УДК 539.4

© Ю. А. Беленцов, д-р техн. наук, профессор
(Петербургский государственный университет путей
сообщения Императора Александра I)
E-mail: belents@mail.ru

© А. М. Харитонов, д-р техн. наук, профессор

© Ю. М. Тихонов, д-р техн. наук, профессор

(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)

E-mail: peepdv@mail.ru, umt-07@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2017-14-6-147-151

© Yu. A. Belentsov, Dr. Sci. Tech., Professor
(Emperor Alexander I St. Petersburg State
Transport University)

E-mail: belents@mail.ru

© A. M. Kharitonov, Dr. Sci. Tech., Professor

© Yu. M. Tikhonov, Dr. Sci. Tech., Professor

(Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering)

E-mail: peepdv@mail.ru, umt-07@mail.ru

ОЦЕНКА МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ПРОЧНОСТИ БЕТОНА ПО КРИТЕРИЮ НАДЕЖНОСТИ ВОЗВОДИМЫХ КОНСТРУКЦИЙ

EVALUATION OF THE METHODS OF CONCRETE QUALITY CONTROL BY THE CRITERION OF CONSTRUCTION PRODUCTS` RELIABILITY

Проанализирована взаимосвязь методов контроля качества строительных материалов (на примере бетона) и показателей надежности возводимых конструкций. Переход исключительно на неразрушающие методы контроля при оценке прочности бетона приведет к снижению доверительной вероятности испытания. Это отразится на индексе безопасности и вероятности отказа конструкций. Для решения указанной проблемы необходимо создать системы контроля бетона на объекте повышенной точности, включающие разрушающие и неразрушающие методы.

Ключевые слова: доверительная вероятность, контроль прочности, бетон, железобетон, коэффициент запаса, надежность, система контроля.

The article presents analysis results of the interrelation of methods of quality control in regard to the construction materials (on the example of concrete) and reliability indicators of the built structures. Transition exclusively to non-destructive control methods in evaluating the concrete strength will lead to decreasing of the confidence coefficient of the test. This will affect the safety factor and failure probability of structures. Solving this problem necessitates creating at the facility of the extended precision control system including both destructive and non-destructive control methods.

Keywords: confidence coefficient, concrete quality control, concrete, reinforced concrete, safety factor, reliability, control system.

Совершенствование контроля качества ввиду постоянно возрастающих требований к эффективности, надежности и долговечности возводимых зданий и сооружений, безусловно, является одним из важнейших направлений развития строительной отрасли.

Современные представления об обеспечении надежности предполагают контроль строительной продукции на всех жизненных циклах: при

проектировании, на этапе возведения и последующей эксплуатации [1]. Влияние каждого этапа на формирование надежности строительной продукции сложно переоценить (см. рисунок).

Обеспечение надежности в процессе проектирования основано на вероятностном подходе в определении срока отказа, при учете случайного характера внешних параметров воздействия и внутренней структуры материала [2, 3].

Триада надежности строительных конструкций

В ходе строительства обеспечение надежности связано с качеством используемых материалов, соблюдением технологий, что обеспечивается контролем качества. В процессе эксплуатации поддержание надежности основывается на проведении осмотров и различных контрольных испытаний [4, 5].

На каждом этапе обеспечение требуемой надежности строительной продукции представляет собой сложный и многогранный процесс. Можно проектировать сверхнадежное здание, но некачественное исполнение и неправильная эксплуатация перечеркнут все достижения. Но также возможны случаи, когда при не самых удачных проектных решениях достигаются хорошие результаты за счет высокого качества возведения объекта и надлежащей эксплуатации. Примером может служить сравнение российских и европейских норм проектирования железобетонных конструкций, которое показывает более экономичные решения в российских нормах, но вероятность отказа таких конструкций значительно выше, что нивелируется большими затратами на эксплуатацию [4, 6].

Вопрос влияния на надежность системы контроля требует внимательного отношения, потому что решения напрямую отразятся на надежности возводимых конструкций, а значит на безопасности зданий и сооружений.

В настоящей работе проанализирована взаимосвязь методов контроля качества строительных материалов (на примере бетона) и показателей надежности возводимых конструкций.

Современные тенденции характеризуются постепенным вытеснением практики контроля стандартных испытаний и полным переходом на

неразрушающие методы. Большое разнообразие принципов, методов и средств неразрушающего контроля позволяет закрыть весь спектр решаемых на практике задач. Достоинств перехода на неразрушающий контроль достаточно много, из которых можно выделить следующие:

- повышение полноты контроля, переход на сплошной контроль конструкций в ответственных зданиях и сооружениях, позволяющие выявить бракованные конструкции и элементы, которые нельзя определить выборочным контролем разрушающими методами, что упрощает установление причин появления брака и устранение этих причин;
- сокращение времени испытаний, трудоемкости и затрат на контроль, а также повышение эффективности контроля, что принципиально важно с точки зрения строительства: в современном высокотехнологичном производстве себестоимость контроля, измерений и испытаний составляет до 10 % [7].

При этом сплошной неразрушающий контроль влияет на точность и достоверность получаемой измерительной информации. Отклонение результатов некоторых методов контроля от показаний стандартных разрушающих методов достигает 30–40 % [8, 9].

Необходимо проанализировать влияние на достоверность получаемой измерительной информации и надежность зданий и сооружений перехода на сплошной неразрушающий контроль при возведении бетонных и железобетонных конструкций.

При выполнении контроля исключительно неразрушающими методами снижается достоверность получаемой измерительной информации, что обусловлено появлением дополнительной погрешности при построении градуировочной кривой. Использование прочностных гарантированных показателей, соответствующих классу бетона, сопровождается уменьшением доверительной вероятности испытания до $P = 0,925$ исходя из требований точности построения градуировочной кривой в соответствии с ГОСТ 22690–2015 «Бетоны. Определение прочности механическими методами неразрушающего контроля». Отношение среднеквадратического отклонения к фактической прочности, полученной стандартным разрушающим мето-

дом (испытание керн и т. п.), должно составлять не более 0,15.

Безусловно, дополнительная погрешность неразрушающих методов влияет на результирующую достоверность контроля и, следовательно, на надежность возводимых конструкций с данным уровнем контроля. Увеличение среднеквадратического отклонения приводит к снижению достоверности получаемой информации, что увеличивает разброс результатов испытаний деформационно-механических свойств. Снижение доверительной вероятности при переходе на неразрушающие методы контроля необходимо учитывать в последующих расчетах.

Следует отметить, что использование только неразрушающих методов контроля позволит обеспечить доверительную вероятность $P = 0,92$, что недопустимо с точки зрения нормативных документов¹.

Количественная оценка влияния снижения доверительной вероятности методов контроля на надежность возводимых конструкций может быть выполнена путем анализа основного условия обеспечения неразрушимости и надежности конструкций [4–6], представленного следующим выражением:

$$\bar{R} - \bar{Q} \geq 0, \quad (1)$$

где $\bar{R}$ — обобщенная прочность конструкции; $\bar{Q}$ — обобщенная нагрузка.

При этом $\bar{R}$ и $\bar{Q}$ носят случайный характер и определяются многими факторами.

Характеристика безопасности, или индекс надежности β обеспечивается зависимостью

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

где S_R , S_Q — среднеквадратическое отклонение прочностных свойств материала и нагрузок.

Вероятность отказа P_f определяется согласно выражению

$$P_f = \frac{1}{2} - \Phi(\beta) = \frac{1}{2} - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^\beta \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx. \quad (3)$$

Плотность распределения вероятности отказа связана с индексом надежности и коэффициентом запаса (K_3):

$$P_f = \frac{1}{\sqrt{2\beta}} \frac{\beta^2 - 1}{\beta^3} \exp\left(-\frac{\beta^2}{2}\right); \quad (4)$$

$$\beta = \frac{K_3 - 1}{\sqrt{(v_Q^2 K_3 + v_R^2)}}; \quad (5)$$

$$K_3 = \frac{(2 + \beta^2 v_R^2) + \sqrt{(2 + \beta^2 v_R^2)^2 - 4(1 - \beta^2 v_Q^2)}}{2}, \quad (6)$$

$$\text{где } v_R = \frac{S_R}{\bar{R}}; v_Q = \frac{S_Q}{\bar{Q}}.$$

Рассмотрим влияние изменения достоверности получаемой измерительной информации и надежности на примере оценки класса бетона, который формирует значительную долю коэффициента запаса возводимых конструкций из бетона и железобетона. При данной оценке принято допущение, что количество испытаний достаточно значительное (ввиду большой вариативности механических свойств бетона) и подчиняется нормальному закону распределения.

Показатель прочности нормируется при определении класса бетона:

$$B = \bar{R}(1 - vt), \quad (7)$$

где B — класс бетона; $\bar{R}$ — средняя прочность бетона; v — коэффициент вариации; t — коэффициент Стьюдента.

Для стандартных и разрушающих методов распределение результатов испытаний должно соответствовать доверительной вероятности $P = 0,95$, так как максимально допустимый коэффициент вариаций бетона 13,5 %, а коэффициент Стьюдента при одностороннем диапазоне состав² $t = 1,64$ [6].

На примере использования бетона класса B25 ($\bar{R} = \frac{25}{1 - 1,64 \cdot 0,135} = 32,1$ МПа) можно проследить изменение показателей надежности.

Для серии из значимого количества образцов бетона класса B25 минимально допустимое значение нормируемой прочности с учетом максимальной величины коэффициента вариации ($v = 13,5$ %) должно быть не менее

$$R_{\min} = \bar{R} - 1,64 \cdot S = \bar{R} - 1,64 \cdot \bar{R} \cdot v = 32,1(1 - 1,64 \cdot 0,135) = 25 \text{ МПа}.$$

Таким образом, размах составляет 7,2 МПа. При этом следует учитывать, что отклонение в меньшую сторону опасно для конструкции и снижает уровень надежности.

Уменьшение величины прочности в допустимых пределах сопровождается снижением

¹ ГОСТ 27751–2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения.

² СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции нормы проектирования.

коэффициента запаса бетонных конструкций. Фактически, на примере бетона В25 расчетный предел прочности по первой группе предельных состояний равен³ 14,5 МПа. В нормальных условиях расчетный коэффициент запаса составит $K_3 = 32,1/14,5 = 2,3$ [10].

Переход на неразрушающие методы контроля сопровождается снижением доверительной вероятности, а коэффициент Стьюдента принимает значение $t = 1,46$. Следовательно, будет уменьшаться и величина требуемой средней прочности бетона заданного класса по результатам испытания. В этом случае средняя прочность должна быть не менее $\bar{R} = \frac{25}{1 - 1,46 \cdot 0,135} = 31,3$ МПа. Расчетный коэффициент запаса составит $K_3 = 31,3/14,5 = 2,15$.

Индекс безопасности также уменьшится, что приведет к повышению вероятности отказа, как показано в таблице.

Переход только на неразрушающие методы контроля снизит доверительную вероятность с $P = 0,995$ до $P = 0,925$ за счет дополнительной среднеквадратической погрешности при построении градуировочной кривой. Снижение достоверно получаемой измерительной информации в свою очередь скажется на качестве строительства и надежности возводимых конструкций зданий и сооружений, увеличивая вероятность отказа до 40 % за счет большей неопределенности при определении показателя класса прочности бетона. Поэтому при создании системы технического контроля на строительных объектах необходимо создавать комплексные решения, совмещающие стандартные разрушающие и неразрушающие методы контроля. Использование

³ СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции нормы проектирования.

Изменение показателей индекса безопасности и вероятности отказа при переходе на неразрушающие методы

Показатель	Индекс безопасности β	Вероятность отказа P_f
Стандартные испытания	2,551	0,005118984
Неразрушающие методы контроля	2,299	0,011911
Отклонение	0 %	43 %

комплексных решений позволит создать систему контроля повышенной точности и добиться повышения качества и надежности возводимых зданий и сооружений.

Библиографический список

1. Ефремов И. В., Рахимова Н. Н. Надежность технических систем и техногенный риск. Оренбург: ОГУ, 2013. 163 с.
2. Ржаницын А. Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность. М.: Стройиздат, 1978. 239 с.
3. Райзер В. Д. Теория надежности сооружений. М.: АСВ, 2010. 384 с.
4. Броев Д. Основы механики разрушения. М.: Высшая школа, 1980. 367 с.
5. Беленцов Ю. А., Ильинская Г. Г., Лесовик В. С. Повышение надежности конструкций управлением параметрами композиционного материала // Строительные материалы. 2011. № 3. С. 90–92.
6. Райзер В. Д. Теория надежности в строительном проектировании. М.: АСВ, 1998. 304 с.
7. Хофман Д. Техника измерений и обеспечение качества: справочная книга / пер. с нем.; под ред. Л. М. Закса, С. С. Кивилиса. М.: Энергоатомиздат, 1983. 472 с.
8. Улыбин А. В. О выборе методов контроля прочности бетона построенных сооружений // Инженерно-строительный журнал. 2011. № 4 (22). С. 10–15.
9. Улыбин А. В., Федотов С. Д., Тарасова Д. С. Определение прочности бетона при обследовании зданий и сооружений // Мир строительства и недвижимости. 2012. № 45. С. 2–5.
10. Беленцов Ю. А., Харитонов А. М. Определение коэффициента запаса при оценке качества кирпичных конструкций // Вестник гражданских инженеров. 2016. № 4 (57). С. 105–110.

References

1. Efremov I. V., Rakhimova N. N. *Nadezhnost' tekhnicheskikh sistem i tekhnogenyy risk* [Reliability of engineering systems and technology-related risk]. Orenburg, OSU Publ., 2013, 163 p.
2. Rzhantsyn A. R. *Teoriya rascheta stroitel'nykh konstruktсий na nadezhnost'* [The theory of building constructions calculation on reliability]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1978, 239 p.
3. Rayzer V. D. *Teoriya nadezhnosti sooruzheniy* [The theory of design reliability]. Moscow, ASV Publ., 2010, 384 p.

4. Broek D. *Osnovy mekhaniki razrusheniya* [Fundamentals of fracture mechanics]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1980, 367 p.
5. Belentsov Yu. A., Il'inskaya G. G., Lesovik V. S. *Povyshenie nadezhnosti konstruktsiy upravleniem parametrami kompozitsionnogo materiala* [Increasing the reliability of design by management of the composite material parameters]. *Stroitel'nye materialy – Building materials*, 2011, no. 3, pp. 90–92.
6. Rayzer V. D. *Teoriya nadezhnosti v stroitel'nom proektirovanii* [The theory of reliability in construction design]. Moscow, ASV Publ., 1998, 304 p.
7. Khofman D. *Tekhnika izmereniy i obespechenie kachestva. Spravochnaya kniga* [Technology of measurements and provision of quality. Reference book]. Ed. by Zaks L. M., Kivilis S. S. Moscow, Ehnegroatomizdat Publ., 1983, 472 p.
8. Ulybin A. V. *O vybore metodov kontrolya prochnosti betona postroennykh sooruzheniy* [About selecting of concrete durability control methods applied to constructed structures]. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal – Engineering-Construction Journal*, 2011, no. 4 (22), pp. 10–15.
9. Ulybin A. V., Fedotov S. D., Tarasova D. S. *Opredelenie prochnosti betona pri obsledovanii zdaniy i sooruzheniy* [Assessing the concrete durability at inspection of buildings and constructions]. *Mir stroitel'stva i nedvizhimosti – Construction and real estate world*, 2012, no. 45, pp. 2–5.
10. Belentsov Yu. A., Kharitonov A. M. *Opredelenie koefitsienta zapasa pri otsenke kachestva kirpichnykh konstruktsiy* [Assessing the factor of ignorance at the evaluation of the quality of masonry structures]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2016, no. 4 (57), pp. 105–110.