

УДК 691.32.001.4

[https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-4\(635\)-41-50](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-4(635)-41-50)

EDN: WAEVTL

**В.С. ФЕДОРОВ<sup>1</sup>, И.Г. ДЖАГАРЯН<sup>1</sup>, Н.М. СЕЛЮТИН<sup>2, 3</sup>**

<sup>1</sup> Российский университет транспорта РУТ (МИИТ), Ул. Образцова, д. 9, стр. 9, г. Москва, 127055, Российская Федерация

<sup>2</sup> Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона (НИИЖБ) им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», 2-я Институтская ул., д. 6, к. 5, г. Москва, 109428, Российская Федерация

<sup>3</sup> ООО «Предприятие Мастер Бетон», ул. Саратовская, д. 31, г. Москва, 109518, Российская Федерация

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВЫНОСЛИВОСТИ ЛЁГКОГО ВЫСОКОПРОЧНОГО БЕТОНА

## Аннотация

**Введение.** Лёгкие высокопрочные бетоны рассматриваются как перспективный материал для транспортных и инфраструктурных сооружений, однако данные об их сопротивлении многократно повторяющимся нагрузкам остаются ограниченными.

**Цель.** Экспериментально оценить выносливость лёгкого высокопрочного бетона и сопоставить её с выносливостью двух составов тяжёлого бетона, а также с нормативными уровнями нагружения, ранее определёнными по СП 35.13330.2011.

**Материалы и методы.** Исследовали лёгкий высокопрочный бетон, тяжёлый высокопрочный бетон и тяжёлый бетон средней прочности. Циклическим испытаниям подвергали призмы размером 100 × 100 × 400 мм при частоте 5 Гц. Испытания выполняли на основе положений ГОСТ 24545–2021 с последовательным снижением относительного уровня максимальных напряжений  $\eta$ . Минимальная нагрузка составляла 10 тс, вследствие чего коэффициент асимметрии цикла изменялся в зависимости от уровня нагружения. За базу испытаний принимали  $2 \times 10^6$  циклов.

**Выводы.** Экспериментально установлено, что в принятых режимах циклического нагружения исследованный лёгкий высокопрочный бетон обладает более высокой выносливостью по сравнению с исследованными тяжёлыми бетонами. База испытаний  $2 \times 10^6$  циклов была достигнута для лёгкого высокопрочного бетона при относительном уровне нагружения  $\eta = 0,70$ , тогда как для тяжёлого высокопрочного бетона и тяжёлого бетона средней прочности соответствующие значения составили 0,50 и 0,40. Полученные результаты подтверждают перспективность применения лёгкого высокопрочного бетона в конструкциях транспортных сооружений, воспринимающих многократно повторяющиеся нагрузки, и указывают на необходимость учитывать вид бетона и его прочностные характеристики при оценке выносливости.

**Ключевые слова:** выносливость бетона, усталостная прочность, лёгкий высокопрочный бетон, транспорт-

ные сооружения, железобетонные конструкции, предел выносливости, нормативные уровни нагружения, циклические испытания

**Для цитирования:** Федоров В.С., Джагарян И.Г., Селютин Н.М. Экспериментальная оценка выносливости лёгкого высокопрочного бетона // *Бетон и железобетон*. 2026. № 4(635). С. 41–50. [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-4\(635\)-41-50](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-4(635)-41-50) EDN: WAEVTL

## Вклад авторов

Федоров В.С. – научное руководство исследованием, интерпретация и анализ полученных результатов

Джагарян И.Г. – разработка программы и руководство экспериментом, участие в изготовлении экспериментальных образцов, проведение экспериментальных исследований, обработка и анализ полученных результатов.

Селютин Н.М. – участие в изготовлении экспериментальных образцов, выполнение экспериментальных работ и обработка полученных результатов.

## Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 27.07.2026

Поступила после рецензирования 21.08.2026

Принята к публикации 27.08.2026

V.S. FEDOROV<sup>1</sup>, I.G. DZHAGARYAN<sup>1</sup>, N.M. SELYUTIN<sup>2, 3</sup>

<sup>1</sup> Russian University of Transport RUT (MIIT), Obraztsova St., Building 9, Moscow, 127055, Russian Federation

<sup>2</sup> Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev,  
JSC Research Center of Construction, 2nd Institutskaya str., 6, bld. 1, Moscow, 109428, Russian Federation

<sup>3</sup> LLC "Master Concrete Enterprise", Saratovskaya str., 31, Moscow, 109518, Russian Federation

# EXPERIMENTAL EVALUATION OF THE ENDURANCE OF LIGHTWEIGHT HIGH-STRENGTH CONCRETE

## Abstract

**Introduction.** Lightweight high-strength concrete is considered a promising material for transport and infrastructure structures; however, data regarding its resistance to repeated loading remain limited.

**Aim.** To experimentally evaluate the fatigue strength of lightweight high-strength concrete and compare it with that of two normal-weight concrete mixes, as well as with the standard loading levels previously established in the SP 35.13330.2011 code of practice.

**Materials and methods.** The study investigated lightweight high-strength concrete, normal-weight high-strength concrete, and normal-weight concrete of medium strength. Cyclic tests were conducted on 100 × 100 × 400 mm prisms at a frequency of 5 Hz. Testing followed the provisions of State Standard 24545–2021, involving a stepwise reduction of the relative maximum stress level ( $\eta$ ). The minimum load was set at 10 tf, causing the cycle asymmetry coefficient to vary depending on the loading level. A test duration of  $2 \times 10^6$  cycles was adopted as the baseline.

**Conclusions.** Experimental results demonstrate that, under the applied cyclic loading regimes, the lightweight high-strength concrete exhibited superior fatigue strength compared to the normal-weight concretes tested. The lightweight high-strength concrete reached the  $2 \times 10^6$ -cycle baseline at a relative loading level of  $\eta = 0.70$ , whereas the corresponding values for normal-weight high-strength concrete and normal-weight concrete of medium strength were 0.50 and 0.40, respectively. These findings confirm the potential of lightweight high-strength concrete for use in transport structures subject to repeated loading and highlight the necessity of considering the concrete type and its strength characteristics when assessing fatigue strength.

**Keywords:** concrete fatigue strength, fatigue strength, lightweight high-strength concrete, transport structures; reinforced concrete structures, fatigue limit, standard loading levels, cyclic testing

**For citation:** Fedorov V.S., Dzhagaryan I.G., Selyutin N.M. Experimental Evaluation of the Fatigue of Lightweight High-Strength Concrete. *Concrete and Reinforced Concrete*, 2026, no. 4(635), pp. 41–50. (In Russian) [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-4\(635\)-41-50](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-4(635)-41-50). EDN: WAEVTL

## Authors contributions statement

V.S. Fedorov – scientific supervision of the research, interpretation and analysis of the obtained results.

I.G. Dzhagaryan – development of the program and supervision of the experiment, participation in the fabrication of experimental samples, conduct of experimental research, and processing and analysis of the obtained results.

N.M. Selyutin – participation in the fabrication of experimental prototypes, performance of experimental work, and processing of the obtained results.

## Funding

This study received no sponsorship.

## Conflict of interest

The authors declare no conflicts of interest.

Received 27.07.2026

Revised 21.08.2026

Accepted 27.08.2026

### Введение

Строительные конструкции в процессе эксплуатации могут подвергаться многократно повторяющимся воздействиям. Характер и значимость циклического нагружения зависят от назначения конструкции, соотношения постоянной и переменной составляющих нагрузки, а также интенсивности её повторения.

Для большинства конструкций гражданских зданий определяющее влияние оказывают постоянные и длительно действующие нагрузки, тогда как переменная составляющая напряжённого состояния обычно имеет ограниченное значение. В то же время для пролётных строений мостов, подкрановых балок, перекрытий промышленных зданий с вибрационно-активным оборудованием и других элементов транспортных и промышленных сооружений многократно повторяющиеся нагрузки могут существенно влиять на несущую способность и долговечность.

При циклическом нагружении в бетоне происходит постепенное накопление повреждений, сопровождаемое развитием микротрещин, изменением деформационных характеристик и снижением сопротивления разрушению [1–4]. Поэтому при расчёте конструкций, воспринимающих многократно повторяющиеся нагрузки, нормативными документами предусматриваются специальные коэффициенты условий работы и расчётные положения, учитывающие снижение прочности бетона при циклическом воздействии.

Перспективным материалом для транспортных и инфраструктурных сооружений является лёгкий высокопрочный бетон (ЛВБ). Его применение позволяет уменьшить собственный вес конструкций и снизить усилия от постоянных нагрузок при сохранении высоких прочностных характеристик. Вместе с тем экспериментальные данные о сопротивлении ЛВБ многократно повторяющимся нагрузкам остаются ограниченными. Недостаточно изучено и соответствие его

фактической выносливости расчётным предпосылкам, применяемым для традиционных тяжёлых бетонов.

Используемые в нормативных расчётах коэффициенты условий работы и расчётные сопротивления ограничивают допустимый уровень напряжений в бетоне при циклическом нагружении. Однако соответствие этих нормативных ограничений фактической выносливости бетонов различных составов, включая ЛВБ, требует экспериментального подтверждения.

Целью настоящей работы является экспериментальная оценка выносливости лёгкого высокопрочного бетона и сопоставление полученных результатов с показателями тяжёлого высокопрочного бетона и тяжёлого бетона средней прочности.

### Материалы и методика испытаний

Для проведения экспериментального исследования были изготовлены бетонные образцы трёх составов. Для каждого состава изготовили по 18 призм размером 100 × 100 × 400 мм и по 6 образцов-кубов размером 100 × 100 × 100 мм. Призматические образцы использовали для проведения циклических испытаний на выносливость, а также для определения призмочной прочности и начального модуля упругости бетона. Образцы-кубы предназначались для определения прочности бетона при сжатии в возрасте 28 суток.

Условные обозначения исследуемых составов, применяемые компоненты и их содержание в расчёте на 1 м<sup>3</sup> бетонной смеси приведены в таблице 1. Составы бетонов приняты по данным работы [6]. Основные характеристики бетонных смесей, а также показатели прочности и деформативности бетона в возрасте 28 суток представлены в таблице 2.

Хранение образцов осуществлялось в камере нормального твердения при температуре 23 °С и влажности 95 %.

Таблица 1

#### Составы бетонов

Table 1

#### Concrete compositions

| № п.п. | Условное название смеси | Состав бетона, кг на 1 м <sup>3</sup> |                 |                 |                     |                           |                    |                       |      |
|--------|-------------------------|---------------------------------------|-----------------|-----------------|---------------------|---------------------------|--------------------|-----------------------|------|
|        |                         | <sup>6</sup> Цемент                   | <sup>4</sup> МБ | <sup>5</sup> МП | <sup>8</sup> Щебень | <sup>9</sup> Гравий кер., | <sup>7</sup> Песок | <sup>10</sup> Пласт., | Вода |
| 1      | <sup>1</sup> ЛВБ        | 510                                   | 102             | —               | 224                 | 245                       | 724                | 7,34                  | 165  |
| 2      | <sup>2</sup> ТБР        | 346                                   | 50              | 149             | 855                 | —                         | 795                | 8,7                   | 184  |
| 3      | <sup>3</sup> ТБЕ        | 305                                   | —               | 153             | 855                 | —                         | 855                | 9,7                   | 203  |

Примечание:

<sup>1</sup> ЛВБ – лёгкий высокопрочный бетон;

<sup>2</sup> ТБР – тяжёлый высокопрочный бетон;

<sup>3</sup> ТБЕ – тяжёлый бетон средней прочности;

<sup>4</sup> МБ – модификатор бетона МБ2–50С пр-ва ООО «ШЕНК»;

<sup>5</sup> Минеральный порошок «МП-1», не активированный, пр-ва ООО «ДСЗ Терекс Групп», г. Калуга;

<sup>6</sup> Цемент – Новоросцемент ЦЕМ-I 42,5 ЖИ «Пролетарий» НГЦ-24,8 %;

<sup>7</sup> Песок – Богаевский ГОК Мкр – 2,33;

<sup>8</sup> Щебень – фр. 5–10 мм, гранит, карьер «Микашевичи», Республика Беларусь, М1400;

<sup>9</sup> Гравий керамзитовый фракции 5–10 мм, П50, М400 Алексинский;

<sup>10</sup> Пластификатор – Sika VC 5200 р-р 35 %.

Таблица 2

## Свойства бетонной смеси и полученных образцов

Table 2

## Properties of concrete mixture and obtained samples

| № п.п. | Условное название смеси | Характеристики бетонной смеси и образцов |                                                               |                                   |                                     |                                   |
|--------|-------------------------|------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
|        |                         | <sup>1</sup> РК, см                      | <sup>2</sup> ρ <sub>см</sub> , $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ | <sup>3</sup> R <sub>m</sub> , МПа | <sup>4</sup> E <sub>0,3</sub> , ГПа | <sup>5</sup> R <sub>b</sub> , МПа |
| 1      | ЛВБ                     | 52                                       | 1977                                                          | 62,2                              | 32,3                                | 61,8                              |
| 2      | ТБР                     | 55                                       | 2388                                                          | 75,4                              | 36,8                                | 73,5                              |
| 3      | ТБЕ                     | 50                                       | 2380                                                          | 53,7                              | 28,4                                | 50,8                              |

Примечание:

<sup>1</sup>РК – расплыв конуса;

<sup>2</sup>ρ<sub>см</sub> – плотность смеси;

<sup>3</sup>R<sub>m</sub> – кубиковая прочность;

<sup>4</sup>E<sub>0,3</sub> – начальный модуль упругости;

<sup>5</sup>R<sub>b</sub> – призмная прочность.

Испытания на выносливость проводились на основе положений ГОСТ 24545–2021 «Бетоны. Методы испытаний на выносливость» [7], в соответствии с которым образцы призмы подвергались циклической нагрузке с разным уровнем нагружения на испытательной машине ЦДМ Пу-200 (рис. 1), позволяющей обеспечить статическую и динамическую (циклическую) нагрузку частотой 5 Гц, в интервале нагружения от 10 тс до 200 тс. Испытательная машина оснащена счетчиком циклов нагружения, позволяющим производить подсчет количества пройденного количества циклов.

База испытаний при определении выносливости бетона была принята в соответствии с требованием

ГОСТ 24545–2021, которая составляет  $N = 2 \times 10^6$  циклов.

Испытания проводились при последовательном снижении уровня нагружения η, с шагом 0,1 начиная с η = 0,9. На каждом уровне нагружения испытаниям подвергались три образца.

Снижение уровня нагружения продолжалось до тех пор, пока не определялось значение η, при котором все три образца серии выдерживали базу испытаний  $N = 2 \times 10^6$  циклов без разрушения, что соответствует критерию выносливости по ГОСТ 24545–2021.



Рис. 1. Общий вид испытательной машины ЦДМ Пу-200

а) Нагружающее устройство; б) Блок регулировки верхней нагрузки; в) Блок регулировки нижней нагрузки; г) Шкала силоизмерителя

Fig. 1. General view of the TsDM Pu-200 testing machine

a) Loading device; б) Upper load adjustment unit; в) Lower load adjustment unit; г) Force meter scale

Коэффициент асимметрии  $\rho_6$  определялся исходя из технических ограничений испытательной машины, связанных с минимально допустимым уровнем прикладываемого усилия. Нижний предел нагрузки, который могла стабильно воспроизводить испытательная машина, составлял 10 тс (98,1 кН). В связи с этим для всех серий испытаний значение  $\sigma_{min}$  принималось равным усилию 10 тс, а коэффициент асимметрии  $\rho_6$  рассчитывался индивидуально для каждого уровня нагружения  $\eta$  в зависимости от соответствующего значения  $\sigma_{max}$ .

Минимальные и максимальные напряжения цикла определялись по формуле (1).

$$\sigma_{min} = \frac{P_{min}}{F}; \sigma_{max} = \frac{P_{max}}{F}, \quad (1)$$

где:  $F$  – площадь опорных поверхностей образцов, мм;

$\sigma_{min}$ ;  $\sigma_{max}$  – минимальное и максимальное напряжение цикла, МПа;

$P_{min}$ ;  $P_{max}$  – минимальная и максимальная нагрузка, кН определяемые по формулам 2, 3.

$$P_{min} = P_p \times \rho_6, \quad (2)$$

$$P_{max} = P_p \times \eta, \quad (3)$$

где:  $P_p$  – разрушающая нагрузка, кН при определении призменной прочности  $R_b$ .

Полученные экспериментальные значения числа циклов до разрушения позволили определить фактический предел выносливости исследованных составов бетона и сопоставить его с нормативными уровнями нагружения, рассчитанными по СП 35.13330.2011 и обоснованными в предыдущем исследовании автора [5].

### Результаты испытаний

Результаты циклических испытаний, включающие наименование составов и уровни нагружения составов, выдержавшие  $N = 2 \times 10^6$  циклов, представлены в таблице 3.

Таблица 3

Наименование составов и уровни нагружения

Table 3

Name of compositions and loading levels

| № п.п. | Наим. состава | $R_b$ , МПа | Уровень нагружения, $\eta$ | Козф., асимметрии циклов, $\rho_6$ | Среднее количество циклов $N$ до разрушения, шт. |
|--------|---------------|-------------|----------------------------|------------------------------------|--------------------------------------------------|
| 1.     | ЛВБ           | 61,8        | 0,9                        | 0,18                               | 139                                              |
|        |               |             | 0,8                        | 0,20                               | 3 239                                            |
|        |               |             | 0,75                       | 0,21                               | 26 200                                           |
|        |               |             | 0,7                        | 0,23                               | >2 000 000                                       |
| 2.     | ТБР           | 73,5        | 0,9                        | 0,15                               | 95                                               |
|        |               |             | 0,8                        | 0,17                               | 1 500                                            |
|        |               |             | 0,7                        | 0,19                               | 67 616                                           |
|        |               |             | 0,6                        | 0,22                               | 1 531 187                                        |
|        |               |             | 0,5                        | 0,27                               | >2 000 000                                       |
| 3.     | ТБЕ           | 50,8        | 0,7                        | 0,28                               | 151                                              |
|        |               |             | 0,6                        | 0,32                               | 7 680                                            |
|        |               |             | 0,5                        | 0,39                               | 7 910                                            |
|        |               |             | 0,4                        | 0,48                               | >2 000 000                                       |

Для описания зависимости уровня нагружения  $\eta$  от числа циклов нагружения  $N$  использована линейная регрессионная модель в логарифмических координатах, представляющая собой аппроксимацию усталостной кривой бетона вида [7]:

$$\eta = A + B \times \lg \bar{N}, \quad (4)$$

где:  $A$  – свободный член линейной регрессионной зависимости;

$B$  – коэффициент наклона регрессионной зависимости.

Коэффициенты  $A$  и  $B$  определялись методом наименьших квадратов. Свободный член  $A$  вычислялся по выражению:

$$A = \bar{y} - B \times \bar{x}, \quad (5)$$

где  $\bar{x}$  и  $\bar{y}$  – среднее значение циклов  $\lg \bar{N}$  и среднее значение уровня нагружения  $\eta$ .

Коэффициент наклона  $B$  определялся по формуле:

$$B = \frac{m_{xy}}{S_x^2}, \quad (6)$$

где  $m_{xy}$  – корреляционный момент, определяемый по формуле:

$$m_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{n-1}, \quad (7)$$

где:  $S_x, S_y$  – дисперсия циклов  $lg\bar{N}$  и уровня нагружения, определяемые по формулам:

$$S_x^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}, \quad (8)$$

$$S_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}. \quad (9)$$

Для оценки достоверности полученной регрессионной зависимости определялись доверительные границы коэффициента  $B$  при уровне надежности  $\tau$ , равной 0,95, по формуле:

$$B_{\tau} = t \frac{S_y \sqrt{1-r^2}}{S_x \sqrt{n-2}} \pm B, \quad (10)$$

где  $t$  – коэффициент Стьюдента при числе степеней свободы  $K = n - 2$  и надежности  $\tau = 0,95$ ;

$r$  – коэффициент корреляции, определяемый по формуле:

$$r = m_{xy} / (S_x \times S_y), \quad (11)$$

$S_x, S_y$  – среднеквадратические отклонения величин  $x$  и  $y$ .

Вычисляя значения доверительных границ по формуле (4), получены: уравнение линии верхней границы доверительного интервала в виде:

$$\eta = A - B_{\tau+} \times lg\bar{N} \quad (12)$$

и уравнение линии нижней границы доверительного интервала:

$$\eta = A - B_{\tau-} \times lg\bar{N}. \quad (13)$$

В результате проведенных расчетов построены линии регрессии для каждого состава с верхним и нижним доверительным интервалом, представленные на рис. 2–4. На рис. 5 показаны линии регрессии всех составов.

Параметры регрессионных зависимостей, полученные методом наименьших квадратов, приведены в таблице 4.

Полученные регрессионные зависимости позволяют не только описать характер изменения уровня нагружения бетона при увеличении числа циклов, но и количественно сопоставить усталостное поведение исследуемых составов. При этом коэффициент наклона  $B$  характеризует интенсивность снижения допустимого уровня нагружения с ростом числа циклов, а свободный член  $A$  определяет исходное положение регрессионной зависимости в координатах  $\eta - lg\bar{N}$ . Построение доверительных границ даёт возможность оценить надёжность аппроксимации экспериментальных данных и диапазон возможного отклонения фактических значений от расчётной линии регрессии.

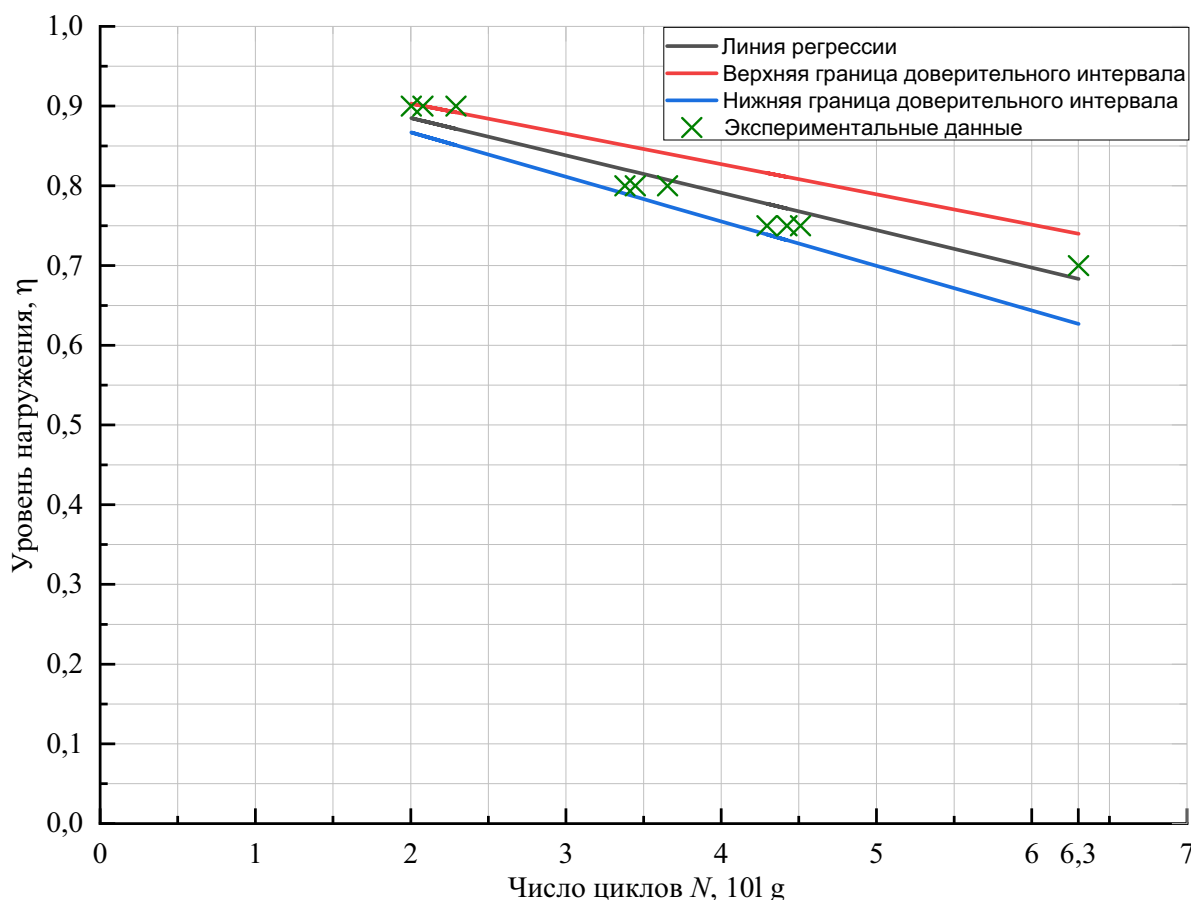


Рис. 2. Линия регрессии ЛВБ  
Fig. 2. Regression line of the LWB

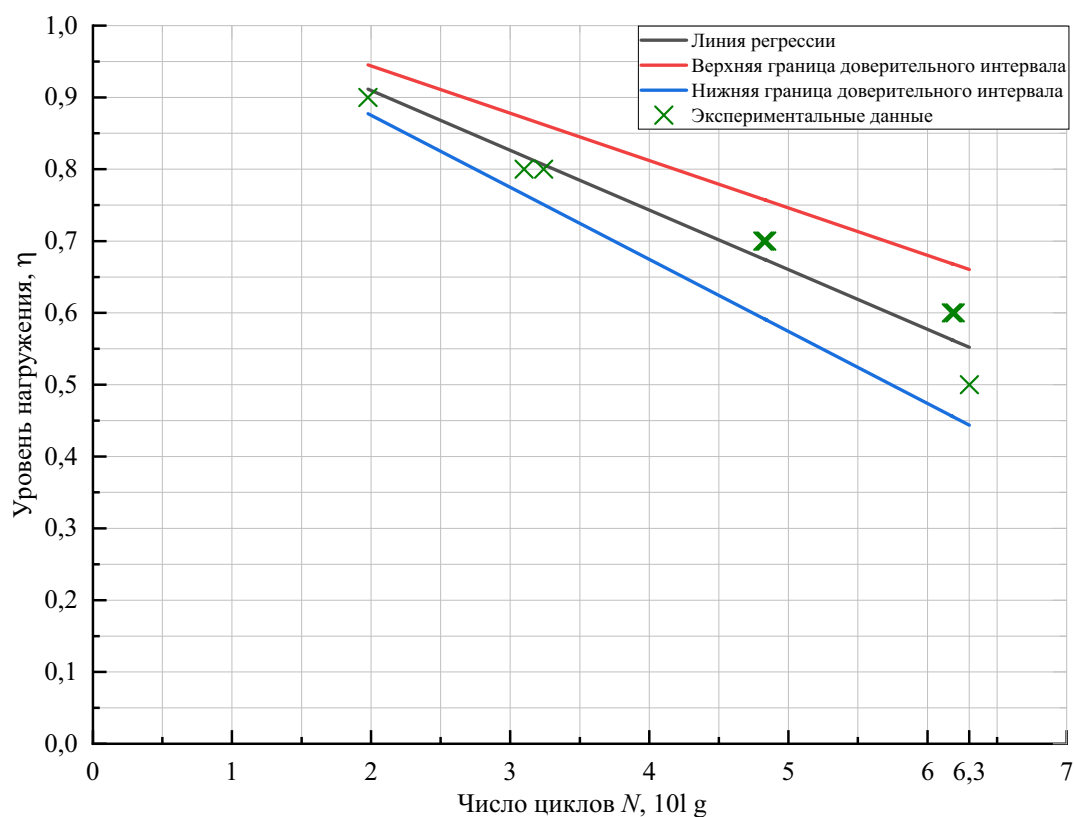


Рис. 3. Линия регрессии ТБР  
Fig. 3. Regression line of the TBR

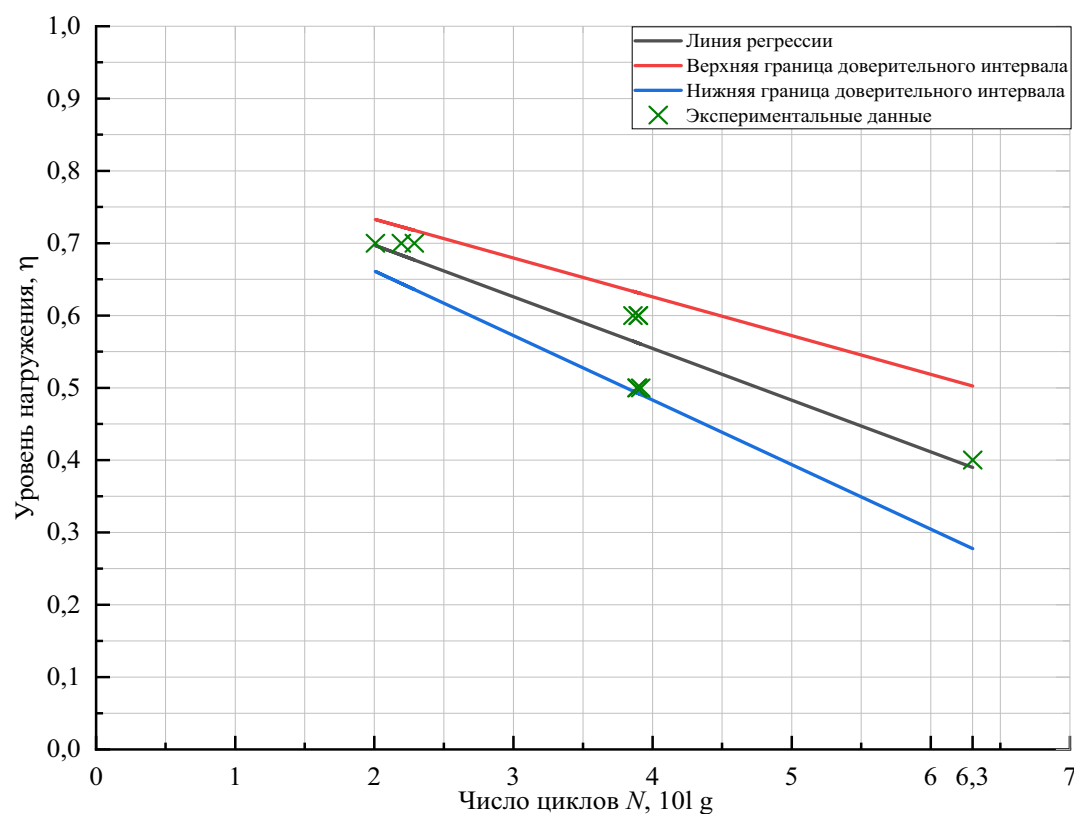


Рис. 4. Линия регрессии ТБЕ  
Fig. 4. Regression line of the TBE

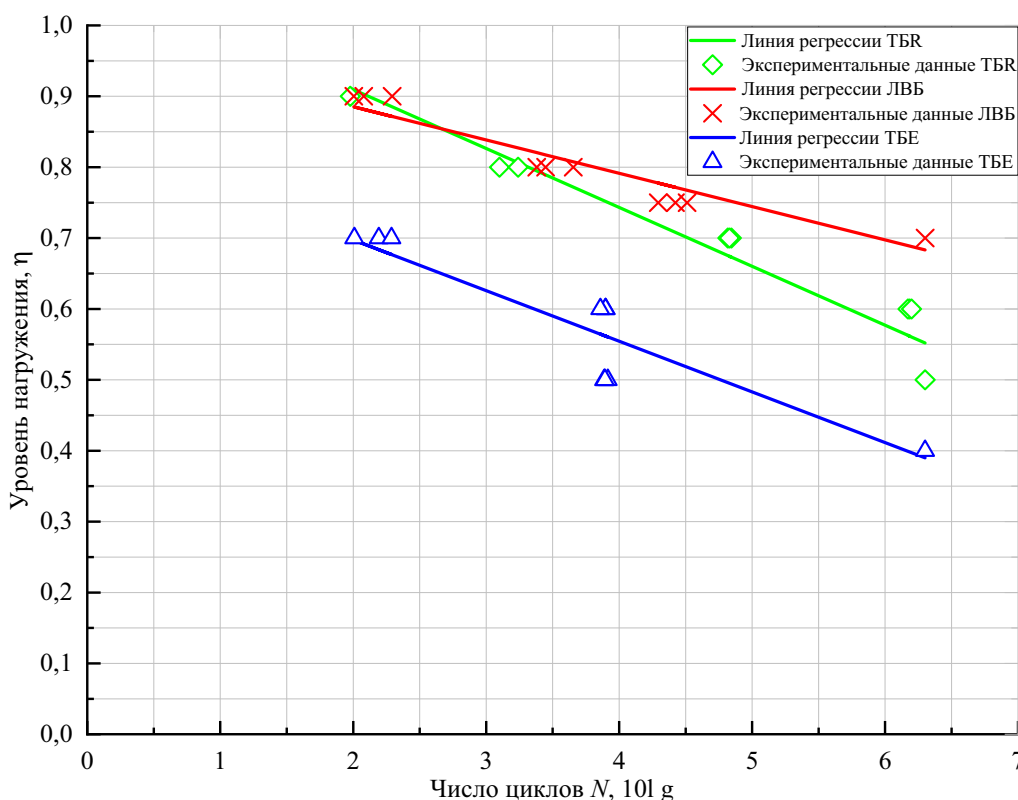


Рис. 5. Линии регрессии всех составов  
Fig. 5. Regression lines of all compositions

Таблица 4

Параметры регрессионных зависимостей  $\eta = A + B \times \lg \bar{N}$

Table 4

Parameters of regression dependencies  $\eta = A + B \times \lg \bar{N}$

| Состав | Свободный член<br>регрессионного уравнения, A | Коэффициент наклона<br>регрессионной зависимости, B | Коэффициент<br>детерминации, R <sup>2</sup> |
|--------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| ЛВБ    | 0,979                                         | -0,047                                              | 0,931                                       |
| ТБР    | 1,076                                         | -0,083                                              | 0,921                                       |
| ТБЕ    | 0,840                                         | -0,072                                              | 0,888                                       |

#### Обсуждение результатов

Анализ полученных регрессионных зависимостей показал, что для всех исследуемых составов бетона наблюдается закономерное снижение уровня нагружения  $\eta$  с увеличением числа циклов нагружения  $N$ . Такой характер изменения соответствует общим представлениям об усталостном разрушении бетона, при котором рост числа циклов сопровождается постепенным снижением допустимого уровня напряжений.

Вместе с тем сопоставление параметров регрессионных уравнений (таблица 4) позволяет выявить существенные различия в характере работы исследуемых составов при циклическом нагружении. Наименьшее по модулю значение коэффициента наклона  $B$  получено для лёгкого высокопрочного бетона (ЛВБ), что свидетельствует о более плавном снижении уровня нагружения при увеличении числа циклов и, соответственно, о более высокой устойчивости данного материала к накоплению усталостных повреждений. Для тяжёлых

бетонов (ТБР и ТБЕ) значения коэффициента наклона имеют большую абсолютную величину, что указывает на более интенсивное снижение допустимого уровня напряжений при росте числа циклов. Наибольшее по модулю значение коэффициента  $B$  характерно для состава ТБР, тогда как для состава ТБЕ зависимость занимает промежуточное положение, однако именно для него был установлен наименьший фактический предел выносливости  $\eta = 0,4$ .

Высокие значения коэффициента детерминации  $R^2$  для всех исследуемых составов подтверждают хорошую согласованность экспериментальных данных с принятой линейной моделью в логарифмических координатах и позволяют использовать полученные регрессионные зависимости для сравнительного анализа выносливости бетонов. При этом общий график регрессионных зависимостей (рис. 5) наглядно показывает, что при одинаковом числе циклов нагружения лёгкий высокопрочный бетон сохраняет более высо-

кий допустимый уровень напряжений по сравнению с тяжёлыми бетонами. Иными словами, при переходе к области больших чисел циклов именно ЛВБ демонстрирует наиболее устойчивое поведение.

Полученные экспериментальные результаты представляют особый интерес при их сопоставлении с нормативными уровнями нагружения, ранее определёнными [5] по требованиям СП 35.13330.2011. В указанной работе было показано, что расчётные значения сопротивления бетона при многократно повторяющихся нагрузках соответствуют диапазону  $\eta = 0,45\text{--}0,53$  по отношению к нормативной прочности бетона при осевом сжатии. Тем самым СП 35 фактически задаёт допустимый эксплуатационный уровень напряжений для бетонных и железобетонных конструкций транспортного назначения.

Экспериментальные данные, полученные в настоящей работе, показывают, что соответствие нормативных уровней фактической выносливости существенно зависит от состава бетона. Так, для состава ТБЕ установлен предел выносливости на уровне  $\eta \approx 0,4$ , то есть ниже минимального нормативного значения, определённого по СП 35. Это означает, что для бетонов данного типа нормативно допускаемый уровень нагружения может оказываться выше фактического предела выносливости, что указывает на потенциальную недоадекватность принятого расчётного подхода.

Следует отметить, что в ходе испытаний коэффициент асимметрии цикла  $\rho_0$  для состава ТБЕ изменялся в диапазоне от 0,28 до 0,48 вследствие технических особенностей испытательной машины. Поскольку уменьшение коэффициента асимметрии приводит к возрастанию амплитуды циклических напряжений и, как следствие, ускоряет накопление усталостных повреждений [8, 9], полученное значение  $\eta = 0,4$  для состава ТБЕ следует рассматривать как оценку, полученную при относительно благоприятных условиях нагружения. При фиксированных более низких значениях  $\rho_0$  фактический предел выносливости данного состава может оказаться ещё ниже.

Иная картина наблюдается для лёгкого высокопрочного бетона. В рамках проведённых испытаний ЛВБ продемонстрировал наибольшую усталостную выносливость среди всех исследованных составов, причём установленный предел выносливости составил  $\eta = 0,7$ . Это значение существенно превышает нормативный диапазон уровней нагружения, ранее определённый по СП 35, и свидетельствует о том, что для ЛВБ действующие нормативные предпосылки оказываются, напротив, чрезмерно консервативными.

Таким образом, результаты экспериментальных исследований показывают, что единый нормативный подход, основанный на косвенном снижении расчётных сопротивлений, не обеспечивает одинаково корректную оценку выносливости для различных составов бетона. Для бетонов средней прочности нормативные уровни нагружения могут приближаться к фактическому пределу выносливости или даже превышать его, тогда как для лёгких высокопрочных бетонов они оказываются существенно ниже экспериментально установленного уровня. Это указывает на необходимость уточнения существующих расчётных подходов и под-

тверждает целесообразность дифференцированной оценки выносливости бетона с учётом его состава и фактических усталостных характеристик.

Особую значимость данный вывод приобретает применительно к лёгким высокопрочным бетонам, для которых объём экспериментальных данных по выносливости в настоящее время остаётся ограниченным. Отсутствие в действующих нормативных документах специальных положений, учитывающих особенности их поведения при многократно повторяющихся нагрузках, затрудняет обоснованное использование ЛВБ в конструкциях, работающих в условиях интенсивного циклического нагружения. В этой связи полученные результаты могут рассматриваться как основание для дальнейшего развития экспериментально-аналитических исследований и последующего уточнения нормативных требований.

### Выводы

1. Для всех исследованных составов бетона установлено снижение относительного уровня нагружения  $\eta$  с увеличением числа циклов до разрушения, что соответствует закономерностям усталостного поведения бетона.

2. При базе испытаний  $N = 2 \times 10^6$  циклов лёгкий высокопрочный бетон выдержал уровень нагружения  $\eta = 0,70$ , тяжёлый высокопрочный бетон –  $\eta = 0,50$ , тяжёлый бетон средней прочности –  $\eta = 0,40$ .

3. В пределах реализованной программы испытаний лёгкий высокопрочный бетон продемонстрировал наиболее высокую циклическую стойкость среди исследованных составов. Полученная для него регрессионная зависимость характеризуется наименьшим по абсолютной величине коэффициентом наклона.

4. Установленные значения характеризуют конкретные исследованные составы и принятые режимы нагружения. Изменение коэффициента асимметрии цикла в ходе испытаний ограничивает возможность однозначно связать выявленные различия только с видом и составом бетона.

5. Полученные результаты подтверждают перспективность дальнейшего исследования лёгких высокопрочных бетонов для применения в конструкциях, воспринимающих многократно повторяющиеся нагрузки. Для уточнения закономерностей их усталостного поведения необходимы дополнительные испытания сравниваемых составов при одинаковом коэффициенте асимметрии цикла.

### Список литературы

1. Мирсаяпов И.Т., Тамразян А.Г. К расчету железобетонных конструкций на выносливость // *Промышленное и гражданское строительство*. 2016. № 11. С. 19–23. EDN XACMVB.
2. Дмитренко Е.А., Почтар Н.В. Основные типы дефектов и повреждений железобетонных конструкций транспортных сооружений, причины их возникновения // *Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры*. 2016. № 3(119). С. 134–138. EDN YQPLKX.
3. Семина Ю.А. Прочность железобетонных балочных элементов при воздействии циклической зна-

- копеременной и малоцикловой знакопостоянной нагрузок // *Вестник МГСУ*. 2015. № 9. С. 36–50.
4. Мигунов В.Н. Экспериментально-теоретическое исследование коррозии и долговечности железобетонных конструкций с трещинами. Часть 1. Пенза: Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, 2013. 331 с. ISBN 978-5-9282-0933-9. EDN UFNWSL.
  5. Джагарян И.Г., Федоров В.С. Нормативная оценка выносливости бетона транспортных сооружений // *Строительство и реконструкция*. 2026;(2):34–41. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2026-124-2-34-41>.
  6. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Карпенко Н.И. [и др.] Влияние вида заполнителя на физико-технические характеристики высокопрочных самоуплотняющихся цементных систем // *Бетон и железобетон*. 2025. № 2(627). С. 27–42. DOI 10.37538/0005-9889-2025-2(627)-27-42. EDN TSNYUO.
  7. ГОСТ 24545–2021. Бетоны. Методы испытаний на выносливость [Электронный ресурс]. Введ. 2022–03–01. М.: Стандартинформ, 2022. 24 с. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200182179> (дата обращения: 22.10.2025).
  8. Шабанов А.П., Шакиртов М.М. О влиянии коэффициента асимметрии цикла внешней нагрузки на характеристики цикла нагружения материала, расположенного в окрестности вершины трещиновидного дефекта // *Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения*. 2016. № 4(39). С. 12–18. EDN WXBZHV.
  9. Мирсаяпов И.Т., Гарифуллин Д.Р. Инженерные методы расчета деформаций, модуля упругости и предела выносливости бетона при циклическом нагружении // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. 2020. № 3(53). С. 15–26. EDN: ONLRMU.
  10. Construction and reconstruction, 2026; (2): 34–41. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2026-124-2-34-41>.
  6. Kapriyev S.S., Sheinfeld A.V., Karpenko N.I. [et al.]. Influence of the filler type on the physical and technical characteristics of high-strength self-compacting cement systems. *Concrete and reinforced concrete*, 2025, no. 2 (627), pp. 27–42. DOI 10.37538/0005-9889-2025-2(627)-27-42. EDN TSNYUO.
  7. State Standard 24545–2021. Concretes. Fatigue test methods [Electronic resource]. Introduction. 2022–03–01. M.: Standartinform, 2022. 24 p. Access mode: <https://docs.cntd.ru/document/1200182179> (date of access: 10/22/2025).
  8. Shabanov A.P., Shakirtov M.M. On the influence of the asymmetry coefficient of the external load cycle on the characteristics of the loading cycle of a material located in the vicinity of the tip of a crack-like defect. *Bulletin of the Siberian State Transport University*, 2016, no. 4 (39), pp. 12–18. EDN WXBZHV.
  9. Mirsayapov I.T., Garifullin D.R. Engineering methods for calculating deformations, elastic modulus and fatigue limit of concrete under cyclic loading. *Bulletin of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering*, 2020, no. 3 (53), pp. 15–26. EDN ONLRMU.

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

**Федоров Виктор Сергеевич**, д-р техн. наук, заведующий кафедрой «Строительные конструкции, здания и сооружения», Российский университет транспорта РУТ (МИИТ), ул. Образцова, д. 9, стр. 9, г. Москва, 127055, Российская Федерация, e-mail: fvs\_skzs@mail.ru

**Viktor S. Fedorov**, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Building Structures, Buildings and Facilities, Russian University of Transport RUT (MIIT), Obraztsova St., 9, Bldg. 9, Moscow, 127055, Russian Federation, e-mail: fvs\_skzs@mail.ru

**Джагарян Игорь Григорьевич\***, старший преподаватель кафедры «Строительные материалы и технологии», Российский университет транспорта РУТ (МИИТ), ул. Образцова, д. 9, стр. 9, г. Москва, 127055, Российская Федерация, e-mail: dzhagaryan.ig@rut-miit.ru

**Igor G. Dzhagaryan\***, Senior Lecturer, Department of Construction Materials and Technologies, Russian University of Transport RUT (MIIT), Obraztsova St., 9, building 9, Moscow, 127055, Russian Federation, e-mail: dzhagaryan.ig@rut-miit.ru

**Никита Михайлович Селютин**, инженер, научный сотрудник лаборатории химических добавок и модифицированных бетонов (№ 16), НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство»; начальник лаборатории, ООО «Предприятие Мастер Бетон», г. Москва, e-mail: selyutin@masterbeton-mb.ru

**Nikita M. Selyutin**, Engineer, Researcher of Laboratory for Chemical Admixtures and Modified Concrete (No. 16), Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction; Head of Laboratory, LLC Master Concrete Enterprise, Moscow, e-mail: selyutin@masterbeton-mb.ru

\*Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

#### References

1. Mirsayapov I.T., Tamrazyan A.G. On the calculation of reinforced concrete structures for fatigue. *Industrial and civil engineering*, 2016, no. 11. – Pp. 19–23. – EDN XACMBV.
2. Dmitrenko E.A., Pochtar N.V. Main types of defects and damages in reinforced concrete structures of transport facilities, the causes of their occurrence. *Bulletin of the Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture*, 2016, no. 3 (119), pp. 134–138. EDN YQPLKX.
3. Semina Yu. A. Strength of reinforced concrete beam elements under the influence of cyclic alternating and low-cycle constant loads. *Bulletin of MGSU*, 2015, no. 9, pp. 36–50.
4. Migunov V.N. Experimental and theoretical study of corrosion and durability of reinforced concrete structures with cracks. Part 1. Penza: Penza State University of Architecture and Civil Engineering, 2013. 331 p. ISBN 978-5-9282-0933-9. EDN UFNWSL.
5. Dzhagaryan I.G., Fedorov V.S. Normative assessment of the fatigue life of concrete in transport structures.