УДК 69.059.4

© А. Г. Черных, д-р техн. наук, профессор
© Ш. М. Мамедов, канд. экон. наук, доцент
© Д. И. Корольков, аспирант
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)
E-mail: chagrig@lan.spbgasu.ru, mamedov_am@bk.ru,
korol9520@yandex.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2021-18-1-70-75

© A. G. Chernykh, Dr. Sci. Tech., Professor
© Sh. M. Mamedov, PhD in Sci. Ec., Associate Professor
© D. I. Korolkov, post-graduate student
(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)
E-mail: chagrig@lan.spbgasu.ru, mamedov_am@bk.ru,
korol9520@yandex.ru

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УРАВНЕНИЙ РЕГРЕССИИ

Часть 1. Прогнозирование при независимом действии переменных и постоянстве действующих факторов

FORECASTING THE PARAMETERS OF BUILDING STRUCTURES USING REGRESSION EQUATIONS Part 1. Forecasting with independent action of variables and constancy of operating factors

Представлен метод прогнозирования параметров строительных конструкций с использованием уравнений регрессии. Использованы наиболее часто применяемые уравнения регрессии: линейной, полиномиальной, степенной, показательной, экспоненциальной, логарифмической, полулогарифмической, гиперболической и логистической. Предложено применять однофакторные уравнения регрессии, в которых переменная — время, а зависимая величина — параметр строительной конструкции, изменения которого исследователю необходимо определить. В дальнейшем основные уравнения представляются как многофакторные путем замены коэффициентов основного уравнения на уравнения регрессии, которые получаются после того, как в результате ряда испытаний при различных значениях выбранных входных параметров (условия внешней среды, материал конструкции и т. д.) выведены уравнения регрессии для каждого такого состояния, в результате чего имеется ряд значений параметров основных уравнений регрессии. Затем проводится повторный регрессионный анализ и строится уравнение регрессии для коэффициентов основного уравнения регрессии, которое зависит от величины заданных параметров. Такие уравнения названы вторичными. Приведены примеры для условной линейной регрессии, где продемонстрировано, как производится замена коэффициентов основного уравнения регрессии и к какому окончательному виду приходит уравнение после замены коэффициентов на вторичные уравнения. Представленный метод позволяет при выражении из основного уравнения параметра времени прогнозировать остаточный ресурс, зная большое число параметров строительных конструкций.

Ключевые слова: уравнения регрессии, строительные конструкции, условия эксплуатации, коэффициенты регрессии, коэффициент детерминации.

The article presents a method for forecasting the parameters of building structures using regression equations. The most commonly used regression equations were used, namely, linear, polynomial, power, exponential, exponential, logarithmic, semi-logarithmic, hyperbolic and logistic ones. The authors propose to use one-factor regression equations in which the variable value is time, and the dependent value is the parameter of the building structure, the changes of which the researcher needs to determine. Thereafter, the authors present the basic equations as multi-factorial ones. This is achieved by means of replacing the coefficients of the main equation with regression equations which are obtained after carrying out a series of tests with variable values of the selected input parameters (such as environmental conditions, material of construction, etc.). Regression equations are derived for each state, and, as a result, a number of parameter values for the basic regression equations are available. Then, a repeated regression analysis is carried out and a regression equation is set up for the coefficients of the main regression equation, which depends on the value of the specified parameters. Such equations are called secondary equations. Examples are given for conditional linear regression, where it is demonstrated how the coefficients of the main regression equation are replaced and what final form the equation achieves after replacing the coefficients with secondary equations. The presented method allows, in the case of expression from the basic equation of the time parameter, to forecast the residual resource, with a large number of parameters of building structures determined.

Keywords: regression equations, building structures, operational conditions, regression coefficients, determination coefficient.

В настоящее время остро встает вопрос о прогнозировании изменения параметров строительных конструкций во времени. Имея возможность предсказать значения параметров строительных конструкций, можно оценить их остаточный ресурс, коэффициент надежности по материалу, определить наиболее оптимальные значения параметров применяемых материалов, условий эксплуатации и т. д. [1–16].

Целью данной работы являлась разработка метода прогнозирования параметров строительных конструкций с использованием уравнений регрессии. Для достижения поставленной цели необходимо было решить задачу по выбору первоначальных уравнений регрессии с оптимальным числом входных параметров.

Для решения этой задачи авторами предложено использовать однофакторные уравнения регрессии. В качестве переменной будем использовать время t . Поскольку истинное значение параметров нам неизвестно, то, следовательно, величина ошибки нам тоже неизвестна. Поэтому примем, что $\varepsilon = 0$. Тогда уравнения примут вид:

1) линейная регрессия:

$$R = \alpha_0 + \alpha_1 t; \quad (1)$$

2) полиномиальная регрессия:

$$R = \alpha_0 + \alpha_1 t + \alpha_2 t^2 + \dots + \alpha_n t^n; \quad (2)$$

3) степенная регрессия:

$$R = \alpha_0 t^{\alpha_1}; \quad (3)$$

4) показательная регрессия:

$$R = \alpha_0 \alpha_1^t; \quad (4)$$

5) экспоненциальная регрессия:

$$R = e^{(\alpha_0 + \alpha_1 t)}; \quad (5)$$

$$R = \alpha_0 e^{(\alpha_1 t)}; \quad (6)$$

6) логарифмическая регрессия:

$$R = \alpha_0 + \alpha_1 \ln t; \quad (7)$$

$$R = \alpha_0 + \alpha_1 \lg t; \quad (8)$$

7) полулогарифмическая регрессия:

$$y = \alpha_0 + \alpha_1 \log t; \quad (9)$$

8) гиперболическая регрессия:

$$R = \alpha_0 + \frac{\alpha_1}{t}; \quad (10)$$

$$R = \frac{1}{\alpha_0 + \alpha_1 t}; \quad (11)$$

9) логистическая регрессия:

$$R = \frac{1}{1 + e^{(\alpha_0 + \alpha_1 t)}}, \quad (12)$$

где R — прогнозируемый параметр (зависимая переменная); t — время (независимая переменная); $\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_n$ — параметры уравнения регрессии.

Полученные уравнения будем называть **основными уравнениями регрессии**.

Данные уравнения можно представить как многофакторные.

Причина, по которой эти уравнения, несмотря на то что измеряется лишь один параметр, можно представить как многофакторные, кроется в том, что в эксперименте исследователь неизбежно сталкивается с влиянием других факторов (параметров). Эти факторы всегда присутствуют как внешние и внутренние условия среды, в которой проводится эксперимент. Одни из них специально создаются экспериментатором, другие присутствуют всегда, и единственное, что можно сделать, это варьировать их значения.

Например, при испытании конструкций из дерева на прочность [17, 18] экспериментатор может добавить такой фактор, как ультрафиолетовое излучение, или же убрать его, проводя эксперимент в помещении, где воздействие излучения ничтожно.

Поэтому, если дополнительно учесть в основных уравнениях данные параметры, это позволит лучше прогнозировать изменение интересующих нас величин.

Пусть проведено n экспериментов. При этом предполагается, что количество образцов в каждом эксперименте было достаточно велико, чтобы последующие эксперименты позволили получить значения коэффициентов, незначительно отличающиеся друг от друга при одних и тех же принятых условиях каждого эксперимента. Каждый эксперимент соответствует своему значению параметров, которые исследователь заранее оговорил в методике проведения эксперимента. Сами параметры, как и их состав, не изменяются, изменяются лишь их значения с определенным шагом, который заранее оговаривается в методике эксперимента.

В результате обработки экспериментальных данных было получено n уравнений регрессии.

Линейная регрессия:

$$R_1 = \alpha_{01} + \alpha_{11} t; \quad (13)$$

$$R_2 = \alpha_{02} + \alpha_{12} t; \quad (14)$$

$$\dots \dots \dots R_n = \alpha_{0n} + \alpha_{1n} t. \quad (15)$$

Аналогично составлены уравнения регрессии других типов по каждому результату испытаний.

Сначала рассмотрим случай с одним определяющим фактором. Будем считать, что действие остальных факторов пренебрежимо мало.

По результатам испытаний получены ряды значений коэффициентов регрессии в зависимости от определяющего фактора (рис. 1).

По результатам регрессионного анализа получены уравнения для коэффициентов регрессии. Данные уравнения будем называть **вторичными уравнениями регрессии**.

1) Линейная регрессия:

$$\alpha_i = \beta_{0i} + \beta_{1i}\Pi; \quad (16)$$

2) полиномиальная регрессия:

$$\alpha_i = \beta_{0i} + \beta_{1i}\Pi + \beta_{2i}\Pi^2 + \dots + \beta_{ni}\Pi^n; \quad (17)$$

3) степенная регрессия:

$$\alpha_i = \beta_{0i}\Pi^{\beta_{1i}}; \quad (18)$$

4) показательная регрессия:

$$\alpha_i = \beta_{0i}\beta_{1i}^{\Pi}; \quad (19)$$

5) экспоненциальная регрессия:

$$\alpha_i = e^{(\beta_{0i} + \beta_{1i}\Pi)}; \quad (20)$$

$$\alpha_i = \beta_{0i}e^{(\beta_{1i}\Pi)}; \quad (21)$$

6) логарифмическая регрессия:

$$\alpha_i = \beta_{0i} + \beta_{1i} \ln \Pi; \quad (22)$$

$$\alpha_i = \beta_{0i} + \beta_{1i} \lg \Pi; \quad (23)$$

7) полулогарифмическая регрессия:

$$\alpha_i = \beta_{0i} + \beta_{1i} \log \Pi; \quad (24)$$

8) гиперболическая регрессия:

$$\alpha_i = \beta_0 + \frac{\beta_{1i}}{\Pi}; \quad (25)$$

$$\alpha_i = \frac{1}{\beta_{0i} + \beta_{1i}\Pi}; \quad (26)$$

Рис. 1. Значения i -го коэффициента от i -го значения параметра

9) логистическая регрессия:

$$\alpha_i = \frac{1}{1 + e^{(\beta_{0i} + \beta_{1i}\Pi)}}, \quad (27)$$

где α_i — i -й коэффициент основного уравнения регрессии; Π — параметр, воздействие которого рассматривается при испытаниях; $\beta_{0i}, \beta_{1i}, \dots, \beta_{ni}$ — i -е коэффициенты вторичного уравнения регрессии.

Поскольку уравнений, которые бы удовлетворяли требованиям достоверности к аппроксимации (коэффициент детерминации должен быть больше или равен 0,85), может быть сразу несколько, то в общем случае каждый коэффициент основного уравнения регрессии будет представлять собой систему уравнений:

$$\alpha_i = f_i(x) = \left\{ \begin{array}{l} \alpha_i = \beta_{0i} + \beta_{1i}\Pi \\ \alpha_i = \beta_{0i} + \beta_{1i}\Pi + \beta_{2i}\Pi^2 + \dots + \beta_{ni}\Pi^n \\ \alpha_i = \beta_{0i}\Pi^{\beta_{1i}} \\ \alpha_i = \beta_{0i}\beta_{1i}^{\Pi} \\ \alpha_i = e^{(\beta_{0i} + \beta_{1i}\Pi)} \\ \alpha_i = \beta_{0i}e^{(\beta_{1i}\Pi)} \\ \alpha_i = \beta_{0i} + \beta_{1i} \ln \Pi \\ \alpha_i = \beta_{0i} + \beta_{1i} \lg \Pi \\ \alpha_i = \beta_{0i} + \beta_{1i} \log \Pi \\ \alpha_i = \beta_0 + \frac{\beta_{1i}}{\Pi} \\ \alpha_i = \frac{1}{\beta_{0i} + \beta_{1i}\Pi} \\ \alpha_i = \frac{1}{1 + e^{(\beta_{0i} + \beta_{1i}\Pi)}} \end{array} \right. \geq 0,85.$$

Поскольку в практических целях достаточно только одного уравнения, то в дальнейшем будем пользоваться уравнением с самым высоким коэффициентом детерминации:

$$\alpha_i = f_i(x) \rightarrow \max D^2, \quad (28)$$

где D^2 — коэффициент детерминации.

Аналогично рассмотрим случай с двумя определяющими факторами.

По результатам испытаний получены ряды значений коэффициентов регрессии в зависимости от двух определяющих факторов (рис. 2).

По результатам регрессионного анализа получены следующие уравнения для коэффициентов регрессии:

Рис. 2. Значения i -го коэффициента в зависимости от k -го и j -го значений параметров

1) линейная регрессия:

$$\alpha_i = \beta_{0kj} + \beta_{1kj} \Pi_1 + \beta_{2kj} \Pi_2; \quad (29)$$

2) полиномиальная регрессия:

$$\alpha_i = \beta_{0kj} + \beta_{1,n,kj} \Pi_1^n + \beta_{1,n-1,kj} \Pi_1^{n-1} + \beta_{1,1,kj} \Pi_1 + \dots + \beta_{2,n,kj} \Pi_2^n + \beta_{2,n-1,kj} \Pi_2^{n-1} + \dots + \beta_{2,1,kj} \Pi_2; \quad (30)$$

3) степенная регрессия:

$$\alpha_i = \beta_{0kj} \Pi_1^{\beta_{1kj}} \Pi_2^{\beta_{2kj}}; \quad (31)$$

4) показательная регрессия:

$$\alpha_i = \beta_{0kj} \beta_{1kj}^{\Pi_1} \beta_{2kj}^{\Pi_2}; \quad (32)$$

5) экспоненциальная регрессия:

$$\alpha_i = e^{(\beta_{0kj} + \beta_{1kj} \Pi_1 + \beta_{2kj} \Pi_2)}; \quad (33)$$

6) логарифмическая регрессия:

$$\alpha_i = \beta_{0kj} + \beta_{1kj} \ln \Pi_1 + \beta_{2kj} \ln \Pi_2; \quad (34)$$

$$\alpha_i = \beta_{0kj} + \beta_{1kj} \lg \Pi_1 + \beta_{2kj} \lg \Pi_2; \quad (35)$$

7) полулогарифмическая регрессия:

$$\alpha_i = \beta_{0kj} + \beta_{1kj} \log \Pi_1 + \beta_{1kj} \log \Pi_2; \quad (36)$$

8) гиперболическая регрессия:

$$\alpha_i = \beta_{0kj} + \frac{\beta_{1kj}}{\Pi_1} + \frac{\beta_{1kj}}{\Pi_2}; \quad (37)$$

$$\alpha_i = \frac{1}{\beta_{0kj} + \beta_{1kj} \Pi_1 + \beta_{2kj} \Pi_2}; \quad (38)$$

9) логистическая регрессия:

$$\alpha_i = \frac{1}{1 + e^{(\beta_{0kj} + \beta_{1kj} \Pi_1 + \beta_{2kj} \Pi_2)}}; \quad (39)$$

Выбор уравнения осуществляется так же, как и для уравнения с одним определяющим фактором по формуле (28).

Аналогичные рассуждения можно сделать в отношении общего случая.

В этом случае уравнения примут вид:

1) линейная регрессия:

$$\alpha_i = \beta_0 + \beta_1 \Pi_1 + \dots + \beta_n \Pi_n; \quad (40)$$

2) полиномиальная регрессия:

$$\alpha_i = \beta_0 + \beta_{n,i} \Pi_i^n + \beta_{n-1,i} \Pi_i^{n-1} + \dots + \beta_{1,i} \Pi_i; \quad (41)$$

3) степенная регрессия:

$$\alpha_i = \beta_0 + \Pi_1^{\beta_1} + \dots + \Pi_n^{\beta_n}; \quad (42)$$

4) показательная регрессия:

$$\alpha_i = \beta_0 + \beta_1^{\Pi_1} + \dots + \beta_n^{\Pi_n}; \quad (43)$$

5) экспоненциальная регрессия:

$$\alpha_i = e^{(\beta_0 + \beta_1 \Pi_1 + \dots + \beta_n \Pi_n)}; \quad (44)$$

6) логарифмическая регрессия:

$$\alpha_i = \beta_0 + \beta_1 \ln \Pi_1 + \dots + \beta_n \ln \Pi_n; \quad (45)$$

$$\alpha_i = \beta_0 + \beta_1 \lg \Pi_1 + \dots + \beta_n \lg \Pi_n; \quad (46)$$

7) полулогарифмическая регрессия:

$$\alpha_i = \beta_0 + \beta_1 \log \Pi_1 + \dots + \beta_n \log \Pi_n; \quad (47)$$

8) гиперболическая регрессия:

$$\alpha_i = \beta_0 + \frac{\beta_1}{x_1} + \dots + \frac{\beta_n}{x_n}; \quad (48)$$

$$\alpha_i = \frac{1}{\beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_n x_n}; \quad (49)$$

9) логистическая регрессия:

$$\alpha_i = \frac{1}{1 + e^{(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_n x_n)}}. \quad (50)$$

Проиллюстрируем на условных примерах, как это будет выглядеть при практической реализации. Рассмотрим случаи для одного, двух и n -го количества факторов. Предположим, что во всех случаях наибольшим коэффициентом детерминации обладает линейная регрессия. На ее примере и сделаем выкладки. Сначала запишем основное уравнение регрессии, затем заменим коэффициенты регрессии на соответствующие уравнения.

Для одного фактора:

$$R = \alpha_0 + \alpha_1 t = \beta_{01} + \beta_{11} \Pi + (\beta_{02} + \beta_{12} \Pi) t. \quad (51)$$

Для двух факторов:

$$R = \beta_{011} + \beta_{111} \Pi_1 + \beta_{211} \Pi_2 + (\beta_{022} + \beta_{122} \Pi_1 + \beta_{222} \Pi_2) t. \quad (52)$$

Для n факторов:

$$R = \beta_0 + \beta_1 \Pi_1 + \dots + \beta_n \Pi_n + (\beta_0 + \beta_1 \Pi_1 + \dots + \beta_n \Pi_n) t. \quad (53)$$

В представленной статье был рассмотрен простейший случай, когда действие факторов постоянно во времени и является независимым, т. е. взаимное влияние факторов исключается. В дальнейших статьях данная идея будет развита с учетом переменного действия факторов во вре-

мени и их взаимовлияния друг на друга. Также будет представлено, как проводится оценка остаточного ресурса с использованием таких уравнений. Будут описаны методика прогнозирования параметров с использованием уравнений регрессии, достоинства и недостатки данного подхода.

Библиографический список

1. Klippel M., Frangi A., Fontana M. Influence of the adhesive on the load-carrying capacity of glued laminated timber members in fire // *Fire Safety Science*. 2011. Vol. 10. Pp. 1219–1232. DOI: 10.3801/IAFSS.FSS.10-1219.
2. Arima T., Hayamura S., Maruyama N. Schematic Representation for Evaluating Adhesive Strength of Wood Component // *Journal of the Society of Materials Science*. 1992. Vol. 41 (463). Pp. 528–534. DOI: 10.2472/jsms.41.528.
3. Kim K.-H., Kim S.-J., Yang S.-Y., Yeo H., Eom C.-D., Shim K. Bonding performance of adhesives with lamina in structural glulam manufactured by high frequency heating system // *Journal of the Korean Wood Science and Technology*. 2015. Vol. 43 (5). Pp. 682–690. DOI: 10.5658/WOOD.2015.43.5.682.
4. Aven T. Interpretations of alternative uncertainty representations in a reliability and risk analysis context // *Reliability Engineering and System Safety*. 2011. Vol. 96(3). Pp. 353–360. DOI: 10.1016/j.ress.2010.11.004.
5. Aven T., Zio E. Some considerations on the treatment of uncertainties in risk assessment for practical decision making // *Reliability Engineering and System Safety*. 2011. Vol. 96 (1). Pp. 64–74. DOI: 10.1016/j.ress.2010.06.001.
6. Suo B., Zeng C., Cheng Y.-S., Li J. An evidence theory-based algorithm for system reliability evaluation under mixed Aleatory and epistemic uncertainties // *International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation*. 2014. Vol. 15 (3–4). Pp. 189–196. DOI: 10.1515/ijnsns-2012-0050.
7. Jiang C., Zhang Z., Han X., Liu J. A novel evidence-theory-based reliability analysis method for structures with epistemic uncertainty // *Computers and Structures*. 2013. Vol. 129. Pp. 1–12. DOI: 10.1016/j.compstruc.2013.08.007.
8. Li H., Nie X. Structural reliability analysis with fuzzy random variables using error principle // *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2018. Vol. 67. Pp. 91–99. DOI: 10.1016/j.engappai.2017.08.015.
9. Xiao N.-C., Huang H.-Z., Li Y.-F., Wang Z., Zhang X.-L. Non-probabilistic reliability sensitivity analysis of the model of structural systems with interval variables whose state of dependence is determined by constraints // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*. 2013. Vol. 227 (5). Pp. 491–498. DOI: 10.1177/1748006X13480742.
10. Wang Y. Imprecise probabilities based on generalized intervals for system reliability assessment // *International Journal of Reliability and Safety*. 2010. Vol. 4 (4). Pp. 319–342. DOI: 10.1504/IJRS.2010.035572.
11. Krejsa M., Janas P., Krejsa V. Structural reliability analysis using DOProC method // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 142. Pp. 34–41. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.02.010.
12. Caspeele R., Sykora M., Taerwe L. Influence of quality control of concrete on structural reliability: assessment using a Bayesian approach // *Materials and Structures*. 2014. Vol. 47. Pp. 105–116. DOI: 10.1617/s11527-013-0048-y.
13. Köhler J. Reliability of timber structures. Doctoral thesis, Technische Wissenschaften, Eidgenössische Technische Hochschule ETH Zürich, Nr. 16378, 2006. DOI: 10.3929/ethz-a-005164254. 238 s.
14. Hannouz S. Développement d'indicateurs pour la caractérisation mécanique et la durabilité des bois traités thermiquement. Mécanique des matériaux [physics. class-ph]. Ecole nationale supérieure d'arts et métiers — ENSAM, 2014. Français. 155 p.
15. Chaouch M. Effet de l'intensité du traitement sur la composition élémentaire et la durabilité du bois traité thermiquement: développement d'un marqueur de prédiction de la résistance aux champignons basidiomycètes. Autre. Université Henri Poincaré – Nancy 1, 2011. Français. 220 p.
16. Faydi Y., Brancheriau L., Pot G., Collet R. Prediction of Oak Wood Mechanical Properties Based on the Statistical Exploitation of Vibrational Response // *Bioresources*. 2017. Vol. 12 (3). Pp. 5913–5927. DOI: 10.15376/biores.12.3.5913-5927.
17. Ерофеев В. Т., Старцев О. В., Антошкин В. Д., Гудожников С. С., Самолькина Е. Г., Болдина И. В., Махоньков А. Ю. Оценка изменения прочности древесины в условиях повышенной влажности // *Фундаментальные исследования*. 2014. № 9–12. С. 2630–2638.
18. Дунаев В. И., Молдаванов С. Ю., Лозовой С. Б., Георгияди В. Г. Исследование длительной прочности хрупких тел // *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского гос. аграрного ун-та*. 2014. № 96. С. 1207–1218.

References

1. Klippel M., Frangi A., Fontana M. Influence of the adhesive on the load-carrying capacity of glued laminated timber members in fire. *Fire Safety Science*, 2011, vol. 10, pp. 1219–1232. DOI: 10.3801/IAFSS.FSS.10-1219.
2. Arima T., Hayamura S., Maruyama N. Schematic Representation for Evaluating Adhesive Strength of Wood Component. *Journal of the Society of Materials*

Science, 1992, vol. 41 (463), pp. 528–534. DOI: 10.2472/jsms.41.528.

3. Kim K.-H., et al. Bonding performance of adhesives with lamina in structural glulam manufactured by high frequency heating system. *Journal of the Korean Wood Science and Technology*, 2015, vol. 43 (5), pp. 682–690. DOI: 10.5658/WOOD.2015.43.5.682.

4. Aven T. Interpretations of alternative uncertainty representations in a reliability and risk analysis context. *Reliability Engineering and System Safety*, 2011, vol. 96(3), pp. 353–360. DOI: 10.1016/j.res.2010.11.004.

5. Aven T., Zio E. Some considerations on the treatment of uncertainties in risk assessment for practical decision making. *Reliability Engineering and System Safety*, 2011, vol. 96 (1), pp. 64–74. DOI: 10.1016/j.res.2010.06.001.

6. Suo B., Zeng C., Cheng Y.-S., Li J. An evidence theory-based algorithm for system reliability evaluation under mixed Aleatory and epistemic uncertainties. *International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation*, 2014, vol. 15 (3–4), pp. 189–196. DOI: 10.1515/ijnsns-2012-0050.

7. Jiang C., Zhang Z., Han X., Liu J. A novel evidence-theory-based reliability analysis method for structures with epistemic uncertainty. *Computers and Structures*, 2013, vol. 129, pp. 1–12. DOI: 10.1016/j.compstruc.2013.08.007.

8. Li H., Nie X. Structural reliability analysis with fuzzy random variables using error principle. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2018, vol. 67, pp. 91–99. DOI: 10.1016/j.engappai.2017.08.015.

9. Xiao N.-C., et al. Non-probabilistic reliability sensitivity analysis of the model of structural systems with interval variables whose state of dependence is determined by constraints. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, 2013, vol. 227 (5), pp. 491–498. DOI: 10.1177/1748006X13480742.

10. Wang Y. Imprecise probabilities based on generalized intervals for system reliability assessment. *International Journal of Reliability and Safety*, 2010, vol. 4 (4), pp. 319–342. DOI: 10.1504/IJRS.2010.035572.

11. Krejsa M., Janas P., Krejsa V. Structural reliability analysis using DOProC method. *Procedia Engineering*, 2016, vol. 142, pp. 34–41. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.02.010.

12. Caspee R., Sykora M., Taerwe L. Influence of quality control of concrete on structural reliability: assessment using a Bayesian approach. *Materials and Structures*, 2014, vol. 47, pp. 105–116. DOI: 10.1617/s11527-013-0048-y.

13. Köhler J. *Reliability of timber structures*. Doctoral thesis, Technische Wissenschaften, Eidgenössische Technische Hochschule ETH Zürich, no. 16378, 2006. DOI: 10.3929/ethz-a-005164254. 238 S.

14. Hannouz S. *Développement d'indicateurs pour la caractérisation mécanique et la durabilité des boitrattés thermiquement*. Mécanique des matériaux [physics. class-ph]. Ecole nationale supérieure d'arts et métiers – ENSAM, 2014. Français. 155 p.

15. Chaouch M. *Effet de l'intensité du traitement sur la composition élémentaire et la durabilité du boitrattéthermiquement: développement d'un marqueur de prédiction de la résistance aux champignons basidiomycètes*. Autre. Université Henri Poincaré – Nancy 1, 2011. Français, 220 p.

16. Faydi Y., Brancheriau L., Pot G., Collet R. Prediction of oak wood mechanical properties based on the statistical exploitation of vibrational response. *Bioresources*, 2017, vol. 12 (3), pp. 5913–5927. DOI: 10.15376/biores.12.3.5913-5927.

17. Erofeev V. T., et al. *Otsenka izmeneniya prochnosti drevesiny v usloviyakh povyshennoy vlazhnosti* [Assessment of changes in the strength of wood in conditions of high humidity]. *Fundamental'nye issledovaniya – Fundamental Research*, 2014, no. 9–12, pp. 2630–2638.

18. Dunaev V. I., Moldavanov S. Yu., Lozovoy S. B., Georgiyadi V. G. *Issledovanie dlitel'noy prochnosti khrupkikh tel* [Investigation of the long-term strength of brittle bodies]. *Politematicheskii setevoy elektronniy nauchniy zhurnal Kubanskogo gos. agrarnogo un-ta – Polythematic Network Electronic Scientific Journal of the Kuban State Agrarian University*, 2014, no. 96, pp. 1207–1218.