



## Вероятностный подход к контролю качества и оценке начальной надежности сборных железобетонных конструкций

© Г.В. Коваленко, И.В. Дудина, Е.В. Нестер

Братский государственный университет, г. Братск, Россия

**Резюме:** Цель – совершенствование методов оценки эксплуатационной пригодности железобетонных конструкций заводского изготовления на основе интегральной оценки их надежности по результатам текущего контроля отдельных параметров. Предварительно устанавливаются критерии эксплуатационной пригодности исследуемых конструкций на вероятностной основе, в которых учитывается основная методология их натурных испытаний согласно ГОСТ 8829-94. Предложенный способ неразрушающего контроля качества выпускаемых конструкций осуществляется с помощью ЭВМ ежесменно с учетом изменчивости технологических факторов. Результаты расчета по программе оценки надежности являются основанием для приемки партии изделий по требованиям прочности, жесткости, трещиностойкости. Для разработки вероятностного алгоритма оценки надежности конструкций необходимо выбрать оптимальную расчетную модель, которая наиболее точно описывает их напряженно-деформированное состояние (НДС) при нагружении. Доказано, что в качестве таких моделей может использоваться расчет по нормам проектирования и модель с учетом нелинейного характера деформирования железобетона как упруго-пластического материала. Достоверность и адекватность выбранных моделей подтверждается сопоставлением расчетных данных с результатами натурных испытаний конструкций, проводимых на комбинате «Братскжелезобетон». В качестве примера выполнено обоснование выбора расчетной модели для оценки НДС несущих стеновых панелей, испытывающих сложное напряженное состояние (косой изгиб). В результате проведенных исследований были разработаны методика и регламент автоматизированного ежесменного контроля качества сборных железобетонных конструкций с учетом технологической изменчивости. Внедрение предложенной системы контроля качества на заводах железобетонных изделий позволяет сократить объем натурных испытаний конструкций в 6–10 раз и снизить себестоимость выпущенной продукции почти на 2,5%.

**Ключевые слова:** контроль качества, железобетонные конструкции, вероятностный расчет, начальная надежность, эксплуатационная пригодность

**Для цитирования:** Коваленко Г.В., Дудина И.В., Нестер Е.В. Вероятностный подход к контролю качества и оценке начальной надежности сборных железобетонных конструкций. *Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость*. 2021. Т. 11. № 2. С. 274–283. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2021-2-274-283>

## A probabilistic approach to quality control and assessing initial reliability precast reinforced constructions

Galina V. Kovalenko, Irina V. Dudina, Elena V. Nester

Bratsk State University, Bratsk, Russia

**Abstract:** The study aims to improve methods for assessing the serviceability of prefabricated reinforced concrete structures based on an integral estimation of their reliability following the operational monitoring of individual parameters. The serviceability criteria of the investigated structures are set on a probabilistic basis, addressing the main methodology for their field tests according to GOST 8829-94. The proposed non-destructive testing of output is computerised and is carried out every shift together with the versatility of technological factors. The calculation results on the reliability assessment program are a basis for the acceptance of a batch according to the required strength, stiffness, cracking resistance. To develop a probabilistic algorithm for assessing the reliability of works, an optimal calculation model accurately describing stress-strain behaviour (SSB) under loading is necessary. It is demon-

strated that a calculation based on design standards and a model with account non-linear nature of deformation occurring in reinforced concrete as elastoplastic material can be used. The reliability and adequacy of the selected models were confirmed by comparing the theoretical data with the results of work field tests performed at the *Bratskzhelezobeton* plant. As an example, a calculation model for the SSB assessment in load-bearing wall panels with applied combined stress (biaxial bending) was substantiated. A methodology and regulations for automated every-shift quality control of precast reinforced constructions were developed following the versatility of technological factors. Introducing the proposed quality control system to factories manufacturing reinforced concrete products allows the number of structure field tests to be reduced by 6-10 times and the cost of manufactured products by approximately 2.5%.

**Keywords:** quality control, reinforced concrete structures, probabilistic calculation, initial reliability, serviceability

**For citation:** Kovalenko GV, Dudina IV, Nester EV. A probabilistic approach to quality control and assessing initial reliability precast reinforced constructions. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2021;11(2):274–283. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2021-2-274-283>

### Введение

Проблеме выбора метода оценки эксплуатационной пригодности строительных конструкций и повышения их качества всегда уделялось самое серьезное внимание [1–7].

Особенно актуальна эта задача при реализации контроля качества железобетонных конструкций заводского изготовления [1, 2, 8–13], которые в России являются основой современного строительства ввиду сложности климатических условий.

При производстве сборных железобетонных конструкций в условиях рыночной экономики одним из главных требований является обеспечение их надежности при минимуме затрат, что повышает актуальность рассматриваемой в статье технико-экономической проблемы, связанной с совершенствованием системы технологического контроля и управления качеством выпускаемой продукции с заданными потребительскими свойствами<sup>1</sup> [1, 2, 14].

В настоящее время на заводах железобетонных изделий (ЖБИ) оценка эксплуатационной пригодности выпускаемых изделий, согласно действующим стандартам, осуществляется в несколько этапов:

1. Выполняется текущий контроль отдельных показателей качества (прочностные и деформативные характеристики материалов, данные по геометрическим параметрам и армированию).

2. На стадии приемки готовой продукции проводятся периодические контрольные

испытания натуральных конструкций с помощью силового нагружения до разрушения (ГОСТ 8829-94) [15], которые носят выборочный характер.

В целом эти испытания дают возможность обнаружить некоторые погрешности в технологическом процессе, внести в него коррективы, улучшить качество выпускаемых изделий. В то же время следует отметить, что контроль качества конструкций с помощью силового нагружения имеет следующие недостатки:

– действующая система выборочного заводского контроля, помимо экономической неэффективности, практически не учитывает технологическую изменчивость конкретного производства и не обеспечивает гарантии качества и надежности всех конструкций из контролируемой партии [1–3, 12, 13];

– испытание крупногабаритных конструкций требует оснащения специализированных дорогостоящих стендов и значительных затрат времени;

– в условиях испытательных цехов заводов ЖБИ затруднительным является проведение испытаний ряда ответственных конструкций, например колонн, из-за специфики приложения к ним испытательной нагрузки [8, 11].

Как показывают выполненные исследования [1, 3, 8–10, 12], стоимость проведения испытаний при контроле отдельных показателей качества гораздо ниже, чем стоимость проведения контрольных испытаний самих конструкций.

В связи с этим актуальным является решение задачи интегральной оценки надежности

<sup>1</sup>Чирков В.П. Прикладные методы теории надежности в расчетах строительных конструкций: учеб. пособ. М.: Маршрут, 2006. 620 с.

конструкций на стадии изготовления по результатам дифференцированного контроля отдельных параметров, которая может быть решена с использованием вероятностных методов, оценивающих влияние технологических факторов и их изменчивости на потребительские свойства выпускаемой продукции [10, 12, 13, 16].

**Методы**

С учетом указанных недостатков выборочного метода контроля качества железобетонных конструкций на стадии изготовления, на кафедре строительных конструк-

ций и технологии строительства Братского государственного университета при использовании экспериментальной базы комбината «Братскжелезобетон» была предложена и разработана физическая модель автоматизированного способа неразрушающего контроля качества железобетонных конструкций с помощью ЭВМ (рис.1) [1, 3, 8–10].

Получаемая ежемесячно интегральная оценка эксплуатационной пригодности должна являться основанием для приемки и паспортизации изделий [10, 12, 13].

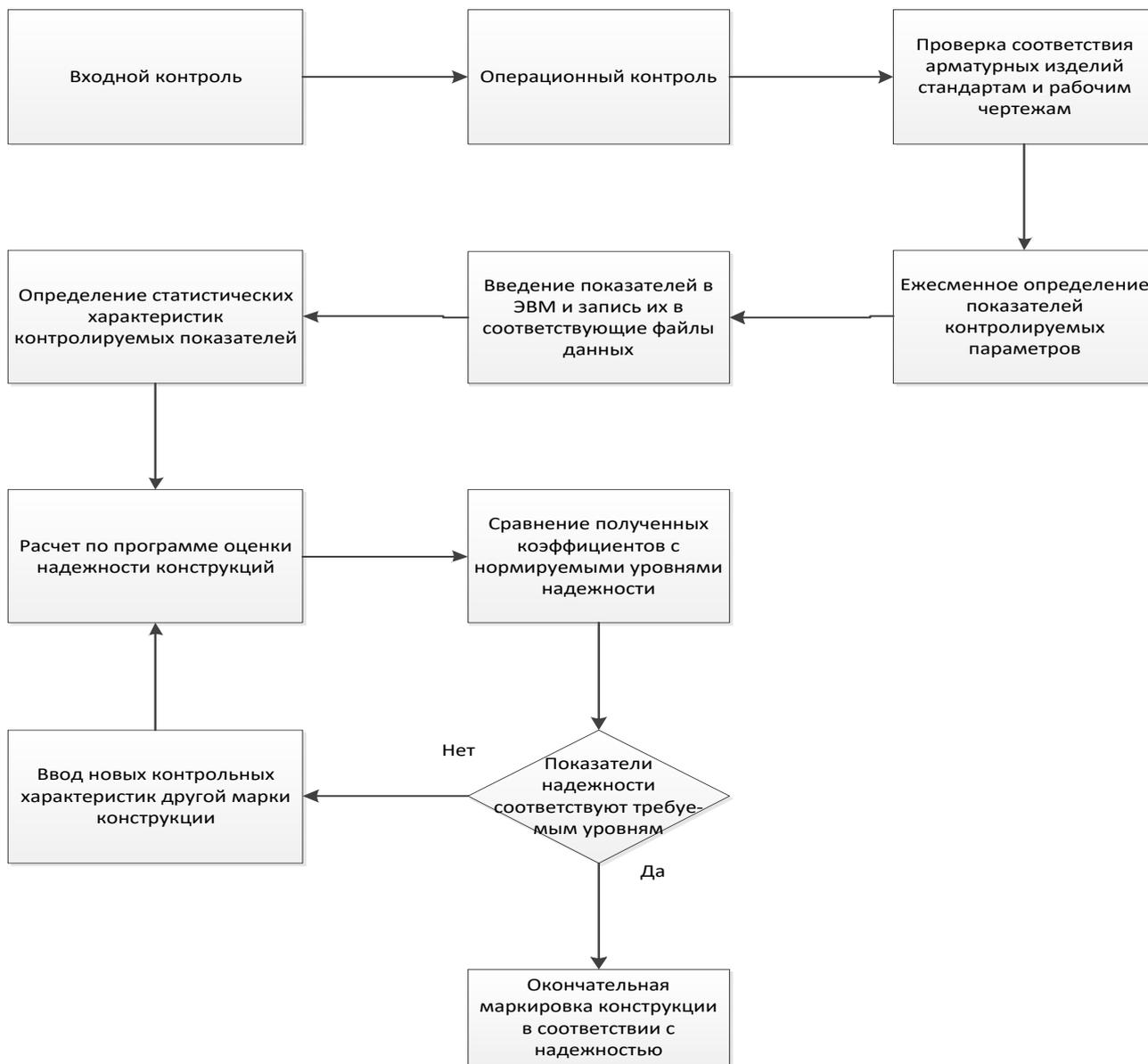


Рис. 1. Блок-схема автоматизированного способа заводского контроля железобетонных конструкций

Fig. 1. Block diagram of the automated method of factory control of reinforced concrete structures

При расчете показателей надежности конструкций на вероятностной основе учитываются два понятия надежности: начальная и эксплуатационная [1, 2, 8, 11]. Начальная надежность  $H_0$  устанавливается на ста-

дии проектирования и изготовления, т.е. на начальный момент эксплуатации. При этом принимается во внимание влияние технологических, производственных и других факторов с учетом их изменчивости<sup>2</sup> (рис. 2) [16].



Рис. 2. Основные факторы, влияющие на начальную надежность железобетонных конструкций на стадии изготовления

Fig. 2. The main factors affecting the initial reliability of reinforced concrete structures at the manufacturing stage

Критерии оценки эксплуатационной пригодности конструкций устанавливаются на основании вероятностного расчета по каждому предельному состоянию [1, 2, 3, 9].

Например, для изгибаемых элементов (плит, балок) показатели начальной надежности  $H_i$  определяются следующим образом:

а) по прочности конструкции по нормальному сечению в предельном состоянии:

$$H_1 = 0,5 + 0,5\Phi\left(\frac{M_u - M_0}{S_{Mu}}\right) \geq [H_1], \quad (1)$$

б) по жесткости:

$$H_2 = 0,5 + 0,5\Phi\left(\frac{f_0 - f}{S_f}\right) \geq [H_2], \quad (2)$$

в) по трещиностойкости:

$$H_3 = 0,5 + 0,5\Phi\left(\frac{a_0 - a}{S_a}\right) \geq [H_3]. \quad (3)$$

В данных формулах

$$\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-t^2/2} dt \quad - \quad \text{функция Лапласа;}$$

$M_u$  – предельный момент внутренних усилий, определяемый по выбранной расчетной модели;  $f$ ,  $a$  – прогиб и ширина раскрытия трещин, определяемые по расчетной модели;  $M_0$  – момент от расчетной нагрузки;  $f_0$ ,  $a_0$  – соответственно, контрольные нормативы значения прогиба и ширины раскрытия трещин;  $S_{Mu}$ ,  $S_f$ ,  $S_a$  – среднеквадратические отклонения величин  $M_u$ ,  $f$ ,  $a$ , которые определяются вероятностным расчетом по выбранной модели с учетом изменчивости основных технологических параметров;  $[H_1]$ ,  $[H_2]$ ,  $[H_3]$  – нормативные уровни надежности, которые принимаются для основных несущих конструкций [1–3]:  $[H_1] = 0,9986$ ;  $[H_2] = [H_3] = 0,90$ .

<sup>2</sup>Чирков В.П. Прикладные методы теории надежности в расчетах строительных конструкций: учеб. пособ. М.: Маршрут, 2006. 620 с.

**Результаты и их обсуждение**

На основании сформулированных вероятностных критериев эксплуатационной пригодности конструкций заводского изготовления разработаны комплексы программ для оценки начальной надежности основных типов сборных железобетонных конструкций (плит, балок, ферм, ригелей, стеновых панелей, колонн и др.). В соответствии с блок-схемой (рис. 1) ежемесячно осуществляется оценка начальной надежности исследуемых конструкций с учетом изменчивости технологических факторов. По полученным показателям надежности выполняется маркировка и паспортизация принятых отделом технического контроля конструкций заводского изготовления [1, 8, 10, 12, 13].

Особенно актуальным является рекомендуемый способ автоматизированной оценки эксплуатационной пригодности для конструкций, испытывающих сложное напряженное состояние (косой изгиб и косое внецентренное сжатие) [8, 17]. Косой изгиб возникает при действии на конструкцию нагрузок в 2-х плоскостях, например, в стеновых панелях [8] при совместном действии вертикальной и горизонтальной нагрузок (от собственного веса и ветровой). Косое внецентренное сжатие возникает в колоннах при наличии эксцентриситетов сжимающей силы относительно двух осей в поперечном сечении элемента. Также косое внецентренное обжатие может возникнуть в момент отпуска напрягаемой арматуры в нижнем поясе фермы, что неблагоприятно сказывается на развитии дальнейшего напряженно-деформированного состояния (НДС) данной конструкции в стадии эксплуатации [17, 18].

Для достоверной оценки НДС железобетонных конструкций со сложным напряженным состоянием необходимо правильно выбрать математическую модель их поведения под нагрузкой [3, 8, 9, 17, 18], например, учитывающую нелинейность характера деформирования. Это обеспечивается при математическом моделировании НДС железобетонных конструкций с помощью введения в расчетный алгоритм фактических диаграмм деформирования материалов, полученных при обработке экспериментальных данных для исходных классов бетона и арматуры [1, 2, 8, 9, 16, 19]. Учитывая эти обстоятельства, для вероятностной оценки начальной надежности стеновых панелей, работающих на совместное действие вертикальных и горизонтальных нагру-

зок, на кафедре строительных конструкций и технологии строительства написаны и зарегистрированы в Роспатенте две программы:

– по нормативной модели (СНиП) на основе метода линеаризации функций<sup>3</sup> [1, 2, 3, 14];

– по методу статистического моделирования на основе нелинейно-деформационной модели с учетом диаграмм деформирования материалов [1, 3, 8, 9]. Адекватность разработанных вероятностных алгоритмов установлена сопоставлением результатов вычислительного и натурального экспериментов по оценке надежности стеновых панелей. В результате натурных испытаний, которые проводились на комбинате «Братскжелезобетон» [1, 3, 8, 15], были определены фактические значения разрушающих нагрузок (первая группа предельных состояний) и фактические значения прогибов и ширины раскрытия трещин (вторая группа предельных состояний). При этом следует отметить, что при анализе испытаний выбранных марок стеновых панелей было установлено, что расчет по СНиП занижает несущую способность стеновых панелей примерно на 15%; расчет с учетом нелинейности дает расхождение с фактическими данными порядка 3...8% [8]. Фактические значения ширины раскрытия трещин попадают в границы доверительного интервала каждой модели с обеспеченностью 0,95...0,98. При сравнении прогибов в горизонтальных сечениях (табл. 1) показано, что для марки стеновой панели ПС 60.12.25–5Л–31Ф1 жесткость не обеспечивается, т.к. фактический прогиб, а также расчетный по деформационной модели превышают значение контрольного прогиба. Об этом же свидетельствуют расчеты, выполненные на вероятностной основе (табл. 2), которые показывают, что показатель начальной надежности по жесткости  $H_2$  по каждой из моделей меньше требуемого уровня надежности  $[H_2] = 0,90$ .

Таким образом, на основании результатов анализа расчетных и экспериментальных данных, полученных при натурных испытаниях стеновых панелей (табл. 1–2), было установлено, что для контроля качества и оценки начальной надежности конструкций со сложным напряженным состоянием на стадии изготовления будет более объективной и достоверной математическая модель на основе реальных диаграмм деформирования конструкционных материалов [8, 9, 16–18]. Заметим, что данная расчетная модель может с такой же высокой степенью достоверности быть применима и к колоннам как при простом, так и при косом внецентренном сжатии [8].

<sup>3</sup>Чирков В.П. Прикладные методы теории надежности в расчетах строительных конструкций: учеб. пособ. М.: Маршрут, 2006. 620 с.

**Таблица 1.** Параметры, учитываемые при оценке горизонтальных прогибов  
**Table 1.** Parameters taken into account when estimating horizontal deflections

Марка конструкции	Значение прогиба, мм			
	контрольное	фактическое	расчетное	
			по СНиП	по деформационной модели
<b>ПС 60.12.25-5Л-31Ф1</b>	<b>18,70</b>	<b>20,40</b>	<b>17,87</b>	<b>19,18</b>
ПС 60.18.25-6Л-44Ф1	18,30	8,02	7,57	11,25
ПС 600.12.30	2,20	1,11	0,52	1,63
ПС 60.12.30-3Л-31Ф1	2,50	2,10	1,37	2,17
ПС 600.12.25	6,50	1,71	1,34	2,57

**Таблица 2.** Показатели начальной надежности испытанных стеновых панелей  
**Table 2.** Indicators of the initial reliability of the tested wall panels

Марка конструкции	Модель СНиП			Нелинейно-деформационная модель		
	H <sub>1</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>3</sub>	H <sub>1</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>3</sub>
<b>ПС 60.12.25-5Л-31Ф1</b>	<b>0,9987</b>	<b>0,8842</b>	<b>0,9226</b>	<b>0,9998</b>	<b>0,8693</b>	<b>0,9054</b>
ПС 60.18.25-6Л-44Ф1	0,9990	0,9688	0,9405	0,9988	0,9798	0,9176
ПС 600.12.30	0,9989	0,9999	0,9506	0,9992	0,9564	0,9289
ПС 60.12.30-3Л-31Ф1	0,9988	0,9217	0,9999	0,9999	0,9466	0,9989
ПС 600.12.25	0,9990	0,9999	0,9999	0,9994	0,9999	0,9999

Использование компьютерных технологий дает возможность при организации основного процесса контроля качества создать файлы для хранения информации по всем контролируемым параметрам. Автоматизированная ежедневная оценка эксплуатационной пригодности исследуемых конструкций начинается с введения в ЭВМ указанных контролируемых показателей качества (рис. 1), после чего выполняется их статистическая обработка с учетом априорных результатов испытаний, полученных за определенный период наблюдений [1, 8, 10]. Затем производится расчет по разработанной программе оценки начальной надежности данного вида выпускаемых железобетонных изделий с учетом технологической изменчивости. Результаты расчета могут служить критерием для паспортизации и приемки указанной партии изделий по требованиям прочности, жесткости, трещиностойкости [1, 10, 12, 15].

### Заключение

Предложенный неразрушающий способ приемочной системы заводского контроля качества железобетонных конструкций дает возможность [3, 8, 9, 10, 12]:

- ежедневно выполнять контроль качества выпускаемых изделий на основе интегральной оценки их надежности, учитывая технологическую изменчивость производства;
- выявлять резервы снижения материалоемкости и решать производственные вероятностно-оптимизационные задачи с использованием разных расчетных моделей, кото-

рые наиболее достоверно оценивают фактическое НДС исследуемых конструкций;

- определять основополагающие предпосылки для оперативного управления технологическим процессом в целях улучшения его стабильности.

Для внедрения автоматизированной системы заводского контроля качества основной номенклатуры сборных железобетонных конструкций главным условием является наличие разработанных программных комплексов по оценке их эксплуатационной пригодности. На кафедре строительства Братского государственного университета с использованием экспериментальных исследований, выполненных на комбинате «Братскжелезобетон», разработаны программные комплексы по оценке НДС и надежности основных видов несущих железобетонных конструкций массового заводского изготовления, которые зарегистрированы в Роспатенте, прошли апробацию на комбинате «Братскжелезобетон» и в проектных институтах г. Братска «Братскгражданпроект» и СибЭНТЦ, внедрены в учебный процесс (при обучении магистрантов и аспирантов) [3, 8, 9, 16].

Экономическая эффективность разработанной системы приемочного заводского контроля обусловлена значительным снижением (от 6 до 10 раз) объема проводимых натуральных испытаний [1, 12, 15], что приводит к снижению себестоимости выпущенной продукции почти на 2,5% [12].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тамразян А.Г., Дудина И.В. Обеспечение качества сборных железобетонных конструкций на стадии изготовления // Жилищное строительство. 2001. № 3. С. 8–10.
2. Райзер В.Д. Теория надежности сооружений: науч. издание. М.: Изд-во АСВ, 2010. 384 с.
3. Kovalenko G.V., Samarin Y.A., Mitasov V.M. Evaluation of the stress-strain state of cracked slabs different settlement patterns // Proceedings of the Universities. Construction. Architecture. Transport. 1990. № 11. p. 116–121.
4. Слюсарев Г.В. Модифицированный вибрационный метод интегральной оценки качества железобетонных изделий с применением продольных колебаний // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1995. № 5-6. С. 122–125.
5. Ruborotuka I.A. Challenges of the quality of reinforced concrete buildings in Dar es Salaam // Tanzania International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). 2013. Vol. 2. Iss. 12. p. 820–827.
6. Abdelouafi E.G., Benaissa K., Abdellatif K. Reliability analysis of reinforced concrete building: comparison between FORM and ISM // Procedia Engineering. 2015. Vol. 114. p. 650–657.  
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.006>
7. Филатов А.В. Контроль качества железобетонных конструкций // European science. 2015. № 9 (10). p. 28–29.
8. Коваленко Г.В., Жердева С.А., Дудина И.В. Контроль качества и оценка надежности сборных железобетонных конструкций со сложным напряженным состоянием // Системы. Методы. Технологии. 2014. № 3 (23). С. 161–174.
9. Kovalenko G.V., Dudina I.V., Nester E.V. Chance models and estimators of primary reliability of constructions with mixed reinforcement // European Science and Technology: materials of the international research and practice conference (31<sup>st</sup> January 2012, Wiesbaden). Vol. I. Wiesbaden: Bildungszentrum Rodnik E.V. Publ., 2012. P. 237–243.
10. Пат. 2015128114, Российская Федерация, МПК G01N 3/32. Автоматизированный способ неразрушающего контроля качества железобетонных конструкций на основе интегральной оценки их надежности / Коваленко Г.В., Люблинский В.А., Дудина И.В., Жердева С.А., Нестер Е.В.; заявитель ФГБОУ ВПО «Братский государственный университет»; заявл. 10.07.2015; опубл. 12.01.2017. Бюл. № 2. М.: Роспатент, 2017.
11. Кумпяк О.Г., Галяутдинов З.Р., Пахмурин О.Р. Эксплуатационная надежность железобетонного каркаса с дефектами стыков колонн // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2014. № 3 (44). С. 88–95.
12. Kaverzina L., Kovalenko G., Dudina I., Bel'skii O. Cost efficiency assessment of automated quality control of precast structures // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 143. p. 04006.  
<https://doi.org/10.1051/matecconf/201814304006>
13. Каверзина Л.А., Коваленко Г.В., Дудина И.В., Бельский О.К. Автоматизированный контроль качества конструкций заводского изготовления // Сборник трудов Международной научно-практической конференции «Интеллектуальный город: устойчивость, управление, архитектура, реновация, технологии» (08–10 ноября 2018 г., Казань). Казань: ООО «Новое знание», 2018. С. 132–136.
14. Spaethe G. Die Sicherheit tragender Baukonstruktionen. Zweite, neubearbeitete Auflage. Wien: Springer-Verlag, 1992. 303 s.
15. Дудина И.В., Нестер Е.В. Методика натуральных испытаний железобетонных ребристых плит покрытия // Системы. Методы. Технологии. 2011. № 1 (9). С. 113–118.
16. Дудина И.В., Рамазанова Г.А., Нестер Е.В. Влияние некоторых конструктивных параметров совмещенного армирования железобетонных балок при оценке их предельных состояний // Системы. Методы. Технологии. 2018. № 2 (38). С. 139–145.  
<https://doi.org/10.18324/2077-5415-2018-2-139-145>
17. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. М.: Стройиздат, 1996. 416 с.
18. Плевков В.С., Балдин И.В., Балдин С.В., Ласковенко А.Г., Ласковенко Г.А. Прочность и трещиностойкость железобетонных элементов при совместном действии изгибающих моментов, продольных и поперечных сил // Сборник

трудов международной научной конференции «Современные проблемы расчета железобетонных конструкций, зданий и сооружений на аварийные воздействия»

(19–20 апреля 2016 года, Москва). М.: НИ МГСУ, 2016. С. 323–328.

19. Voss J. An Introduction to Statistical Computing: a simulation-based approach. Chichester: Wiley, 2013. 396 p.

## REFERENCES

1. Tamrazjan AG, Dudina IV. Quality assurance of precast concrete structures at the manufacturing stage. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo = Housing Construction*. 2001;3:8–10. (In Russ.)
2. Raizer VD. Theory of structural safety. Moscow: Association of Civil Engineering Universities; 2010. 384 p. (In Russ.)
3. Kovalenko GV, Samarin YA, Mitasov VM. Evaluation of the stress-strain State of Rissed Slabs different settlement patterns. *Proceedings of the Universities. Construction. Architecture. Transport*. 1990;11:116–121.
4. Slyusarev GV. Modified vibration method for integral assessment of the quality of reinforced concrete products using longitudinal vibrations. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura = News of higher educational institutions. Construction*. 1995;5-6:122–125. (In Russ.)
5. Ruboratuka IA. Challenges of the quality of reinforced concrete buildings in Dar es Salaam. *Tanzania International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*. 2013;2(12):820–827.
6. Abdelouafi EIG, Benaissa K, Abdellatif K. Reliability analysis of reinforced concrete building: comparison between FORM and ISM. *Procedia Engineering*. 2015;114:650–657. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.006>
7. Filatov AV. Quality control of concrete constructions. *European science*. 2015;9(10):28–29. (In Russ.)
8. Kovalenko GV, Zherdeva SA, Dudina IV. Quality control and evaluation of reliability of precast concrete structures with combined stress state. *Sistemy. Metody. Tekhnologii = Systems. Methods. Technologies*. 2014;3:161–167. (In Russ.)
9. Kovalenko GV, Dudina IV, Nester EV. Chance models and estimators of primary reliability of constructions with mixed reinforcement. *European Science and Technology: materials of the international research and practice conference (31<sup>st</sup> January 2012, Wiesbaden)*. Vol. I. Wiesbaden: Bildungszentrum Rodnik E.V. Publ., 2012. P. 237–243.
10. Kovalenko GV, Ljublinskij VA, Dudina IV, Zherdeva SA, Nester EV. Automated method for non-destructive quality control of reinforced concrete structures based on an integral assessment of their reliability. Patent RF, no. 2015128114, 2017. (In Russ.)
11. Kumpyak OG, Galyautdinov ZR, Pakhmurin OR. Serviceability of reinforced concrete frame with joint defects of columns. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta*. 2014;3:88–95. (In Russ.)
12. Kaverzina L, Kovalenko G, Dudina I, Bel'skii O. Cost efficiency assessment of automated quality control of precast structures. *MATEC Web of Conferences*. 2018;143:04006. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201814304006>
13. Kaverzina LA, Kovalenko GV, Dudina IV, Bel'skii OK. Automated quality control of prefabricated structures. *Sbornik trudov mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Intel'ktual'nyi gorod: ustoychivost', upravlenie, arkhitektura, renovatsiya, tekhnologii"* (08–10 November 2018, Kazan). Kazan: Novoe znanie; 2018. p. 132–136. (In Russ.)
14. Spaethe G. Die Sicherheit tragender Baukonstruktionen. Zweite, neubearbeitete Auflage. Wien: Springer-Verlag; 1992. 303 s.
15. Dudina IV, Nester EV. Methodology of real researches of ferro-concrete covering plates. *Sistemy. Metody. Tekhnologii = Systems. Methods. Technologies*. 2011;9:113–118. (In Russ.)
16. Dudina IV, Ramazanova GA, Nester EV. Influence of some design parameters of the combined reinforcement of concrete beams in assessing their limit states. *Sistemy. Metody. Tekhnologii = Systems. Methods. Technologies*. 2018;2:139–145. <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2018-2-139-145> (In Russ.)

17. Karpenko NI. General models of mechanics of reinforced concrete. Moscow: Stroiizdat; 1996. 416 p. (In Russ.)  
18. Plevkov VS, Baldin IV, Baldin SV, Laskovenko AG, Laskovenko GA. Strength and crack resistance of reinforced concrete elements under the combined action of bending moments, longitudinal and transverse forces. *Proceedings of the international scientific conference*

*“Modern problems of calculating reinforced concrete structures, buildings and structures for emergency impacts”*. Moscow: NI MGSU; 2016. pp. 323–328. (In Russ.)  
19. Voss J. *An Introduction to Statistical Computing: a simulation-based approach*. Chichester: Wiley; 2013. 396 p.

**Сведения об авторах**

**Information about the authors**

**Коваленко Галина Владимировна**,  
кандидат технических наук,  
заведующий кафедрой строительных  
конструкций и технологии строительства,  
Братский государственный университет,  
665709, г. Братск, ул. Макаренко, 40,  
Россия,  
✉e-mail: kovalenkogv1949@mail.ru  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9727-1568>

**Galina V. Kovalenko**,  
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor  
of the Department of Building Structures and  
Construction Technologies,  
Bratsk State University,  
40 Makarenko St., Bratsk, 665709, Russia,  
✉e-mail: kovalenkogv1949@mail.ru  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9727-1568>

**Дудина Ирина Васильевна**,  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры строительных  
конструкций и технологии строительства,  
Братский государственный университет,  
665709, г. Братск, ул. Макаренко, 40,  
Россия,  
e-mail: dydina\_irina@mail.ru  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6047-4839>

**Irina V. Dudina**,  
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor  
of the Department of Building Structures and  
Construction Technologies,  
Bratsk State University,  
40 Makarenko St., Bratsk, 665709, Russia,  
e-mail: dydina\_irina@mail.ru  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6047-4839>

**Нестер Елена Валерьевна**,  
доцент кафедры строительных  
конструкций и технологии строительства,  
Братский государственный университет,  
665709, г. Братск, ул. Макаренко, 40,  
Россия,  
e-mail: elena\_nester@mail.ru  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5958-7630>

**Elena V. Nester**,  
Associate Professor of the Department  
of Building Structures and Construction  
Technologies,  
Bratsk State University,  
40 Makarenko St., Bratsk, 665709, Russia,  
e-mail: elena\_nester@mail.ru  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5958-7630>

**Заявленный вклад авторов**

**Contribution of the authors**

Коваленко Г.В., Дудина И.В., Нестер Е.В. имеют равные авторские права. Коваленко Г.В. несет ответственность за плагиат.

Kovalenko G.V., Dudina I.V., Nester E.V. have equal author's rights. Kovalenko G.V. bears the responsibility for plagiarism.

**Конфликт интересов**

**Conflict of interests**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflict of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

All authors have read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 18.03.2021.  
Одобрена после рецензирования 23.04.2021.  
Принята к публикации 29.04.2021.

The article was submitted 18.03.2021.  
Approved after reviewing 23.04.2021.  
Accepted for publication 29.04.2021.