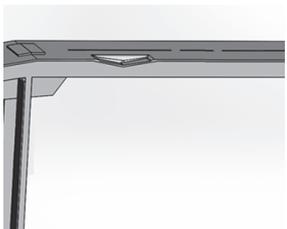
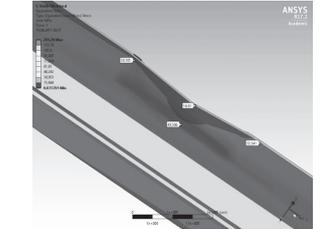
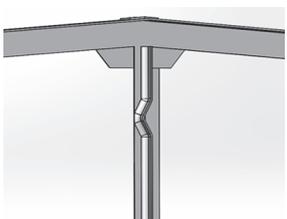
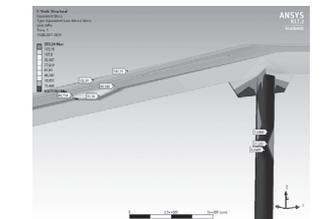
Рис. 6. Нагрузка на ферму: а — на кровлю и временная; б — собственный вес

Таблица 1

Результаты оценки технического состояния конструкций цеха

№	Подсистема конструкций согласно рис. 4	Описание состояния	Категория технического состояния	Вероятность безотказной работы
2	Коммуникации	Прорывов, разрывов, ржавчины нет	Работоспособная	0,95
3	Отделка	Частично отсутствует АКЗ металлоконструкций	Ограниченно работоспособная	0,8
4	Прилегающая территория	Частично разрушена отмостка	Ограниченно работоспособная	0,85
5	Ограждающие конструкции (плиты, стены)	Плиты — регулярное замачивание, разрушение защитного слоя бетона и обнажение арматурной сетки полок и ребер плит, трещины в продольных и поперечных ребрах, пробиты непроектные сквозные отверстия. Стены, кирпичная кладка — трещины, фрагментарное, отсутствие остекления, размораживание, частичное разрушение; стеновые панели — выпадение бетона из швов, нарушение герметичности швов, большая площадь замачивания, разрушение защитного слоя бетона и коррозия арматуры, трещины, искривление из вертикальной плоскости, сколы ребер	Ограниченно работоспособная	0,8
7	Колонны	Трещины вдоль рабочей арматуры, разрушение защитного слоя бетона с обнажением и без обнажения арматуры, замачивание основания, замасливание бетона на локальных участках, поверхностная коррозия обрамления и закладных деталей	Ограниченно работоспособная	0,83
8	Основания и фундаменты	Дефектов и повреждений, свидетельствующих о неравномерных осадках — не обнаружено	Работоспособная	0,95

Таблица 2

Точка, дефект	Фото дефекта	Вид на конечно-элементной модели	Вид на эпюре напряжений
1			
2			
3			
4			

Если стержни системы сделаны из одного материала, но имеют различные поперечные сечения, то формула вероятности не разрушения системы:

$$1 - A(\sigma) = \prod_{i=1}^n [1 - P_i(\sigma_i)],$$

где $\sigma_i = \frac{F \times N_i^1}{A_i}$ для растянутых стержней,

и $\sigma_i = \frac{F \times N_i^1}{A_i \times \varphi}$ для сжатых стержней (в каждом

стержне свое конкретное напряжение).

Здесь F — внешняя нагрузка;

σ_i — напряжение, вызываемое усилием $F \cdot N_i^1$ в i -том стержне;

N_i^1 — усилие в i -том элементе от внешней нагрузки $F = 1$;

A_i — площадь сечения i -того стержня.

Функция распределения прочности элементов:

$$P(\sigma) = \frac{1}{\sigma(R_y)\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left[-\frac{(\sigma - \overline{R_y})^2}{2\sigma^2(R_y)}\right] d\sigma,$$

где σ — напряжение, действующее в стержне.

Значение $P(\sigma)$ есть вероятность того, что случайный предел текучести R_y будет меньше действующего напряжения σ , т.е. вероятность разрушения. Через интеграл вероятности Гаусса:

$$P(\sigma) = \frac{1}{2} + \Phi\left(\frac{|\sigma| - \overline{R_y}}{\sigma(R_y)}\right).$$

Результаты расчета напряжений (согласно расчету в ПК ANSYS) и вероятности разрушения фермы в точках с максимальными напряжениями (согласно формуле (1)) сведены в табл. 3. Материал фермы — сталь С245, $R_y = 240$ МПа, — м.о. предела текучести; $\sigma(R_y) = 20$ МПа,

Таблица 3

Вероятность разрушения элементов фермы

Параметр	Номер точки на рис. 5				Верхний пояс	Нижний пояс
	1	2	3	4		
Напряжение, МПа	6,1	235,4	49,2	102,1	202,6	113,2
Вероятность разрушения	0,0	0,163	0,0	0,0	0,0	0,0

Расчет полных путей сведен в табл. 4.

Таблица 4

Расчет вероятности разрушения здания

Полный путь	Вероятность разрушения	Полный путь	Вероятность разрушения
1-2-5-9 ($f_1 = P_2 \cdot P_3$)	0,01	1-3-6-7-9 ($f_9 = P_3 \cdot P_6 \cdot P_7$)	0,006
1-3-5-9 ($f_2 = P_3 \cdot P_5$)	0,04	1-3-6-7-8-9 ($f_{10} = P_3 \cdot P_6 \cdot P_7 \cdot P_8$)	0,0
1-3-6-9 ($f_3 = P_3 \cdot P_6$)	0,032	1-3-7-8-9 ($f_{11} = P_3 \cdot P_7 \cdot P_8$)	0,002
1-3-7-9 ($f_4 = P_3 \cdot P_7$)	0,034	1-4-8-9 ($f_{12} = P_4 \cdot P_8$)	0,008
1-3-8-9 ($f_5 = P_3 \cdot P_8$)	0,01	1-4-8-7-9 ($f_{13} = P_4 \cdot P_8 \cdot P_7$)	0,001
1-3-5-6-9 ($f_6 = P_3 \cdot P_5 \cdot P_6$)	0,006	1-4-8-7-6-9 ($f_{14} = P_4 \cdot P_8 \cdot P_7 \cdot P_6$)	0,0
1-3-5-6-7-9 ($f_7 = P_3 \cdot P_5 \cdot P_6 \cdot P_7$)	0,001	1-4-8-7-6-5-9 ($f_{15} = P_4 \cdot P_8 \cdot P_7 \cdot P_6 \cdot P_5$)	0,0
1-3-5-6-7-8-9 ($f_8 = P_3 \cdot P_5 \cdot P_6 \cdot P_7 \cdot P_8$)	0,0	Относительная поврежденность здания	0,189

Остаточный ресурс здания определяется как время до наступления неработоспособного состояния (относительная надежность $P_{нер} = 0,75$):

$$R_{ост} = \frac{\ln P_{нер} - \ln P_{зд}}{\lambda_{зд}},$$

где $\lambda_{зд}$ — скорость разрушения здания:

$$\lambda_{зд} = \frac{\ln P_{зд}}{t},$$

где t — время от ввода в эксплуатацию до обследования.

Остаточный ресурс здания равен:

$$R_{ост} = \frac{\ln 0,75 - \ln 0,811}{\ln 0,811} \times 46 = 17,3 \text{ года.}$$

Проведенный анализ эффективности применения комплексного подхода с использованием вероятностных методов и теории графов к определению остаточного ресурса зданий позволяет учесть техническое состояние каждого вида конструкций с учетом их дефектов.

Литература

1. *Czarnecki A.A.* Lifetime reliability profiles for evaluation of corroded steel girder bridges / *Czarnecki A.A., Nowak A.S.* // Proceedings of the 3rd International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management — Bridge Maintenance, Safety, Management, Life-Cycle Performance and Cost. 2006. P. 140–146.
2. *Xiang Y.Q.* Service life prediction of concrete bridges based on concrete carbonation depth near coastal areas / *Xiang Y.Q., Guo D.M., Wu Q.Q.* // Proceedings of the 3rd International Conference on the Durability of Concrete Structures, ICDCS 2012 Concrete Structures, ICDCS 2012 Concrete Structures, ICDCS 2012.
3. *Patrón A.* Improved assessment methods for static and fatigue resistance of metallic railway bridges in Europe / *Patrón A., Cremona C., Hoehler S., (...), Larsson T., Maksymowicz M.* // Proceedings of the 3rd International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management — Bridge Maintenance, Safety, Management, Life-Cycle Performance and Cost. 2006. P. 751–753.
4. *Abdelouafi E.G.* Reliability Analysis of Reinforced Concrete Buildings: Comparison between FORM and ISM / *Abdelouafi E.G., Benaissa K., Abdellatif K.* // Procedia Engineering. 2015. No. 114. P. 650–657.
5. *Lin S.-Z.* Experimental study on frost resistance durability and service life prediction of normal cement concrete / *Lin S.-Z., Li H.-M., Zhang H.-Y.* // Advanced Materials Research. 2010. No. 368–373. P. 2425–2429.
6. *Skibin G.M., Shutova M.N., Subbotin A.I.* Approaches for development of a universal method for calculating the residual life of buildings and structures // *Procedia Engineering*. 2016. T. 150. P. 1715–1720.
7. *Соболев В.И.* Математическая модель определения остаточного ресурса зданий и сооружений [Текст] / *В.И. Соболев [и др.]* // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. — 2006. — № 2.
8. *Добромыслов А.Н.* Диагностика повреждений зданий и инженерных сооружений [Текст] / *А.Н. Добромыслов.* — Litres, 2015. — 121 с.
9. *Добромыслов А.Н.* Оценка надежности зданий и сооружений по внешним признакам: справоч. пособие [Текст] / *А.Н. Добромыслов* — М.: Изд-во Ассоц. строит. вузов, 2008. — 72 с.
10. *Райзер В.Д.* Теория надежности в строительном проектировании [Текст] / *В.Д. Райзер.* — М.: Изд-во Ассоц. строит. вузов, 1998. — 230 с.
11. *Райзер В.Д.* Теория надежности сооружений. Теория надежности в строительном проектировании [Текст] / *В.Д. Райзер.* — М.: Изд-во Ассоц. строит. вузов, 2010. — 381 с.

References

1. *Czarnecki A.A.* Lifetime reliability profiles for evaluation of corroded steel girder bridges / *Czarnecki A.A., Nowak A.S.* // Proceedings of the 3rd International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management — Bridge Maintenance, Safety, Management, Life-Cycle Performance and Cost. 2006. P. 140–146.
2. *Xiang Y.Q.* Service life prediction of concrete bridges based on concrete carbonation depth near coastal areas / *Xiang Y.Q., Guo D.M., Wu Q.Q.* // Proceedings of the 3rd International Conference on the Durability of Concrete Structures, ICDCS 2012 Concrete Structures, ICDCS 2012 Concrete Structures, ICDCS 2012.
3. *Patrón A.* Improved assessment methods for static and fatigue resistance of metallic railway bridges in Europe / *Patrón A., Cremona C., Hoehler S., (...), Larsson T., Maksymowicz M.* // Proceedings of the 3rd International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management — Bridge Maintenance, Safety, Management, Life-Cycle Performance and Cost. 2006. P. 751–753.
4. *Abdelouafi E.G.* Reliability Analysis of Reinforced Concrete Buildings: Comparison between FORM and ISM / *E.G. Abdelouafi, K. Benaissa, K. Abdellatif* // *Procedia Engineering*. 2015. No. 114. P. 650–657.
5. *Lin S.-Z.* Experimental study on frost resistance durability and service life prediction of normal cement concrete / *Lin S.-Z., Li H.-M., Zhang H.-Y.* // *Advanced Materials Research*. 2010. No. 368–373. P. 2425–2429.
6. *Skibin G.M., Shutova M.N., Subbotin A.I.* Approaches for development of a universal method for calculating the residual life of buildings and structures // *Procedia Engineering*. 2016. T. 150. P. 1715–1720.
7. *Sobolev V.I.* Matematicheskaya model' opredeleniya ostatochnogo resursa zdaniy i sooruzhenij [A mathematical model for determining the residual resource of buildings and structures]. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Severo-Kavkazskij region. Tekhnicheskije nauki* [News of higher educational institutions. North Caucasus region. Technical science]. 2006, I. 2.
8. *Dobromyslov A.* *Diagnostika povrezhdenij zdaniy i inzhenernykh sooruzhenij* [Diagnosis of damage to buildings and engineering structures]. Litres Publ., 2015. 121 p.
9. *Dobromyslov A.N.* *Oценка nadezhnosti zdaniy i sooruzhenij po vneshnim priznakam: Spravochnoe posobie* [Assessment of the reliability of buildings and structures by external signs: Reference manual]. Moscow: ASV Publ., 2008. 72 p.
10. *Rajzer V.D.* *Teoriya nadezhnosti v stroitel'nom proektirovanii* [Reliability theory in building design]. Moscow: Assoc. stroit. Vuzov Publ., 1998. 230 p.
11. *Rajzer V.D.* *Teoriya nadezhnosti sooruzhenij* [Theory of reliability of structures]. *Teoriya nadezhnosti v stroitel'nom proektirovanii* [Reliability theory in building design]. Moscow: ASV Publ., 2010. 381 p.