

Ю.А. БЕЛЕНЦОВ✉, Д.А. ЧЕРЕПАНОВА

ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I», Московский пр., д. 9, г. Санкт-Петербург, 190031,
Российская Федерация

ВЛИЯНИЕ МЕТОДИКИ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА БЕТОНА ПО ФИЗИКО–МЕХАНИЧЕСКИМ ПОКАЗАТЕЛЯМ НА НАДЕЖНОСТЬ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Аннотация

Введение. Система технического контроля строительства оценивает физико-механические свойства бетонов на основании испытания серии образцов, отбираемых из партии бетона. Необходимо учитывать влияние методики контроля на качество бетонных конструкций и их надежность.

Цель. Создание системы технического контроля, которая должна устранять причины выявленных рисков за счет снижения влияния выявленных причин.
Материалы и методы. Методика контроля влияет на надежность возводимых конструкций из бетона и оценивается с точки зрения выбора количества образцов и отбрасывания минимальных значений прочности в серии. Сравниваются результаты контроля серии образцов бетона по шести образцам, подобранным таким образом, чтобы обеспечивать соответствие заявленному классу при отбрасывании двух минимальных значений образцов.

Результаты. В результате анализа влияния методики на качество и надежность: класс В оказывается ниже заложенного на две ступени, внутрисерийный коэффициент вариации превышает допустимый на 8 %, а уровень надежности значительно ниже β на 36 %.

Выводы. Проведенные исследования показывают недоучет методической составляющей контроля материалов, который может оставлять значительные пробелы в системе технического контроля строительной продукции и не позволяет обеспечить требуемый уровень надежности конструкций.

Ключевые слова: контроль качества, бетонные конструкции, методика контроля, уровень надежности, вероятность, безотказная работа

Для цитирования: Беленцов Ю.А., Черепанова Д.А. Влияние методики контроля качества бетона по физико-механическим показателям на надежность строительных конструкций // *Бетон и железобетон*. 2023. № 5/6 (619). С. 25–31. DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2023-5/6\(619\)-25-31](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2023-5/6(619)-25-31)

Вклад авторов

Авторы внесли равноценный вклад в подготовку публикации.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 01.11.2023

Поступила после рецензирования 04.12.2023

Принята к публикации 07.12.2023

Yu.A. BELENTSOV✉, D.A. CHEREPANOVA
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,
Moskovsky Ave., 9, Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

THE INFLUENCE OF METHODS OF CONCRETE QUALITY CONTROL BY PHYSICAL AND MECHANICAL PARAMETERS ON THE RELIABILITY OF BUILDING STRUCTURES

Abstract

Introduction. The construction technical control system evaluates the physical and mechanical properties of concrete on the base of testing a series of samples taken from a batch of concrete. It is necessary to take into account the influence of the control method on the quality of concrete structures and their reliability.

Aim. Creation of a technical control system that should eliminate the causes of the identified risks by reducing the impact of the identified causes.

Materials and methods. The control method affects the reliability of concrete structures being built and is evaluated from the point of view of choosing the number of samples and discarding the minimum strength values in the series. The results of the control of a series of concrete samples for 6 samples selected in such a way as to ensure compliance with the declared class when discarding 2 minimum sample values are compared.

Results. As a result of the analysis of the impact of the methodology on quality and reliability: class B turns out to be 2 steps lower than the prescribed one, the in-series coefficient of variation exceeds the permissible one by 8 %, and the reliability level is significantly lower by 36 %.

Conclusions. The conducted research shows an underestimation of the methodological component of material control, which can leave significant gaps in the system of technical control of construction products and does not allow to ensure the required level of reliability of structures.

Keywords: quality control, concrete structures, control methods, reliability level, probability, trouble-free operation

For citation: Belentsov Yu.A., Cherepanova D.A. The influence of methods of concrete quality control by physical and mechanical parameters on the reliability of building structures. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2023, no. 5/6 (619), pp. 25–31. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2023-5/6\(619\)-25-31](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2023-5/6(619)-25-31)

Author contribution statements

The authors have made an equal contribution to the preparation of the publication.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 01.11.2023

Revised 04.12.2023

Accepted 07.12.2023

Современная система технического контроля строительства предполагает возможность оценки физико-механических свойств бетонов на основании испытания серии образцов, отбираемых из партии бетона [1]. Количество образцов и методика отбора образцов зависят от вида испытания, однородности бетонной смеси и т. п. При этом не учитывается влияние методики контроля на результат контроля качества бетонных конструкций и обеспечения уровня надежности строительной продукции. Одной из причин несовершенства методов контроля является невозможность установить причинно-следственные связи между параметрами качества процессов, контролируемых в процессе возведения здания, и результатами реальной эксплуатации, прежде всего, по уровню надежности, а значит по расходам на функционирование системы плановых предупредительных осмотров и ремонтов с приемлемым уровнем безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости как составляющих надежности [2]. Однако проблема решается при использовании концепции рассмотрения всего жизненного цикла

строительной продукции в едином процессном подходе: от начала разработки и проектирования, возведения, эксплуатации и ремонта, до утилизации после эксплуатации.

Необходимо создание единого комплексного подхода к контролю качества строительной продукции на любом этапе жизненного цикла.

Критерием, позволяющим сравнивать варианты взаимосвязи качества строительных конструкций с показателями, определяемыми в процессе возведения и контроля качества отдельных технических свойств строительных элементов и конструкций, может служить экономический критерий или надежность возводимых конструкций [3]. При этом надежность как техническая величина, поддающаяся количественной оценке, позволяет создать основы методического подхода к техническому контролю качества материалов и конструкций [4, 5]. Причинно-следственные связи для риска несоответствия по уровню надежности бетонных конструкций в виде диаграммы Исикавы приведены на рис. 1.



Рис. 1. Графическое изображение диаграммы Исикавы для низкого уровня надежности строительных конструкций зданий и сооружений

Fig. 1. Graphical representation of the Ishikawa diagram for a low level of reliability of building structures

В идеале система технического контроля должна устранять причины выявленного риска за счет снижения влияния выявленных причин, но несоответствия субъективное, методическое, метрологическое и техническое за счет точности контроля снижают эффективность работы системы технического контроля и значительно увеличивают риски строительной индустрии.

В частности, влияние методики контроля на надежность возводимых конструкций из бетона оценим с точки зрения выбора количества образцов и отбрасыванием минимальных значений прочности в серии [1]. Рассмотрим влияние возможности отбрасывать минимальные показатели прочности бетона в процессе контроля. Образцы изготавливают и испытывают сериями.

Число образцов в серии принимают в зависимости от среднего внутрисерийного коэффициента вариации прочности бетона V_s [6].

Таблица 1
Table 1

Число образцов в серии
The number of samples in the series

Внутрисерийный коэффициент вариации, V_s , %	5 и менее	более 5	до 8 включ.
Требуемое число образцов в серии, шт.	2	3 или 4	6

В случае если средний внутрисерийный коэффициент вариации прочности бетона на сжатие V_s превышает 8 %, необходимо провести внеочередную переаттестацию испытательной лаборатории.

Прочность бетона (кроме ячеистого) в серии образцов определяют как среднеарифметическое значение прочности испытанных образцов в серии [6]:

- из двух образцов – по двум образцам;
- из трех образцов – по двум образцам с наибольшей прочностью;
- из четырех образцов – по трем образцам с наибольшей прочностью;
- из шести образцов – по четырем образцам с наибольшей прочностью.

Рассмотрим влияние методической погрешности на результаты контроля прочности бетона на характеристики однородности и вероятности отказа. Для оценки сформулируем предельные условия выполнения требований нормативов:

- средняя прочность серии соответствует требованиям класса $R_{ф}$;
- минимальная прочность образцов в серии больше показателя класса B ;
- коэффициент вариации внутрисерийный не превышает $v_{вн} = 8\%$;
- коэффициент вариации межсерийный предельный $v = 13\%$;

- предполагается нормальный закон распределения вероятностей;
- серия из шести образцов с отбрасыванием двух минимальных показателей прочности;
- доверительная вероятность 0,95.

На примере бетона В30 наименее невыгодная ситуация будет, если два отбрасываемых образца будут минимально допустимого показателя прочности, то есть соответствующего класса. Часть образцов, чтобы компенсировать \min прочность для получения требуемой средней прочности, должны быть близки максимальной величине с учетом коэффициента вариации.

$$R_{\max} = 2R_{ф} - B = R_{ф}(2 - (1 - tv)) = R_{ф}(1 + tv); \quad (1)$$

$$B = R_{ф}(1 - tv). \quad (2)$$

Остальные образцы должны соответствовать математическому ожиданию, т. е. средней прочности, требуемой для класса. Результаты подобраны так, чтобы после отбрасывания двух результатов внутрисерийный коэффициент вариации не превышал 8 %.

Результаты в серии образцов В30 подобраны исходя из требований, изложенных выше. Сравним показатели прочности и однородности при отбрасывании двух минимальных образцов и при их сохранении в серии. Предварительно проверим, не является ли минимальное значение грубым промахом. Результаты серии и поверки \min значения по критерию Диксона и Романовского на грубый промах измерения приведены в табл. 2.

Таблица 2
Table 2

Результаты серии оценки прочности бетона и оценка наличия грубых промахов
The results of a series of concrete strength assessment and an assessment of the presence of blunders

N	R_i , МПа	$x_i - x_{ср}$	$(x_i - x_{ср})^2$
1	30	-8	64
2	32	-6	36
3	38	0	0
4	38	0	0
5	44	6	36
6	46	8	64
$R_{ф}$	38	Σ	200
			6,32

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

Критерий Романовского

$$\beta = \frac{|(x_i - \bar{x})|}{S_x} < \beta = f(n) \quad (3)$$

$$1,265 < 2,1$$

Поскольку $1,26 < 2,1$, результат не является промахом.

Критерий Диксона

$$K_D = \frac{x_n - x_{n-1}}{x_n - x_1} < Z_q \quad (4)$$

$$0,125 < 0,56$$

Поскольку $0,125 < 0,56$, результат не является промахом.

Значит, поскольку \min значения прочности не являются грубым промахом, отбрасывать их с метрологической точки зрения не нужно.

Результаты обработки серии до и после отбрасывания двух результатов приведены в табл. 3.

Определялся фактический класс бетона по прочности монолитной конструкции или отдельной зоны конструкции при контроле прямыми неразрушающими или разрушающими методами и по числу участков испытаний $6 < n < 15$ по схеме В [1].

В результате обработки:

– без отбрасывания двух \min значений из шести, коэффициент вариации серии $v_{вн} = 15 \%$, класс бетона по ГОСТ 18105 [1] составит В25, при расчете по формуле с учетом внутрисерийного коэффициента вариации составит В27,5.

– после отбрасывания двух \min значений из шести, коэффициент вариации серии $v_{вн} = 8 \%$, класс бетона по ГОСТ 18105 [1] составит В30, при расчете по формуле с учетом внутрисерийного коэффициента вариации составит В35.

В результате без отбрасывания двух образцов класс В оказывается ниже заложенного на две ступени, внутрисерийный коэффициент вариации превышает допустимый на 8 %, когда необходимо провести внеочередную переаттестацию испытательной лаборатории [6]. После отбрасывания соответствует пока-

зателям класса бетона В30. Т. е. при отбрасывании образцов мы завышаем класс бетона на одну или две ступени, при этом существенно снижаем внутрисерийный коэффициент вариации.

Оценим влияние на уровень надежности с учетом методической коррекции с отбрасыванием результатов и без. Необходимо учитывать, что надежность на сегодняшний момент выходит на первый план при расчете и проектировании, возведении, контроле, эксплуатации, поскольку это является технической основой эффективных и экономичных конструкций [7]. Уровень надежности в европейских нормативных документах является важной характеристикой, определяющей особенности проектирования и возведения конструкций [8–10].

Безотказность конструкции обуславливается коэффициентом запаса несущей способности, определяющейся разницей между несущей способностью и нагрузочным эффектом, с учетом случайного характера основных влияющих величин [3, 8, 7, 11].

$$\bar{R} - \bar{Q} > 0, \quad (5)$$

где \bar{R}, \bar{Q} – значения несущей способности и нагрузочного эффекта.

Значит, в среднем конструкции при проектировании закладываются с запасом, обеспечивающим требуемый уровень надежности и безотказности. Величина запаса несущей способности характеризуется показателями индекса надежности и вероятности безотказной работы [5, 7]:

$$\beta = \frac{\bar{R} - \bar{Q}}{\sqrt{S_R^2 + S_Q^2}}, \quad (6)$$

где S_R, S_Q – СКО прочностных свойств материала и нагрузок.

Таблица 3
Table 3

Результаты обработки серии образцов бетона до и после отбрасывания двух результатов
The results of processing a series of concrete samples before and after discarding two results

n	$B, \text{МПа}$	$R_{\max}, \text{МПа}$	$R, \text{МПа}$	$(X_i - X)^2$	n	$B, \text{МПа}$	$\bar{R}, \text{МПа}$	$R_{\max}, \text{МПа}$	$R, \text{МПа}$	$(X_i - X)^2$
1	30	46	30	64	1	30	38	46	отбр.	
2			32	36					отбр.	
3			38	0					38	12,25
4			38	0					38	12,25
5			44	36					44	6,25
6			46	64					46	20,25
		\bar{R}	38	200			\bar{R}	41,5	51	
			S	5,69				S	3,43	
			v	15 %				v	8 %	

Класс

ГОСТ 18105

$$B_{\phi} = R_{\text{тп}} - k_{\text{сц}} S_{\text{м}}$$

$$B = \bar{R}(1 - t_v)$$

26,63

25

28,67

27,5

Класс

ГОСТ 18105

$$B_{\phi} = R_{\text{тп}} - k_{\text{сц}} S_{\text{м}}$$

$$B = \bar{R}(1 - t_v)$$

34,64

30

35,88

35

Вероятность отказа определяется по формуле [5, 7]:

$$P_f = \frac{1}{2} - \Phi(\beta) = \frac{1}{2} - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^\beta \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx;$$

$$P_f = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{\beta^2 - 1}{\beta^3} \exp\left(-\frac{\beta^2}{2}\right), \quad (7)$$

где $\beta = \frac{K_{зап} - 1}{\sqrt{(v_R^2 K_{зап}^2 + v_Q^2)}}$, (8)

v_R, v_Q – коэффициент вариации прочностных свойств материала и нагрузок.

Результаты расчета показателей безотказности конструкций из бетона при приемке с использованием разных методов обработки, с отбрасыванием двух минимальных и без для материалов, приведенных выше, сведены в табл. 4.

Расчетная прочность бетонов для 1 группы предельных состояний принята по нормативам для бетона В30 $R_{расч1} = 17$ МПа [12].

Значит, по результатам обработки результатов серии образцов бетона после отбрасывания двух образцов мы примем класс бетона В30, с индексом надежности $\beta = 6,389$ коэффициентом запаса $K_{зап} = 2,44$ при вероятности отказа $Pf = 8,33 \times 10^{-11}$. В реальности результаты серии окажутся ниже, бетон В25 с индексом надежности $\beta = 4,25$, коэффициентом запаса $K_{зап} = 2,24$ при вероятности отказа $Pf = 1,04 \times 10^{-5}$. Т. е. в реальности класс будет ниже проектного на 1–2 ступени, а уровень надежности значительно ниже β на 36 %.

Выводы

Проведенные исследования показывают недоучет методической составляющей контроля материалов, который может оставлять значительные пробелы в

системе технического контроля строительной продукции и не позволяет обеспечить требуемый уровень надежности конструкций. Существующий подход закладывает при выполнении требований системы контроля завышение реальных показателей физико-механических свойств бетона и снижение уровня надежности возводимых конструкций при наиболее невыгодном стечении обстоятельств. Необходимо совершенствовать методы контроля с учетом случайного характера величин физико-механических характеристик материалов и нагрузок, более требовательно подходить к выбору методического и метрологического обеспечений системы контроля. Решение возможно за счет создания комплекса контрольных испытаний, включающих как разрушающие, так и неразрушающие методы и совершенствования методики и обеспечения контроля. Это подход обеспечит более полное сопровождение системой контроля всех этапов жизненного цикла строительной продукции для обеспечения требуемого уровня надежности.

Список литературы

1. ГОСТ 18105-2010. Бетоны. Правила контроля и оценки прочности. Москва: Стандартинформ; 2012.
2. Ефремов И.В., Рахимова Н.Н. Надежность технических систем и техногенный риск. Оренбург: ОГУ; 2013. 163 с.
3. Райзер В.Д. Оптимизация надежности конструкций и безопасности человека / Сборник научных статей «Актуальные проблемы исследований по теории сооружений» ЦНИИСК им. Кучеренко. 2009. Т. 1. С. 22–31.
4. Беленцов Ю.А., Ильинская Г.Г., Лесовик В.С. Повышение надежности конструкций управлением параметрами композиционного материала // *Строительные материалы*. 2011. № 3. С. 90–92.

Таблица 4

Table 4

Результаты расчета показателей безотказности конструкций из бетона при приемке с использованием разных методов обработки, с отбрасыванием двух минимальных и без
The results of calculating the reliability indicators of concrete structures during acceptance using different processing methods, with the rejection of two minimum and without it

Класс	Без отбрасывания двух образцов из шести		При отбрасывании двух образцов из шести	
	R_f	B	B	
$B_f = R_{тн} - k_{sc} S_m$ ГОСТ 18105	26,63	25	34,64	30
$B = \bar{R}(1 - tv)$	28,67	27,5	35,88	35
$R_{расч1}$, МПа	17		17	
	$K_{зап}$	2,24	$K_{зап}$	2,44

v_F	v_Q	Pf	β	$K_{зап}$
15 %	0,185	1,04E-05	4,255	2,24
8 %	0,185	8,33E-11	6,389	2,44

5. Ржаницын А.Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность. Москва: Стройиздат; 1978. 239 с.

6. ГОСТ 10180-2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. Москва: Стандартинформ; 2018.

7. Райзер В.Д. Теория надежности сооружений. Москва: Издательство АСВ; 2010. 384 с.

8. Лантух-Лященко А.И. Концепция надежности в Еврокоде // *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. 2014. № 6. С. 79–88.

9. НСР ЕН 1990-2011. ЕВРОКОД 0: Основы проектирования сооружений. Москва; 2011.

10. Handbook 2 reliability backgrounds partnership. Development of skills facilitating implementation of euro-codes. Leonardo da Vinci Pilot Project CZ/02/B/F/PP-134007. Prague, 2005, p. 254.

11. Егоров В.В., Беленцов Ю.А., Абу-Хасан М.С., Куправа Л.Р. Повышение качества контроля механических свойств бетона при использовании комплекса контроля по двум параметрам // *БСТ: Бюллетень строительной техники*. 2019. № 8. С. 35–37.

12. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Москва: Стандартинформ; 2019.

References

1. State Standard 18105-2010. Concrete. Rules for strength control and assessment. Moscow: Standartinform; 2012. (In Russian).

2. Efremov I.V., Rakhimova N.N. Reliability of technical systems and technogenic risk. Orenburg: OSU; 2013. (In Russian).

3. Raiser V.D. Optimization of structural reliability and human safety. Collection of scientific articles “Actual problems of research on the theory of structures” TSNIIISK named after Koucherenko. 2009, vol. 1, pp. 22–31. (In Russian).

4. Belentsov Yu.A., Ilyinskaya G.G., Lesovik V.S. Improving the reliability of structures by control of the parameters of composite material. *Building materials*. 2011, no. 3, pp. 90–92. (In Russian).

5. Rzhanytsyn A.R. Theory of calculation of building structures for reliability. Moscow: Stroyizdat Publ.; 1978. 239 p. (In Russian).

6. State Standard 10180-2012. Concretes. Methods for strength determination using reference specimens. Moscow: Standartinform Publ.; 2018. (In Russian).

7. Raiser V.D. Theory of reliability of structures. Moscow: ASW Publishing House; 2010. 384 p. (In Russian).

8. Lantukh-Lyashchenko A.I. The concept of reliability in the Eurocode. *Mosti ta tuneli: theory, doslidzhennya, praktika*. 2014, no. 6, pp. 79–88. (In Russian).

9. NSR EN 1990-2011. EUROCODE 0: Fundamentals of design of structures. Moscow; 2011. (In Russian).

10. Handbook 2 reliability backgrounds partnership. Development of skills facilitating implementation of euro-codes. Leonardo da Vinci Pilot Project CZ/02/B/F/PP-134007. Prague, 2005, p. 254.

11. Egorov V.V., Belentsov Yu.A., AbuKhasan M.S., Kuprava L.R. Improving the quality control of the mechanical properties of concrete when using the complex control in two ways. *BST: Bulletin of Construction machinery*. 2019, no. 8, 2019, pp. 35–37. (In Russian).

12. SP 63.13330.2018. Concrete and reinforced concrete structures. General provisions. Moscow: Standartinform; 2019. (In Russian).

**Информация об авторах /
Information about the authors**

Юрий Алексеевич Беленцов✉, д-р техн. наук, профессор кафедры «Строительные материалы и технологии», Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербург
e-mail: belents@mail.ru

Yuri A. Belentsov✉, Dr. Sci. (Engineering), Professor of the “Building Materials and Technologies” Department, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Saint Petersburg
e-mail: belents@mail.ru

Дарья Алексеевна Черепанова, менеджер по качеству, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербург
e-mail: cherepanova@pgups.ru

Daria A. Cherepanova, Quality Manager, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Saint Petersburg
e-mail: cherepanova@pgups.ru

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author