

УДК 69.07+699.88

Валиуллин Д.А. – студент

E-mail: damirvall@rambler.ru

Надршина А.Р. – студент

E-mail: n.ice01@mail.ru

Майстренко И.Ю. – кандидат технических наук, доцент

E-mail: igor_maystr@mail.ru

Зиннуров Т.А. – кандидат технических наук, старший преподаватель

E-mail: leongar@mail.ru

Майстренко Т.И. – студент

E-mail: maystrenko1496@mail.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1

Оценка остаточного ресурса стальной конструкции, эксплуатируемой в агрессивной среде

Аннотация

В работе решается задача определения остаточного ресурса элемента стальной конструкции, проработавшего в агрессивной среде в течение достаточно продолжительного промежутка времени, с привлечением доступных программно-вычислительных средств регрессионного анализа. В работе представлен общий алгоритм расчета остаточного ресурса элемента стальной конструкции, эксплуатируемой в агрессивной среде, позволяющий учитывать индивидуальные особенности конструктивного элемента в составе конструкции. При реализации задач исследования также учтены допуски на начальные размеры элемента и допуски на точность обмерных работ.

Ключевые слова: остаточный ресурс, стальная конструкция, регрессионный анализ, агрессивность среды, интервальная оценка.

Введение

Из инженерной практики известно, что вероятность отказа и опасность аварий инженерного сооружения во многом зависят от сроков и условий эксплуатации, заданного уровня надежности элементов и деталей конструкции, а также выбора материалов и технических решений, которые при аварийном выходе из строя или локальном повреждении отдельных несущих элементов не ведут к прогрессирующему обрушению сооружения [1].

Учитывая, что задача расчета остаточного ресурса является многопараметрической, в данной работе исходные данные для расчета остаточного ресурса элемента стальной конструкции разделены на шесть отличительных ступеней.

Формирование исходных данных

На первой ступени дается оценка начальных геометрических факторов расчетных сечений на стадии проектирования. Для формирования указанных первичных исходных данных используется имеющаяся конструкторская документация, выданная предприятием-изготовителем, техническое задание на проектирование, технические условия на изготовление, либо данные обследования и испытания ответственных конструкций при вводе технической системы в эксплуатацию. При этом учитываются предусмотренные технической документацией допускаемые отклонения как на размеры сечений прокатных элементов, так и на монтаж сборочных единиц (ГОСТ 19903-74, ГОСТ 27772-88 и ГОСТ 21778-81). Очевидно, что будет логичным на первой ступени сопоставить имеющиеся данные по допускаемым отклонениям с глубиной ожидаемого коррозионного поражения, в силу возможной взаимосвязи указанных факторов.

На второй ступени дается оценка геометрических характеристик расчетных сечений после эксплуатации технической системы в течение некоторого промежутка времени, при этом будем полагать возможным наличие неблагоприятных факторов, способствующих проявлению деградиционных процессов, включая коррозионный или абразивный износ расчетных элементов, а также процессов старения конструктивных

материалов [2]. Для получения указанных параметров второй ступени используются методы прямых и косвенных измерений размеров сечений при периодическом техническом обследовании и диагностировании с использованием методов неразрушающего физического контроля и визуально-измерительного контроля. Это позволяет получить выборки наблюдений за изменчивостью определяющих параметров, с заданным уровнем достоверности.

На третьей ступени определяются критерии предельных состояний, как правило, I и II групп, превышение которых ведет к исчерпанию показателей ресурса безопасной эксплуатации конструктивного элемента [1], а также расчетные комбинации, имеющие решающее или определяющее значение в определении состояния технической системы в целом или отдельного расчетного сечения, например, сочетания «нагрузка-прочность-среда-износ», «циклы нагрузки – усталостная прочность – процессы износа – среда эксплуатации».

На четвертой ступени выполняется формирование исходных параметров в виде нагрузок, внутренних усилий и напряжений в конструктивном элементе. При этом функциональное взаимодействие между указанными параметрами может быть достигнуто за счет использования классических методов строительной механики, механики разрушения, сопротивления материалов, а также экспериментальных исследований в соответствующей области знаний, например, применительно к мостовым конструкциям, техническим системам подъемно-транспортного машиностроения.

На пятой ступени формирования исходных параметров определяются расчетные характеристики материала конструкции или другие нормируемые показатели, например, допустимые прогибы конструкции, отрезки опасных значений периода колебаний от вертикальных динамических воздействий подвижной нагрузки на техническую систему [3].

На шестой ступени определяются параметры регрессионных моделей, которые будут использоваться для расчета остаточного ресурса. При этом следует иметь в распоряжении достаточный объем данных, позволяющий обеспечить репрезентативность и представительность выборок, а также создавать адекватные регрессионные модели, включающие детерминированные и случайные составляющие этих моделей. На этой ступени может потребоваться использование приемов работы с малыми выборками, так как в практике мониторинга технического состояния строительных объектов не всегда удается создать систему непрерывного мониторинга.

Общий алгоритм расчета

Для выполнения расчета остаточного ресурса выделено два основных этапа.

На первом этапе выбирается регрессионная модель, наилучшим образом описывающая показатели износа конструкции.

На втором этапе, с использованием выбранной регрессионной модели, прогнозируется развитие напряженно-деформированного состояния элементов конструкции и по критериям предельных состояний оценивается остаточный ресурс конструкции. Влияние неточностей измерений, допусков на конечный результат учитывается использованием доверительных интервалов для принятой доверительной вероятности.

Для наглядности в табл. 1-2 показано формирование исходных параметров для оценки расчетного сечения конструктивного элемента, геометрические размеры которого получены в ходе натурных обследований стальной конструкции специализированной организацией. Для учета возможных неточностей при формировании выборок из десяти измерений фактических толщин горизонтальных поясов и вертикальных стенок балки, производилась интервальная оценка параметров с доверительной вероятностью, равной 0,95.

Таблица 1

Начальные геометрические характеристики расчетного сечения элемента конструкции

Пролет, м	30,000 ^{±0,005}
Начальные геометрические размеры стальной коробчатой главной балки, мм	

Таблица 2

**Геометрические параметры расчетного сечения конструктивного элемента
на конечных и промежуточных интервалах времени эксплуатации**

Геометрические размеры стальной коробчатой главной балки по результатам обмеров после 16 лет эксплуатации в слабоагрессивной среде, мм	
Геометрические размеры стальной коробчатой главной балки по результатам обмеров после 22 года эксплуатации в слабоагрессивной среде, мм	
Геометрические размеры стальной коробчатой главной балки по результатам обмеров после 28 лет эксплуатации в слабоагрессивной среде, мм	
Геометрические размеры стальной коробчатой главной балки по результатам обмеров после 38 лет эксплуатации в слабоагрессивной среде, мм	

Для стальной коробчатой балки рассматриваются следующие наиболее характерные критерии предельных состояний:

а) прочность по нормальным напряжениям:

$$s_p(t) = \frac{M}{W_x(t)} \leq g_c \cdot R_y(t), \quad (1)$$

где $\sigma_p(t)$ и $R_y(t)$ – соответственно функции изменения во времени нормальных напряжений от изгиба и удельной прочности; γ_c – коэффициент условий работы; $W_x(t)$ – функция изменения во времени определяющего геометрического фактора сечения (момента сопротивления);

б) по местной устойчивости вертикальной стенки:

$$\frac{s_u(t)}{s_{кр}(t)} \leq g_c, \quad (2)$$

$$\frac{t_u(t)}{t_{кр}(t)} \leq g_c, \quad (3)$$

где $\sigma_u(t)$ и $\tau_u(t)$ – соответственно функции изменения во времени расчетных нормальных сжимающих и касательных напряжений; $\sigma_{кр}(t)$ и $\tau_{кр}(t)$ – функции изменения во времени критических нормальных сжимающих и касательных напряжений.

в) по вертикальному прогибу балки:

$$f_p(t) \leq [f_n], \quad (4)$$

где $f_p(t)$ – функция изменения во времени расчетного прогиба стальной коробчатой балки; $[f_n]$ – допустимый прогиб конструкции.

Для описания коррозионного износа элементов расчетного сечения рассмотрены модели математической регрессии в виде: степенной функции вида $f(x) = kx^n + b$; линейной функции вида $f(x) = kx + b$, полученной по сумме квадратов отклонений; линейной функции, полученной по сумме модулей отклонений; полинома вида $f(x) = c_0 + c_1x^1 + c_2x^2 + \dots + c_mx^m$.

В качестве меры того, насколько хорошо регрессия описывает систему наблюдений за изменением во времени толщин элементов расчетного сечения стальной коробчатой балки, использован коэффициент детерминации d_m , который представляет собой отношение объясненной части вариации ко всей вариации в целом [7]:

$$d_m = 1 - \frac{S_{Rm}^2}{S_m^2}, \quad (5)$$

где $S_{Rm}^2 = \sum_{j=1}^n [dx_{mj} - d\hat{x}_{mj}]^2$ – сумма квадратов отклонений фактических толщин от значений, полученных при помощи функции регрессии; $S_m^2 = \sum_{j=1}^n [dx_{mj} - \bar{dx}_{mj}]^2$ – сумма квадратов отклонений фактических толщин от их среднего статистического; m – индекс элемента расчетного сечения; n – количество элементов.

На первом этапе расчета остаточного ресурса выбираем модель математической регрессии (табл. 3), имеющую наиболее близкое к единице значение коэффициента детерминации, полученного по формуле (5):

а) для верхнего пояса – регрессия степенной функцией:

$$f [\delta x_1(\tau)] = -0,044 \times \tau^{0,777} + 12; \quad (6)$$

б) для нижнего пояса – регрессия линейной функцией

$$f [\delta x_2(\tau)] = 9,973 - 0,015 \times \tau; \quad (7)$$

в) для вертикальных стенок – регрессия линейной функцией

$$f [\delta x_3(\tau)] = 7,976 - 0,018 \times \tau. \quad (8)$$

По выбранным моделям математической регрессии (6-8) и исходным параметрам, приведенным в табл. 1-2, выполнены расчеты прогнозируемых значений напряженно-деформированного состояния рассматриваемой стальной коробчатой главной балки, затем по установленным критериям предельного состояния, см. неравенства (1-4), определен остаточный ресурс.

Таблица 3

Элемент расчетного сечения балки	Модель математической регрессии	S_{Rm}^2	S_m^2	d_m
Верхний пояс	Степенная функция	0,048	0,239	0,800
	Линейная функция (по сумме квадратов отклонений)	0,049		0,793
	Линейная функция (по сумме модулей отклонений)	0,050		0,790
	Полином	0,050		0,793
Нижний пояс	Степенная функция	0,029	0,136	0,787
	Линейная функция (по сумме квадратов отклонений)	0,024		0,827
	Линейная функция (по сумме модулей отклонений)	0,024		0,825
	Полином	0,026		0,809
Вертикальная стенка	Степенная функция	0,037	0,173	0,784
	Линейная функция (по сумме квадратов отклонений)	0,034		0,803
	Линейная функция (по сумме модулей отклонений)	0,036		0,794
	Полином	0,040		0,768

С учетом интервальных оценок для доверительной вероятности, равной 0,95, и времени эксплуатации конструкции к моменту оценки остаточного ресурса – 38 лет, получены следующие результаты:

а) прогноз времени достижения предельного состояния по условию прочности по нормальным напряжениям характеризуется интервалом от 41 до 59 лет (рис. 1), интервальная оценка остаточного ресурса получена в диапазоне от 3 лет до 21 года; при этом изменение момента сопротивления сечения за данный момент времени составляет $12851,4...13035,1 \text{ см}^3$ (рис. 2).

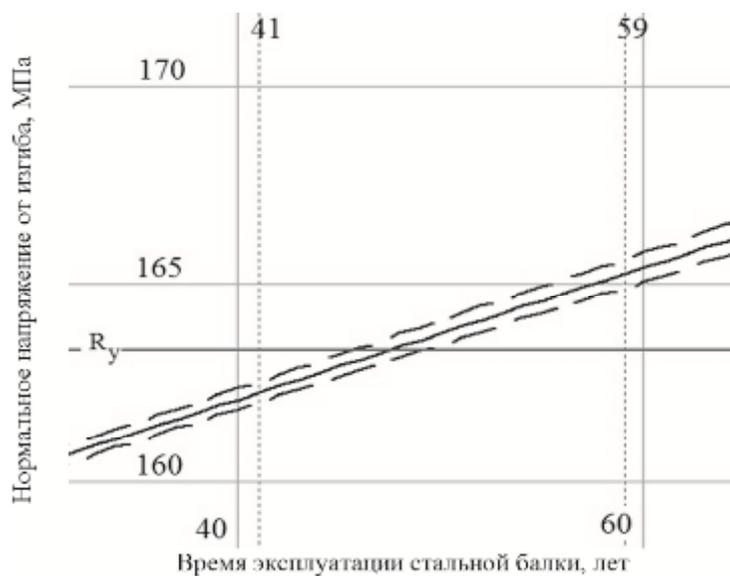


Рис. 1. Прогноз времени достижения предельного состояния по условию прочности по нормальным напряжениям

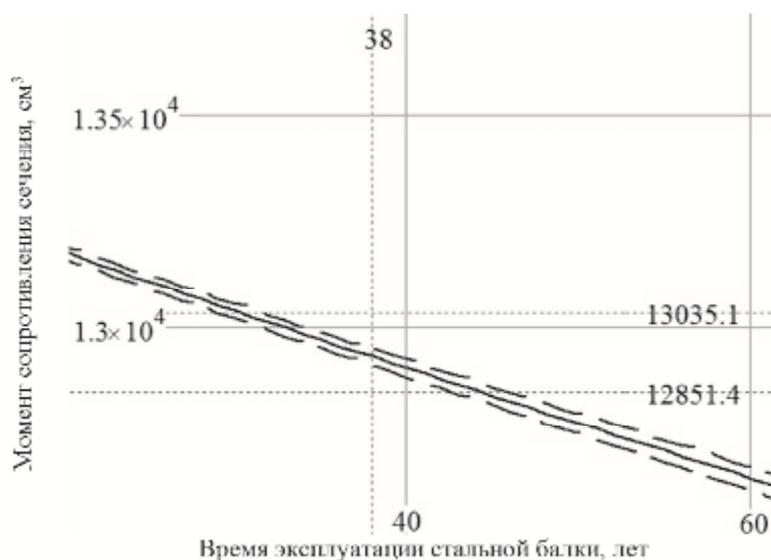


Рис. 2. Прогноз изменчивости момента сопротивления сечения

б) прогноз времени достижения предельного состояния по условию местной устойчивости вертикальной стенки характеризуется интервалом от 99 до 139 лет (рис. 3), интервальная оценка остаточного ресурса получена в диапазоне от 61 до 101 года;

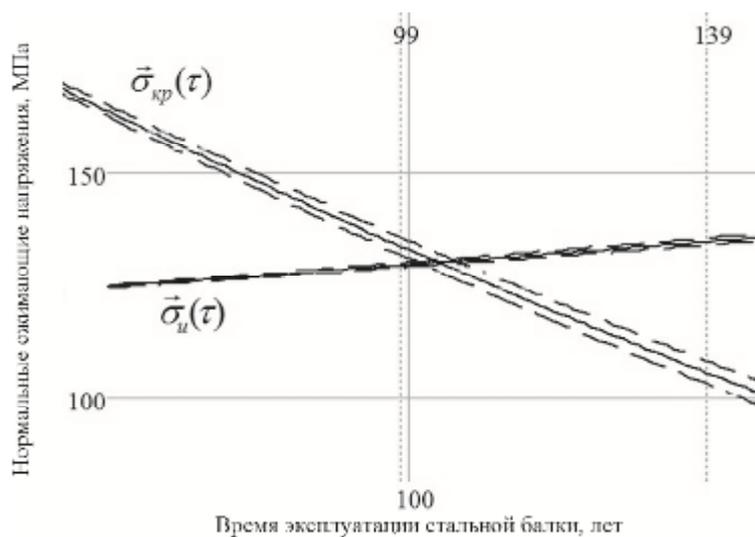


Рис. 3. Прогноз времени достижения предельного состояния по условию местной устойчивости вертикальной стенки

в) прогноз времени достижения предельного состояния по условию удовлетворения требований к нормативному прогибу в вертикальной плоскости характеризуется интервалом от 45 до 65 лет (рис. 4), интервальная оценка остаточного ресурса получена в диапазоне от 7 до 27 лет; при этом изменчивость момента инерции сечения составляет $964168,6 \dots 978214,9 \text{ см}^4$ (рис. 5).

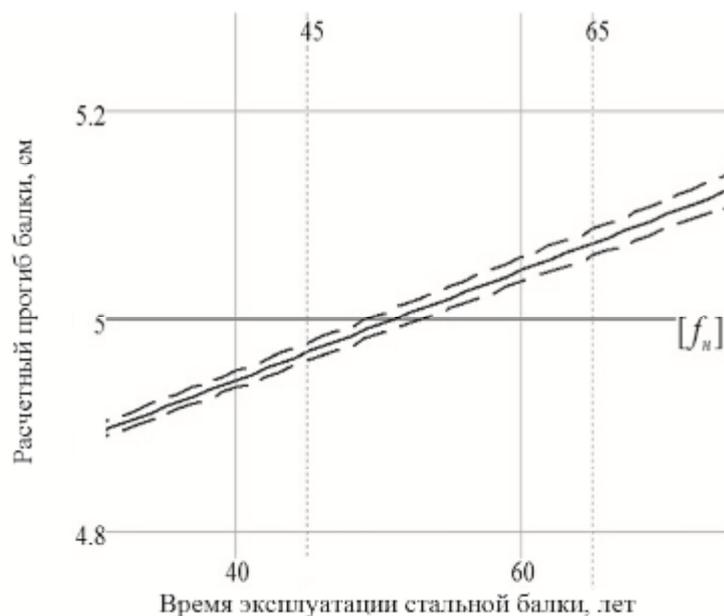


Рис. 4. Прогноз времени достижения предельного состояния по условию удовлетворения требований к нормативному прогибу в вертикальной плоскости

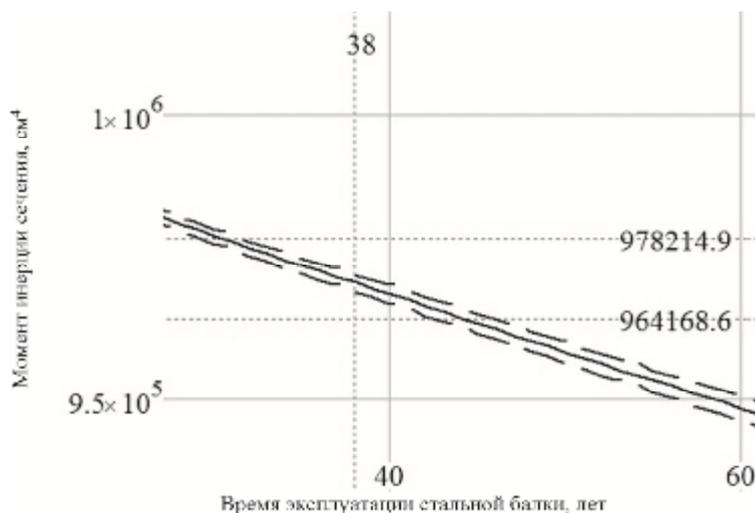


Рис. 5. Прогноз изменчивости момента инерции сечения

Таким образом, в рамках рассмотренных условий оценки, остаточный ресурс стальной конструкции, эксплуатирующийся в агрессивной среде, может быть назначен в пределах 3 лет, с принятой обеспеченностью 0,95. При этом полученное значение остаточного ресурса может быть скорректировано и уточнено при последующих натуральных обследованиях стальной конструкции.

Выводы

1. Разработан и апробирован общий алгоритм расчета остаточного ресурса элемента стальной конструкции, эксплуатируемой в агрессивной среде, позволяющий учитывать индивидуальные особенности конструктивного элемента. При реализации задач исследования учтены допуски на начальные размеры элемента и точность обмерочных работ.

2. Для моделирования коррозионного износа использованы программно-вычислительные средства регрессионного анализа, которые позволяют вести вычисления остаточного ресурса по критериям предельных состояний с заданной надежностью на основе известных соотношений между доверительной вероятностью и интервалом для принятого закона распределения вероятностей искомого параметра.

3. Данный алгоритм позволяет определить сроки дальнейшей безопасной эксплуатации и запланировать капитальный ремонт конструкций зданий и сооружений.

Список библиографических ссылок

1. СТО 36554501-014-2008. Стандарт организации. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения. – М.: ФГУП «НИЦ Строительство», 2008.
2. Горохов Е.В., Брудка Я., Лубиньски М. и др. Долговечность стальных конструкций в условиях реконструкции. – М.: Стройиздат, 1994. – 488 с.
3. Шпете Г. Надежность несущих строительных конструкций / Пер. с нем. О.О. Андреева. – М.: Стройиздат, 1994. – 288 с.; ил. – Перевод. изд.: Gerhard Spaethe. – Die Sicherheit tragender Baukonstruktionen.
4. Тамразян А.Г. Некоторые элементы проведения экспертизы сооружений на безопасность // Предотвращение аварий зданий и сооружений: сб. науч. тр. – Магнитогорск, 2006, Вып. 6. – С. 51-57.
5. Майстренко И.Ю., Манапов А.З. Оценка резервов несущей способности и долговечности эксплуатируемых мостов с учетом индивидуальных особенностей // Известия КазГАСУ, 2009, № 2 (12). – С. 295-301.

6. Перельмутер А.В. Избранные проблемы надежности и безопасности строительных конструкций. – М.: Изд. АСВ, 2007.
7. Райзер В.Д. Методы теории надежности в задачах нормирования расчетных параметров строительных конструкций. – М.: Стройиздат, 1986. – 192 с.
8. Болотин В.В. Применение методов теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. – М.: Стройиздат, 1982. – 351 с.
9. Червонный А.А., Лукьященко В.И., Котин Л.В. Надежность сложных систем. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: «Машиностроение», 1976. – 288 с.

Valiullin D.A. – student

E-mail: damirvall@rambler.ru

Nadrshina A.R. – student

E-mail: n.ice01@mail.ru

Maystrenko I.Y. – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: igor_maystr@mail.ru

Zinnurov T.A. – candidate of technical sciences, senior professor

E-mail: leongar@mail.ru

Maystrenko T.I. – student

E-mail: maystrenko1496@mail.ru

Kazan State University of Architecture and Engineering

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

Evaluation of remaining life of steel structure operated in a corrosion environment

Resume

General algorithm of steel construction unit operated in a corrosive environment life prediction is developed and tested. Regression analysis software utilities are used for modelling of corrosive wear. Presented in the article the algorithm allows to determine dates of further safety operation and to plan capital repair of buildings and constructions structures. With a view to solve multiparameter question of life prediction the successive formation of initial parameter by the most significant characteristic, which is described by the six general steps, used. In this case, correcting of design parameter number depending on the calculation task, engineering system criticality and required level of evaluation reliability seems possible. Performed procedures demonstrativeness achieved by using PC classical design products that are at the command of engineer, for example, by using MathCAD multifunctional system. In addition, the article shows, that the presented algorithm allows choosing most convenient regression model. This fact is so much important, especially when accounting task of actual degradation of each element of rated section is stated, that by the best way provides an approximation of structural model according to the real work of technical system. Presented in the article life prediction procedures describes at the example of real technical system, monitoring of the state of that was organized by the specialized organization, that shows practical significance of stated recommendations.

Keywords: remaining life, steel construction, regression analysis, corrosive power, interval estimate.

Reference list

1. Standard of organization 36554501-014-2008. Standard of organization. Reliability of engineer constructions and foundations. Main principles. – М.: FSUE «RDE Stroitelstvo», 2008.
2. Gorokhov E.V., Brudka Ya., Lubinski M. and others. Durability of steel constructions under reconstruction. – М.: Stroyizdat, 1994. – 488 p.

3. Spaethe G. Reliability of bearing structures / Translated from German by O.O. Andreeva. – М.: Stroyizdat, 1994. – 288 p.; illustrated. – Translated publication: Gerhard Spaethe. – Die Sicherheit tragender Baukonstruktionen.
4. Tamrazyan A.G. Some elements of examination buildings safety // Buildings and constructions accident prevention: the collection of proceedings. – Magnitogorsk, 2006. Issue 6. – P. 51-57.
5. Maystrenko I.Y., Manapov A.S. Estimation of load-carrying capability reserves and durability of operated bridges taking into account individual characteristics // Izvestiya KGASU, 2009, № 2 (12). – P. 295-301.
6. Perelmuter A.V. Selected problems of engineer constructions reliability and safety. – М.: Publishers ASV, 2007.
7. Raiser V.D. Reliability methods in problems of engineer constructions design parameters normalizing. – М.: Stroyizdat, 1986. – 192 p.
8. Bolotin V.V. Application of probability theory and reliability theory methods at structural analysis. – М.: Stroyizdat, 1982. – 351 p.
9. Chervonnyi A.A., Lukyaschenko V.I., Kotin L.V. Reliability of complex systems. 2nd revised and enlarged ed. – М.: «Machinostroenie», 1976. – 288 p.