

УДК 620.17: 691.32

*ОСИПОВ СЕРГЕЙ ПАВЛОВИЧ, канд. техн. наук,  
ведущий научный сотрудник,  
osip1809@rambler.ru*

*ОСИПОВ ОЛЕГ СЕРГЕЕВИЧ, канд. физ.-мат. наук, инженер,  
ososipov@rambler.ru*

*ЖАНТЫБАЕВ АЛИБЕК АЙВАР-БАУРЖАНОВИЧ, магистрант,  
drlivesey1305@gmail.com*

*Томский политехнический университет,  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30*

*ПОДШИВАЛОВ ИВАН ИВАНОВИЧ, канд. техн. наук, доцент,  
ivanpodchivalov@list.ru*

*ПРИЩЕПА ИНГА АЛЕКСАНДРОВНА, ст. преподаватель,  
ingaprishepa@mail.ru*

*БЕРЖЕНАРУ НАТАЛЬЯ ВАЛЕРЬЕВНА, магистрант,  
nbezhenaru@mail.ru*

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,  
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2*

## **ОБ ОЦЕНКЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ БЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ ПО ПРОЧНОСТИ\***

Проведен цикл экспериментальных исследований по оценке параметров положения и рассеяния прочности бетона на сжатие. Введены понятия информационно-избыточного и информационно-дополнительного параметров прочности и продемонстрированы особенности их применения на практике. Показано, что основная часть испытанных объектов имеет выборочные распределения прочности с плоской вершиной и выраженной асимметрией. Экспериментально подтверждена возможность представления выборочных распределений прочности бетонов на сжатие взвешенной суммой двух нормальных распределений.

**Ключевые слова:** бетон; прочность на сжатие; меры положения прочности; меры рассеяния прочности; суперпозиция распределений.

*SERGEY P. OSIPOV, PhD, Lead Research Assistant,  
osip1809@rambler.ru*

*OLEG S. OSIPOV, PhD, Engineer,  
ososipov@rambler.ru*

*ALIBEK A. ZHANTYBAEV, Undergraduate Student,  
drlivesey1305@gmail.com*

*Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin Ave., 634050, Tomsk, Russia*

*IVAN I. PODSHIVALOV, PhD, A/Professor,  
ivanpodchivalov@list.ru*

*INGA A. PRISHEPA, Senior Lecturer,*

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках государственного задания в сфере научной деятельности.

*ingaprishepa@mail.ru*  
*NATAL'YA V. BERZHENARU, Undergraduate Student,*  
*nbezhenaru@mail.ru*  
*Tomsk State University of Architecture and Building,*  
*2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia*

## STRENGTH ESTIMATION OF CONCRETE PRODUCTS

The paper presents a series of experiments on estimating concrete product parameters by its compressive strength location and dispersion. New concepts are introduced in this paper, namely: information -redundant and -additional strength parameters the practical applications of which are described herein. It is shown that main portion of test objects has a selective strength distribution with the flat top and explicit asymmetry. Experiments prove the possibility of representing selective distributions of the compressive strength in concrete by the weighted sum of two normal distributions.

**Keywords:** concrete; compressive strength; strength location measures; strength dispersion; superposition of distributions.

### Введение

Для оценки технического состояния строительных материалов и горных пород широко используются динамические, электромагнитные и ультразвуковые методы измерения прочности [1–4]. Вследствие случайности единичного измерения [4–6] на практике определение прочности производится по среднему значению нескольких измерений. Случайная величина полностью определена, если известны ее плотность или функция распределения. Известен ряд работ [7–10], в которых проверяются статистические гипотезы о принадлежности прочности и других механических характеристик материалов к классам случайных величин, распределенных по Гауссу, Вейбуллу, Гумбелю и др. Эти законы распределения зависят от двух параметров, причем один из них является мерой положения, а другой – мерой рассеяния. С точностью, достаточной для практических приложений, случайные величины описываются совокупностью начальных или центральных моментов. Для оценки технического состояния изделий из металлов в работах [11–14] предложено использовать не только меры положения и рассеяния прочности, но и плотность распределения. Указанный подход применяется также для строительных материалов, в частности для бетона. Все материалы, используемые в промышленности и строительстве, являются неоднородными по прочности на макро-, мини-, микро- или наноуровнях. При измерении прочности степень проявления этого факта определяется размерами индентора, ультразвукового или другого датчика. Бетоны и асфальтобетоны (далее бетоны) широко используются в промышленном, гражданском и дорожном строительстве. Неоднородность по прочности, упомянутая выше, характерна именно для бетонов, особенно для тех, ингредиенты которых существенно отличаются по прочности. В научной литературе не в полной мере рассмотрены вопросы оценки технического состояния изделий из бетона по прочности.

### 1. Основные выборочные характеристики прочности бетона

Измеряемой величиной является прочность бетона  $h$ . Будем считать ее случайной величиной. Пусть в процессе измерений получена ранжированная выборка значений прочности  $h_1 \leq h_2 \leq \dots \leq h_n$ . Здесь  $n$  – объем выборки. Случайная величина  $h$  характеризуется выборочной плотностью распределения либо совокупностью выборочных мер положения и мер рассеяния.

**Выборочная плотность распределения.** Для построения выборочной плотности распределения  $g(h)$  случайной величины  $h$  берем интервал  $[H_0, H_K]$ , здесь  $H_0 \leq h_1$ , а  $H_K \geq h_n$  представляется объединением  $k$  интервалов равной длины

$$[H_0, H_K] = [H_0, H_1) \cup [H_1, H_2) \cup [H_2, H_3) \cup \dots \cup [H_{K-1}, H_K]. \quad (1)$$

Выражение для оценки  $g(h)$  имеет следующий вид:

$$g(h) = \begin{cases} g_1 = m_1/n, & h_i \in [H_0, H_1), i = 1 \dots m_1, \\ g_2 = m_2/n, & h_i \in [H_1, H_2), i = m_1 + 1 \dots m_1 + m_2, \\ \dots \\ g_K = m_K/n, & h_i \in [H_{K-1}, H_K), i = m_1 + m_2 + \dots + m_{K-1} + 1 \dots n. \end{cases} \quad (2)$$

**Выборочные меры положения.** Традиционно к выборочным мерам положения случайной величины относят среднее значение, медиану и моду.

Выборочное среднее значение прочности  $\bar{h}$ , медиана  $Meh$  и мода  $Moh$  находятся с помощью формул

$$\bar{h} = \sum_{i=1}^n h_i / n, \quad \sum_{h_i \leq Meh} 1 = \sum_{h_i > Meh} 1, \quad g(Moh) = \max_{h_i, i=1 \dots n} g(h). \quad (3)$$

Оценки медианы  $Meh$  и моды  $Moh$  по формулам (3) являются недостаточно точными, их применяют для значительных объемов выборки.

**Выборочные меры рассеяния.** Применительно к исследуемой задаче представляют интерес следующие меры рассеяния – среднеквадратическое отклонение  $\sigma h$ , коэффициенты: вариации  $Vh$ , асимметрии  $Ah$  и эксцесса  $Eh$ .

Указанные меры рассеяния оцениваются по исходной выборке прочности следующим образом:

$$\sigma h = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_i - \bar{h})^2}{n}}, \quad Vh = \frac{\sigma h}{\bar{h}}, \quad Ah = \frac{\sum_{i=1}^n (h_i - \bar{h})^3}{n\sigma h^3}, \quad Eh = \frac{\sum_{i=1}^n (h_i - \bar{h})^4}{n\sigma h^4} - 3. \quad (4)$$

### 2. Экспериментальные исследования

Для оценки мер положения и рассеяния прочности на сжатие  $h$  обследована 21 группа элементов из бетона 16-этажного жилого дома с цокольным этажом. Исследования проводились в два этапа. На первом этапе оценивалась

прочность бетона на сжатие (далее прочность бетона) ультразвуковым прибором «Пульсар-1.1». На втором этапе прочность бетона определялась ударно-импульсным методом с использованием прибора «Оникс-2.4».

**Выборочные плотности распределения.** На рис. 1 приведены типичные выборочные плотности распределения  $g(h)$  для измерений прочности бетона одного и того же объекта ультразвуковым и ударно-импульсным методами. Зависимости  $g(h)$  рассчитывались с помощью выражений (1), (2),  $n = 101$ . Коэффициент корреляции между измерениями прочности бетона двумя различными методами составил 0,97. Выборочные плотности распределения прочности бетона, приведенные на рис. 1, имеют выраженную асимметрию для обоих методов измерений, и они аналогичны зависимостям из работ [4, 15, 16].

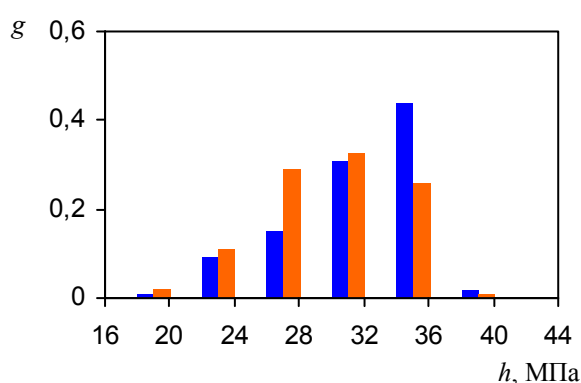


Рис. 1. Типичные выборочные плотности распределения прочности бетона:

■ — «Пульсар-1.1»; ■ — «Оникс-2.4»

**Меры положения и рассеяния.** Вся совокупность экспериментальных данных была обработана с целью получения оценок мер положения и рассеяния прочности по формулам (3) и (4). Результаты обработки сведены в табл. 1.

Таблица 1

**Меры положения и рассеяния прочности бетона**

№ п/п	$\bar{h}$ , МПа	$Meh$ , МПа	$Moh$ , МПа	$\sigma h$ , МПа	$Vh$	$Ah$	$Еh$	Примечание
1	27,34	26,6	26,5	5,517	0,202	0,348	-0,354	Колонны
2	23,60	23,0	23,4	3,786	0,160	0,549	-0,116	Колонны
3	28,40	28,5	32,7	3,921	0,138	-0,366	-0,523	Колонны
4	25,70	27,1	28,6	5,168	0,201	-0,826	0,392	Колонны
5	31,67	32,3	32,6	2,180	0,069	-1,730	3,640	Перекрытия
6	27,58	30,3	30,6	6,470	0,235	-1,020	0,003	Перекрытия
7	27,21	29,1	30,1	6,500	0,239	-0,764	-0,037	Перекрытия
8	27,74	30,8	34,9	8,273	0,298	-0,668	-1,275	Перекрытия
9	25,28	26,6	28,7	7,237	0,286	-0,463	-1,082	Перекрытия
10	26,79	27,3	33,1	7,298	0,272	-0,407	-1,187	Перекрытия

Окончание табл. 1

№ п/п	$\bar{h}$ , МПа	$Meh$ , МПа	$Moh$ , МПа	$\sigma h$ , МПа	$Vh$	$Ah$	$Eh$	Примечание
11	22,68	23,1	29,3	6,650	0,293	0,176	-0,842	Перекрытия
12	23,85	23,2	19,7	6,114	0,256	0,218	-1,241	Перекрытия
13	23,88	25,7	25,7	5,363	0,225	-0,416	-0,657	Перекрытия
14	26,78	26,3	32,6	5,730	0,214	-0,519	-0,800	Перекрытия
15	23,97	25,3	17,7	5,597	0,234	-0,555	-0,828	Перекрытия
16	26,16	26,2	29,7	5,913	0,226	-0,622	-0,158	Перекрытия
17	27,05	29,4	29,5	5,540	0,205	-0,812	-0,336	Перекрытия
18	26,20	27,7	20,8	5,688	0,217	-0,365	-0,833	Перекрытия
19	27,42	28,5	26,7	5,678	0,207	-0,847	0,306	Перекрытия
20	30,49	31,6	31,4	3,480	0,114	-2,151	5,723	Перекрытия
21	30,47	32,3	32,1	3,525	0,116	-1,032	-0,420	Перекрытия

Из анализа данных, приведенных в табл. 1, можно сделать два вывода: в 17 случаях из 21 значение  $Ah$  меньше нуля, что является свидетельством левой асимметрии выборочных плотностей распределения; в 16 случаях из 21 значение  $Eh$  меньше нуля, это означает, что соответствующие выборочные плотности распределений имеют плоские вершины. Наиболее вероятным объяснением указанных выводов является неоднородность бетона по прочности.

### 3. Интерпретация результатов экспериментальных исследований

Среднее значение прочности бетона является основным информационным параметром анализируемых измерений. Очевидно, что указанного параметра в ряде случаев недостаточно. В настоящее время для оценки текущего технического состояния бетонных изделий помимо среднего значения применяют также среднее квадратическое отклонение и коэффициент вариации прочности бетона [4, 5, 9, 10, 16]. Возникает вопрос о том, какой еще параметр из мер положения и мер рассеяния может нести дополнительную информацию о случайной величине  $h$ ?

Рассмотрим множество  $\mathbf{A}$ , состоящее из параметров прочности, которые могут быть использованы для оценки технического состояния бетона. Множество  $\mathbf{A}$  описывается выражением  $\mathbf{A} = \{\bar{h}, Meh, Moh, \sigma h, Vh, Ah, Eh\}$ . Пусть параметр  $x \in \mathbf{A}$  используется на практике для оценки технического состояния бетона. Логично считать элемент  $y \in \mathbf{A} \setminus \{x\}$  информационно-избыточным для решаемой задачи, если коэффициент корреляции  $\text{cor}(x, y)$  близок по абсолютной величине к единице. Можно ограничиться некоторым предельным уровнем  $u_+$ . С учетом этого указанное условие будет иметь вид

$$|\text{cor}(x, y)| = \left| \frac{\overline{xy} - \bar{x}\bar{y}}{\sigma_x \sigma_y} \right| \geq u_+. \quad (5)$$

Уровень  $u_+$  находится из практических соображений, но представляется возможным ограничить его снизу, например, значением 0,66.

Элемент  $y \in \mathbf{A}$  назовем информационно-дополнительным для параметра  $x \in \mathbf{A}$ , если коэффициент корреляции  $\text{cor}(x, y)$  близок по абсолютной величине к нулю. Соответствующую степень близости зададим ограничением

$$|\text{cor}(x, y)| = \left| \frac{\overline{xy} - \overline{x}\overline{y}}{\sigma_x \sigma_y} \right| \leq u_-. \quad (6)$$

Здесь  $u_-$  – верхний порог отнесения параметра  $y$  к классу дополнительных информационных параметров для  $x$ . Уровень  $u_-$  также находится из практических соображений, но его можно ограничить сверху значением 0,33.

*Замечание 1.* Информационная избыточность, или возможность отнесения анализируемого параметра к классу дополнительных информативных параметров, проверяется для конкретных выборок прочности бетона.

В табл. 2 сведены значения  $\text{cor}(x, y)$ ,  $x \in \mathbf{A}$ ,  $y \in \mathbf{A} \setminus \{x\}$  для данных из табл. 1. В табл. 2 отмечены взаимно информационно-избыточные (5) символом '\*' и информационно-дополнительные параметры (6) символом '\*\*'. Например, при анализе выборочных параметров прочности бетона испытанных объектов нет необходимости одновременно исследовать  $\bar{h}$  и  $Meh$ ,  $\sigma h$  и  $Vh$ . Напротив, в дополнение к  $Moh$  следует анализировать либо  $\sigma h$ , либо  $Vh$ .

Таблица 2

#### Коэффициенты взаимной корреляции параметров прочности бетона

Параметры	$\bar{h}$	$Meh$	$Moh$	$\sigma h$	$Vh$	$Ah$	$Eh$
$\bar{h}$		0,924*	0,628	-0,464	-0,667*	-0,759*	0,607
$Meh$	0,924*		0,613	-0,280**	-0,492	-0,826*	0,511
$Moh$	0,628	0,613		-0,004**	-0,172**	-0,458	0,249
$\sigma h$	-0,464	-0,280**	-0,004**		0,965*	0,367	-0,640
$Vh$	-0,667*	-0,492	-0,172**	0,965*		0,502	-0,688*
$Ah$	-0,759*	-0,826*	-0,458	0,367	0,502		-0,756*
$Eh$	0,607	0,511	0,249**	-0,640	-0,688*	-0,756*	

*Замечание 2.* Параметр прочности бетона  $y$ , не отнесенный к категории дополнительных информативных параметров к  $x$ , но для которого выполняется условие  $u_- < |\text{cor}(x, y)| < u_+$ , может быть использован для повышения достоверности заключений о техническом состоянии бетонных изделий.

*Замечание 3.* Подход, описанный выше, позволяет увеличить число информативных параметров процесса измерения прочности бетона, в отличие от работы [16], в которой предпринята попытка построить регрессионные зависимости мер положения от мер рассеяния, что, по сути, приводит к уменьшению информативности измерений прочности.

#### 4. О смеси распределений

Данные из табл. 1 свидетельствуют о том, что для большей части испытанных образцов выборочные распределения прочности обладают выраженной асимметрией и имеют плоские вершины. В работе [16] приведены резуль-

таты, иллюстрирующие многообразие видов выборочных распределений прочности, которые могут быть симметричными и асимметричными, с плоской и острой вершиной, выпуклыми и вогнутыми, с одной и двумя модами. Построены приближения для каждого из видов экспериментальных распределений прочности. Такое решение является сложным для оценки текущего технического состояния бетона, т. к. в процессе эксплуатации анализируемые распределения трансформируются. В качестве альтернативы решению из работы [16] можно использовать подход, основанный на предположении о том, что измеряемая случайная величина является смесью двух и более случайных величин. Упомянутое предположение близко к идеям из работы [17], в которой исследуются статистические характеристики модулей упругости, твердости и ползучести бетона, измеренных с помощью наноиндентирования. Продемонстрируем, как можно применить указанное предложение для обработки результатов экспериментальных исследований прочности бетона.

Пусть мы имеем выборку из смеси двух случайных величин. Одна из них характеризует, например, прочность крупнозернистой составляющей  $h_b$ , а вторая – прочность мелкозернистой составляющей  $h_s$ . Плотность распределения результирующей случайной величины  $h$  описывается выражением

$$g(h) = \alpha g_b(h) + (1 - \alpha) g_s(h), \quad (7)$$

где  $\alpha$ ,  $0 < \alpha < 1$  – весовой множитель, характеризующий долю крупнозернистой составляющей в общем объеме бетона.

Для использования (7) на практике могут быть предложены два подхода, базирующихся на результатах эксперимента. В первом из них оцениваются плотности распределений  $g_b(h)$  и  $g_s(h)$  по специальным образцам. Во втором подходе заранее предполагается характер распределений, параметры которых и значение весового множителя  $\alpha$  находятся в результате обработки экспериментальных данных, например, методом моментов. Второй подход представляется более реалистичным, но следует отметить, что в нем разделяются материалы не по минеральным составляющим, а по уровням прочности.

Более подробно рассмотрим второй подход. Для описания плотностей распределений  $g_b(h)$  и  $g_s(h)$  может быть использовано распределение Гаусса:

$$g_b(h) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_b} e^{-\frac{(h-\bar{h}_b)^2}{2\sigma_b^2}}; \quad g_s(h) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_s} e^{-\frac{(h-\bar{h}_s)^2}{2\sigma_s^2}}, \quad (8)$$

где  $\bar{h}_b$ ,  $\sigma_b$ ,  $\bar{h}_s$ ,  $\sigma_s$  – параметры распределений  $g_b(h)$  и  $g_s(h)$ . Возможны два варианта нахождения параметров  $\bar{h}_b$ ,  $\sigma_b$ ,  $\bar{h}_s$ ,  $\sigma_s$ . В первом варианте искомые параметры определяются экспериментально по тестовым образцам, изготовленным из цементного камня и каменного материала, используемого в производстве щебня. Во втором варианте анализируемые параметры неизвестны и определяются в результате статистического анализа выборок прочности.

Для вычисления параметров  $\bar{h}_b$ ,  $\sigma_b$ ,  $\bar{h}_s$ ,  $\sigma_s$  и  $\alpha$  можно использовать метод наименьших квадратов (МНК), сводящийся к минимизации по искомым неизвестным параметрам функции

$$F(\bar{h}_b, \sigma_b, \bar{h}_s, \sigma_s, \alpha) = \sum_{k=1}^K \left( \frac{\alpha}{\sqrt{2\pi}\sigma_b} \int_{H_{k-1}}^{H_k} e^{-\frac{(h-\bar{h}_b)^2}{2\sigma_b^2}} dh + \frac{1-\alpha}{\sqrt{2\pi}\sigma_s} \int_{H_{k-1}}^{H_k} e^{-\frac{(h-\bar{h}_s)^2}{2\sigma_s^2}} dh - g_k \right)^2. \quad (9)$$

Нахождение неизвестных легко реализуется на языках программирования высокого уровня, а также с помощью систем математических вычислений.

Подход, основанный на минимизации функции (9), позволяет подтвердить или опровергнуть с заданной доверительной вероятностью статистическую гипотезу о близости выборочного и бимодального распределений.

*Замечание 4.* Наличие двух мод у распределения, определенного выражениями (7), (8), может быть явным и скрытым. Две моды определяются явно, если выполняется два основных условия:

$$\alpha \approx 0,5; \quad |\bar{h}_b - \bar{h}_s| \gg \sigma_b + \sigma_s.$$

Во всех остальных случаях, даже при выборках значительного объема и большом количестве интервалов для построения  $g(h)$ , сделать заключение о бимодальном характере функции  $g(h)$ , исходя из визуального анализа выборочной плотности распределения прочности бетона, затруднительно.

#### Пример обработки результатов экспериментальных исследований.

Для демонстрации работоспособности алгоритма и доказательства бимодального характера экспериментального распределения прочности бетона были обработаны результаты измерений для образца № 2 из табл. 1,  $n = 163$ . На рис. 2 для иллюстрации приведены экспериментальная гистограмма и аппроксимация (7), (8) с параметрами  $\bar{h}_s = 20,7$  МПа,  $\bar{h}_b = 22,4$  МПа,  $\sigma_s = 0,46$  МПа,  $\sigma_b = 4,23$  МПа и  $\alpha = 0,852$ , которые определены с помощью МНК.

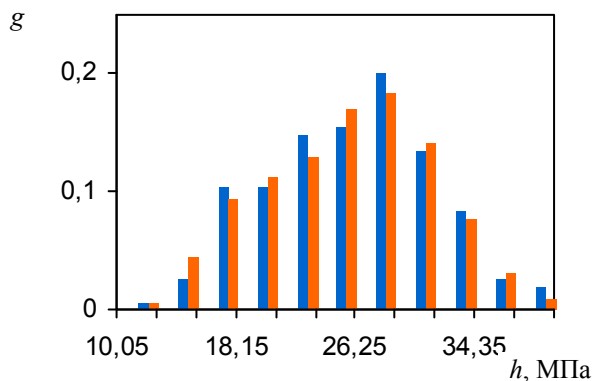


Рис. 2. Экспериментальная плотность распределения и аппроксимация (7), (8):

■ — эксперимент; ■ — аппроксимация



Для проверки статистической гипотезы о близости экспериментальной плотности распределения и анализируемой аппроксимации был использован критерий Пирсона. Эмпирический коэффициент  $\chi^2$  оказался близок к 3,2, а значение табличного коэффициента для доверительной вероятности 95 % и числа степеней свободы 8 равно 15,5. Отсюда можно сделать вывод о том, что выборочная гистограмма близка к аппроксимации (8), с вычисленными параметрами, с доверительной вероятностью 95 %. Указанный вывод согласуется с результатами визуального сравнения гистограмм, приведенных на рис. 2.

### Заключение

В работе введены понятия информационно-избыточного и информационно-дополнительного параметров прочности бетона и продемонстрированы особенности их практического применения. Показано, что основная часть испытанных объектов имеет выборочные распределения с плоской вершиной и выраженной асимметрией. Выдвинуто предположение о наличии нескольких мод у выборочных распределений прочности бетонов на сжатие. Это предположение рассмотрено и проиллюстрировано на экспериментальном примере для бимодального распределения на основе суперпозиции двух нормальных распределений.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Lin, H. Review on the surface hardness of soft rock / H. Lin, W. Xiong // *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. – 2014. – V. 19. – P. 4269–4279.
2. Фурса, Т.В. Неразрушающий электромагнитный метод определения механической прочности изделий из композиционных диэлектрических материалов / Т.В. Фурса // *Физическая мезомеханика*. – 2004. – Т. 7. – № S2. – С. 307–310.
3. *Nondestructive measurement of concrete strength gain by an ultrasonic wave reflection method* / Y. Akkaya, T. Voigt, K.V. Subramaniam, S.P. Shah // *Materials and Structures*. – 2003. – V. 36. – № 8. – P. 507–514.
4. Снежков, Д.Ю. Мониторинг железобетонных конструкций на основе неразрушающих испытаний бетона: методы контроля, критерии соответствия / Д.Ю. Снежков, С.Н. Леонovich, Л.В. Ким // *Вестник инженерной школы ДВФУ*. – 2015. – № 1(22). – С. 80–88.
5. Мацулевич, О.В. Определение прочности бетонов методом динамического индентирования / О.В. Мацулевич, В.А. Рудницкий // *Неразрушающий контроль и диагностика*. – 2013. – № 2. – С. 52–60.
6. Улыбин, А.В. О методах контроля прочности керамического кирпича при обследовании зданий и сооружений / А.В. Улыбин, С.В. Зубков // *Инженерно-строительный журнал*. – 2012. – № 3. – С. 29–34.
7. *Determination of probabilistic parameters of concrete: solving the inverse problem by using artificial neural networks* / E.M.R. Fairbairn, N.F.F. Ebecken, C.N.M. Paz, F.J. Ulm // *Computers & Structures*. – 2000. – V. 78. – № 1. – P. 497–503.
8. Lu, C. Fracture statistics of brittle materials: Weibull or normal distribution / C. Lu, R. Danzer, F.D. Fischer // *Physical Review E*. – 2002. – V. 65. – № 6. – P. 1–4.
9. Syroka-Korol, E. FE calculations of a deterministic and statistical size effect in concrete under bending within stochastic elasto-plasticity and non-local softening / E. Syroka-Korol, J. Tejchman, Z. Mróz // *Engineering Structures*. – 2013. – V. 48. – P. 205–219.
10. Iervolino, I. Comparative assessment of load-resistance factor design of FRP-reinforced cross sections / I. Iervolino, C. Galasso // *Construction and Building Materials*. – 2012. – V. 34. – P. 151–161.

11. Оценка поврежденности материала по рассеянию характеристик упругости и статической прочности / А.А. Лебедев, И.В. Маковецкий, Н.Р. Музыка, Н.Р. Волчек, В.П. Швец // Проблемы прочности. – 2006. – № 2. – С. 5–14.
12. Сосновский, Л.А. Рассеяние механических свойств рельсовой стали / Л.А. Сосновский, А.А. Кебинов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2007. – № 11. – С. 59–62.
13. Кузьбожев, А.С. Исследование вариации твердости трубной стали 17Г1С в ходе статического нагружения / А.С. Кузьбожев, Р.В. Агинеи, О.В. Смирнов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2007. – № 12. – С. 49–53.
14. Оценка технического состояния металлических изделий по плотности распределения твердости по Роквеллу / С.П. Осипов, О.С. Осипов, И.И. Подшивалов, Н.В. Берженару, А.А. Жантыбаев // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2015. – № 1 (48). – С. 122–131.
15. Reliability analysis on shear capacity of reinforced masonry wall due to earthquake / L.L. Xiao, X.T. Wang, Y. Li, W.M. Bulleit // Applied Mechanics and Materials. – 2012. – V. 105. – P. 360–365.
16. Statistical distributions of in situ microcore concrete strength / K. Kilinc, A.O. Celik, M. Tuncan, A. Tuncan, G. Arslan, O. Arioz // Construction and Building Materials. – 2012. – V. 26. – № 1. – P. 393–403.
17. Vandamme, M. Nanogranular origin of concrete creep / M. Vandamme, F.J. Ulm // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2009. – V. 106. – № 26. – P. 10552–10557.

## REFERENCES

1. Lin H., Xiong W. Review on the surface hardness of soft rock. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 2014. V. 19. Pp. 4269–4279.
2. Fursa T.V. Nerazrushajushhij jelektromagnitnyj metod opredelenija mehaniche-skoj prochnosti izdelij iz kompozicionnyh dielektricheskih materialov [Non-destructive electromagnetic testing of mechanical strength of dielectric composite materials]. *Physical Mesomechanics*, 2004. V. 7. No. 2. Pp. 307–310. (rus)
3. Akkaya Y., Voigt T., Subramaniam K.V., Shah S.P. Nondestructive measurement of concrete strength gain by an ultrasonic wave reflection method. *Materials and Structures*, 2003. V. 36. No. 8. Pp. 507–514.
4. Snezhkov D.Ju., Leonovich S.N., Kim L.V. Monitoring zhelezobetonnyh kon-strukcij na osnove nerazrushajushhij ispytaniij betona: metody kontrolja, kriterii sootvetstvija [Monitoring of reinforced concrete structures based on non-destructive testing of concrete: control procedures, conformity criteria]. *FEFU: School of Engineering Bulletin*, 2015. No. 1. Pp. 80–88. (rus)
5. Maculevich O.V., Rudnickij V.A. Opredelenie prochnosti betonov metodom dinamicheskogo indentirovaniija [Determination of concrete strength by dynamic indentation method]. *Nerazrushajushhij kontrol' i diagnostika*, 2013. No. 2. Pp. 52–60. (rus)
6. Ulybin A.V., Zubkov S.V. O metodah kontrolja prochnosti keramicheskogo kir-picha pri obsledovanii zdaniij i sooruzhenij [Methods of control for ceramic strength in building inspection]. *Magazine of Civil Engineering*, 2012. No. 3. Pp. 29–34. (rus)
7. Fairbairn E.M.R., Ebecken N.F.F., Paz C.N.M., Ulm F.J. Determination of probabilistic parameters of concrete: solving the inverse problem by using artificial neural networks. *Computers & Structures*, 2000. V. 78. No. 1. Pp. 497–503.
8. Lu C., Danzer R., Fischer F.D. Fracture statistics of brittle materials: Weibull or normal distribution. *Physical Review E*, 2002. V. 65. No. 6. 067102 (4 p.).
9. Syroka-Korol E., Tejchman J., Mróz Z. FE calculations of a deterministic and statistical size effect in concrete under bending within stochastic elasto-plasticity and non-local softening. *Engineering Structures*, 2013. V. 48. Pp. 205–219.
10. Iervolino I., Galasso C. Comparative assessment of load–resistance factor design of FRP-reinforced cross sections. *Construction and Building Materials*, 2012. V. 34. Pp. 151–161.
11. Lebedev A.A., Makoveckij I.V., Muzyka N.R., Volchek N.L., Shvec V.P. Ocenka povrezhdenosti materiala po rassejaniju harakteristik uprugosti i staticheskoj prochnosti [Assessment of

- damage level in materials by elasticity characteristic scattering and static strength]. *Strength of Materials*, 2006. No. 2. Pp. 5–14. (rus)
12. Sosnovskij L.A., Mahutov N.A., Kebikov A.A. Rassejanie mehanicheskikh svojstv rel'sovoj stali [Scattering of mechanical properties of rail steel]. *Industrial Laboratory*, 2007. No. 11. Pp. 59–62. (rus)
  13. Kuz'bozhev A.S., Aginej R.V., Smirnov O.V. Issledovanie variacii tverdosti trubnoj stali 17G1S v hode staticheskogo nagruzhenija [Study of variations in hardness of 17G1S steel tube under static loading]. *Industrial Laboratory*, 2007. No. 12. Pp. 49–53. (rus)
  14. Osipov S.P., Osipov O.S., Podshivalov I.I., Berzhenaru N.V., Zhantybaev A.A. Ocenka tehničeskogo sostojanija metallicheskih izdelij po plotnosti raspredelenija tverdosti po Rokvellu [Estimation of technical condition of metal products using Rockwell hardness test method]. *Vestnik TSUAB*, 2015. No. 1. Pp. 122–131. (rus)
  15. Xiao L.L., Wang X.T., Li Y., Bulleit W.M. Reliability analysis on shear capacity of reinforced masonry wall due to earthquake. *Applied Mechanics and Materials*, 2012. V. 105. Pp. 360–365.
  16. Kilinc K., Celik A.O., Tuncan M., Tuncan A., Arslan G., Arioz O. Statistical distributions of in situ microcore concrete strength. *Construction and Building Materials*, 2012. V. 26. No. 1. Pp. 393–403.
  17. Vandamme M., Ulm F.J. Nanogranular origin of concrete creep. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2009. V. 106. No. 26. Pp. 10552–10557.