

И.Г. ДЖАГАРЯН¹, В.С. ФЕДОРОВ²¹Российский университет транспорта РУТ (МИИТ), Москва, Россия²Российский университет транспорта РУТ (МИИТ), Москва, Россия

НОРМАТИВНАЯ ОЦЕНКА ВЫНОСЛИВОСТИ БЕТОНА ТРАНСПОРТНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Аннотация. Актуальность работы обусловлена ростом интенсивности воздействия железнодорожного и автомобильного транспорта на железобетонные конструкции транспортных сооружений, что определяет необходимость повышения требований к сопротивлению этих конструкций усталостным явлениям при многократно повторяющихся нагрузках. Показано, что лабораторная оценка выносливости бетона регламентируется отдельными стандартами и основана на установлении зависимости предельного уровня нагружения от числа циклов до разрушения. Вместе с тем результаты таких испытаний не интегрированы напрямую в расчётные методики, применяемые при проектировании железобетонных конструкций. В действующих нормах, в том числе в СП 63.13330, отсутствуют требования, позволяющие однозначно связать класс бетона с допустимым уровнем нагружения при расчётах на выносливость. В работе установлена связь расчётного сопротивления бетона с уровнем нагружения при действии циклических нагрузок, что позволяет сопоставить нормативные расчётные предпосылки с экспериментальными представлениями о выносливости бетона. Выявлено, что экспериментально-аналитические исследования выносливости лёгких высокопрочных бетонов в настоящее время практически отсутствуют, что не позволяет обоснованно применять действующие нормативные требования при их использовании в конструкциях, работающих в условиях циклического нагружения. Совокупность указанных факторов определяет актуальность настоящего исследования.

Ключевые слова: выносливость бетона; усталостная долговечность; циклические нагрузки; нормативные методы расчёта; транспортные сооружения; мостовые сооружения; лёгкий высокопрочный бетон

I.G. DZHAGARYAN¹, V.S. FEDOROV²¹Russian University of Transport RUT (MIIT), Moscow, Russia²Russian University of Transport RUT (MIIT), Moscow, Russia

REGULATORY ASSESSMENT OF CONCRETE ENDURANCE IN TRANSPORT STRUCTURES

Abstract. The relevance of this work is driven by the increasing intensity of impacts from rail and road transport on reinforced concrete structures of transport facilities, necessitating stricter requirements for the resistance of these structures to fatigue under repeated loads. It is shown that laboratory assessment of concrete fatigue strength is regulated by separate standards and is based on establishing the relationship between the ultimate load level and the number of cycles to failure. However, the results of such tests are not directly integrated into the calculation methods used in the design of reinforced concrete structures. Current standards, including SP 63.13330, lack requirements that explicitly link concrete grade to the permissible load level in fatigue calculations. This work establishes a relationship between the design resistance of concrete and the load level under cyclic loads, enabling a comparison of regulatory calculation assumptions with experimental data on concrete fatigue strength. It has been revealed that experimental and analytical studies of the fatigue life of lightweight high-strength concrete are currently virtually nonexistent, preventing the valid application of current regulatory requirements for their use in structures operating under cyclic loading. The combination of these factors determines the relevance of this study.

Keywords: concrete fatigue life; fatigue life; cyclic loads; regulatory calculation methods; transport structures; bridge structures; lightweight high-strength concrete

1. Введение

По данным информационного агентства ТАСС [1], объём перевозок грузов всеми видами транспорта в России ежегодно возрастает. Согласно данным «Транспорт России. Информационно-статистический бюллетень. 2023 год» [2], количество перемещенной одной тонны груза на расстояние один километр (тонн-километр, ткм) в 2023 году больше на 57,2 млрд ткм по сравнению с 2022 годом. В работах предшественников [8-11] неоднократно отмечалось, что рост интенсивности транспортных потоков ведёт к увеличению циклических нагрузок на сооружениях транспортного назначения. При этом конструктивные элементы этих сооружений проектировались и строились многие десятилетия назад, когда фактический уровень динамических нагрузок был значительно ниже. Как следует из отраслевых публикаций и данных Министерства транспорта Российской Федерации [3], в 2024 году в рамках нацпроекта «Безопасные качественные дороги» запланировано реконструировать и отремонтировать более 58,7 тыс. погонных метров мостов и путепроводов. В свою очередь, по данным Росавтодор, около 13% сооружений находятся в аварийном и предаварийном состоянии [4].

Вопрос выносливости бетона уже рассматривался в научной литературе [10, 12, 13] применительно к традиционным тяжёлым бетонам. Однако в связи с внедрением новых, эффективных конструкционных бетонов, в частности, легких высокопрочных бетонов при строительстве и реконструкции мостов, путепроводов, тоннелей, аэродромных покрытий и объектов метрополитена, существующие нормативные и методические подходы, как показано в работах предшественников, не в полной мере позволяют оценить способность именно таких материалов сопротивляться циклическим нагрузкам на протяжении установленного срока службы. Таким образом, из обзора публикаций следует, что задача оценки выносливости железобетонных и бетонных конструкций с использованием легкого высокопрочного бетона остаётся нерешённой и становится ключевым направлением обеспечения долговечности транспортной инфраструктуры.

2. Модели и методы

Нормативные методы оценки выносливости

Вопрос оценки выносливости бетонных и железобетонных конструкций отражён в ряде нормативных документов, регламентирующих проектирование, испытания и расчёт сооружений транспортного назначения. Несмотря на наличие отдельных требований к долговечности и усталостной стойкости, подходы к оценке выносливости в отечественной и международной практике существенно различаются, что требует систематизации действующих норм и выявления направлений их развития.

Российская нормативная база по вопросам выносливости бетонных и железобетонных конструкций включает комплекс стандартов, сводов правил и методических документов, регламентирующих как лабораторные испытания материалов [5], так и расчёт конструкций, работающих под действием многократно повторяющихся нагрузок [6].

Одним из ключевых документов, регламентирующих лабораторные методы оценки усталостной прочности, является ГОСТ 24545-2021 «Бетоны. Методы испытаний на выносливость» [5]. В стандарте определены требования к подготовке образцов, режимам циклического нагружения при сжатии, а также к обработке результатов испытаний. Документ устанавливает порядок определения предела выносливости бетона по числу циклов нагружения до разрушения и служит базой для формирования расчётных зависимостей при оценке долговечности конструкций. В результате проведения испытания по ГОСТ 24545-2021 можно установить соответствие требуемому пределу выносливости или построить линию регрессии, отражающую зависимость между уровнем напряжений и числом циклов нагружения до разрушения.

В соответствии с п. 3.3 ГОСТ 24545-2021 база испытаний N – это *наибольшая продолжительность испытаний на выносливость в циклах повторения нагрузки*,

гарантирующая, что материал не разрушится при неопределенно большом количестве циклов нагружения.[5]. Согласно требованиям данного стандарта, для бетона база испытаний принимается $N=2 \times 10^6$, если не установлено другое требование.

Суть испытания заключается в определении уровня нагружения η определяемому по формуле 1, при котором не будет происходить разрушение образца в течении установленной базы испытаний N и коэффициента асимметрии $\rho_6 = 0,1$ который определяется по формуле 2.

$$\eta = \frac{\sigma_{\max}}{R_b}; \quad (1)$$

$$\rho_6 = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}, \quad (2)$$

где: $\sigma_{\min}$; $\sigma_{\max}$ — минимальное и максимальное напряжение цикла, МПа;

R_b — призмная прочность бетона, МПа.

В соответствии с п. 7.2 ГОСТ 24545-2021 нагружение образцов соответствует уровням нагружения η 0,9; 0,8; 0,7; 0,6. Если среднее значение количества циклов одной серии, состоящей из трех образцов, меньше 2×10^6 циклов, заданным нормативным документом, то в соответствии с пунктом 8.2. делают заключение о несоответствии прочности бетона требованиям к его выносливости.

Следует отметить, что несмотря на наличие регламентированной методики экспериментального определения выносливости бетона, в действующих сводах правил отсутствует прямое задание предела выносливости бетона как расчётного параметра. В нормативных документах для транспортных сооружений усталостная долговечность бетона учитывается косвенно – через снижение расчётных сопротивлений и введение коэффициентов условий работы. При этом фактический уровень напряжений по отношению к прочности бетона, соответствующий таким нормативным допущениям, в явном виде не задаётся.

Данный подход реализован, в частности, в СП 35.13330.2011 «Мосты и трубы» [6], где в п. 7.26 расчётное сопротивление бетона сжатию для конструкций, работающих в условиях многократно повторяющихся нагрузок R_{bf} , определяется по формуле:

$$R_{bf} = m_{b1} \times R_b = 0,6 \times \beta_b \times \varepsilon_b \times R_b, \quad (3)$$

где: m_{b1} – коэффициент условия работы, согласно СП....для циклического нагружения ;

R_b – расчетное сопротивление бетона осевому сжатию при расчетах по предельным состояниям первой группы принимаемы по таблице 7.6. СП 35;

β_b – коэффициент, учитывающий рост прочности бетона во времени и принимаемый по таблице 7.8. СП 35;

ε_b – коэффициент, зависящий от асимметрии цикла определяемый по формуле (2) повторяющихся напряжений и принимаемый по таблице 7.9. СП 35.

Для уточнения фактического уровня выносливости бетона по требованиям СП 35 был выполнен расчёт, направленный на количественную оценку уровня напряжений, который допускается нормативным документом при многократно повторяющихся нагрузках.

Определение нормативных уровней выносливости бетона по требованиям СП 35.13330.2011

Для количественной оценки нормативного уровня нагружения бетона выполнено сопоставление расчётного сопротивления R_{bf} , определяемого по требованиям СП 35, с призмной прочностью бетона. В качестве базового показателя прочности использована нормативная прочность бетона при осевом сжатии R_{bn} , принимаемая по таблице 6.7 СП 63.13330.2018 [7] где приведены следующие значения соответствующие классу прочности бетона (таблица 1).

Таблица 1 – Нормативная прочность бетона при осевом сжатии R_{bn} по СП 63

№ п.п.	Класс прочности бетона при сжатии	Нормативная прочность бетона при осевом сжатии R_{bn} , МПа
1.	B20	15
2.	B25	18,5
3.	B30	22
4.	B35	25,5
5.	B40	29
6.	B45	32
7.	B50	36
8.	B55	39,5
9.	B60	43

Таким образом, уровень нагружения η характеризует отношение нормативно допускаемого напряжённого состояния бетона при многократно повторяющихся нагрузках R_{bf} к его нормативной прочности при осевом сжатии R_{bn} и определялся по формуле:

$$\eta = \frac{R_{bf}}{R_{bn}}, \quad (4)$$

Расчёты выполнены для бетонов классов от B20 до B60 при коэффициенте асимметрии цикла $\rho_6 = 0,1$, что соответствует значениям коэффициента $\varepsilon_b = 1$, принимаемым по таблице 7.9 СП 35.

В таблице 2 приведены значения расчётного сопротивления бетона R_{bf} , определённые по требованиям СП 35 для различных классов прочности бетона при сжатии.

Таблица 2 – Значение R_{bf} , в зависимости от класса прочности бетона

№ п.п.	Класс прочности бетона при сжатии	Расчётное сопротивление бетона сжатию R_b , МПа	Коэффициент β_b	Расчётное сопротивление бетона сжатию для конструкций, работающих в условиях многократно повторяющихся нагрузок R_{bf} , МПа
1.	B20	10,5	1,34	8,4
2.	B25	13,0	1,34	10,5
3.	B30	15,5	1,31	12,2
4.	B35	17,5	1,28	13,4
5.	B40	20,0	1,26	15,1
6.	B45	22,0	1,24	16,4
7.	B50	25,0	1,22	18,3
8.	B55	27,5	1,21	20,0
9.	B60	30,0	1,2	21,6

На основе данных, приведённых в таблицах 1 и 2, были определены нормативные уровни нагружения бетона η для различных классов прочности при многократно повторяющихся нагрузках. Полученные значения отражают фактический уровень напряжений, который допускается требованиями СП 35 при расчёте железобетонных конструкций транспортных сооружений на выносливость.

В таблице 3 приведено сопоставление нормативной прочности бетона при осевом сжатии R_{bn} , расчётного сопротивления бетона R_{bf} и соответствующих уровней нагружения η .

Таблица 3 – Сопоставление расчётного сопротивления R_{bf} по СП 35 с нормативной прочностью бетона при осевом сжатии R_{bn} .

Класс прочности бетона	Нормативная прочность бетона при осевом сжатии R_{bn} , МПа	Расчётное сопротивление бетона сжатию для конструкций, работающих в условиях многократно повторяющихся нагрузок R_{bf} , МПа	Уровень нагружения η
B20	15	8,4	0,53
B25	18,5	10,5	0,52
B30	22	12,2	0,51
B35	25,5	13,4	0,48
B40	29	15,1	0,47
B45	32	16,4	0,45
B50	36	18,3	0,46
B55	39,5	20,0	0,45
B60	43	21,6	0,45

Сопоставление нормативных уровней нагружения бетона η , определённых по требованиям СП 35, с данными экспериментальных [8-10] и расчётных исследований показывает, что нормативный подход не задаёт единого фиксированного уровня выносливости бетона как материала, а формирует допустимый эксплуатационный уровень напряжений, зависящий от класса прочности бетона.

Как следует из данных таблицы 3, для бетонов низких и средних классов прочности (B20–B25) нормативные значения уровня нагружения η находятся в диапазоне 0,50–0,53, что соответствует верхней части диапазона усталостной выносливости бетона, приводимой в литературе.

Так, в классической работе Probst E. [8] показано, что выносливость бетона при циклическом сжатии варьируется в диапазоне $\eta = 0,47–0,60$ от статической прочности. О. Я. Берг [9], анализируя физические основы прочности бетона и железобетона, приводит более широкий интервал значений выносливости — от 0,30 до 0,75, что отражает существенное влияние состава бетона, условий нагружения и критериев разрушения. В более современных исследованиях [10] расчётные значения предела выносливости бетона, как правило, находятся в более узком диапазоне $\eta = 0,47–0,55$.

В то же время для бетонов повышенных классов прочности (B40–B60) нормативный уровень нагружения η последовательно снижается до значений порядка 0,45–0,47, что соответствует нижней границе диапазона усталостной выносливости, приводимой в экспериментальных и расчётных работах. Это свидетельствует о том, что с увеличением класса прочности бетона нормативная методика СП 35 не приводит к пропорциональному повышению допустимого уровня циклических напряжений, а, напротив, формирует более консервативные расчётные предпосылки.

Особое значение выявленные особенности нормативной оценки выносливости приобретают в связи с расширением области применения лёгких высокопрочных бетонов (ЛВБ) в транспортном и инфраструктурном строительстве. Использование ЛВБ позволяет снизить собственный вес конструкций и уровень эксплуатационных нагрузок, однако их работа при многократно повторяющихся нагрузках в настоящее время изучена существенно в меньшей степени по сравнению с традиционными тяжёлыми бетонами.

В работе Р. Л. Маилян [11] отмечается, что предел выносливости лёгких бетонов ниже, чем у тяжёлых, на 5–20 %, однако автор не приводит детальных сведений о методике испытаний, уровне нагрузок и коэффициенте асимметрии циклов нагружения.

В работе Gray W. E. [13] исследовались цилиндрические образцы лёгкого бетона с прочностью при сжатии 24 МПа и 41 МПа (диаметр 7,5 см, высота 15,5 см). Нагружение осуществлялось при уровнях $\eta = 0,4\text{--}0,8$ с шагом 0,1 и частоте 16 Гц. По результатам испытаний установлено, что предел выносливости лёгкого бетона соответствует уровню $\eta \approx 0,6$, причём повышение прочности практически не влияет на этот показатель.

В работе Zhang M. и др. [12] экспериментально определены характеристики изгибной усталости ЛВБ при различных уровнях напряжений. Авторы выявили закономерную зависимость между числом циклов до разрушения и относительным уровнем нагрузки и отметили, что выносливость ЛВБ при изгибе составляет около 0,6 от статической прочности, что хорошо согласуется с результатами, полученными для тяжёлых бетонов.

Анализ опубликованных исследований показывает, что экспериментальные данные по усталостной выносливости ЛВБ носят фрагментарный характер и, как правило, получены при различных схемах нагружения, формах образцов и критериях разрушения. Это затрудняет их прямое сопоставление с нормативными расчётными уровнями, формируемыми требованиями СП 35, а также не позволяет однозначно оценить запас выносливости ЛВБ при эксплуатации транспортных сооружений.

При этом действующие нормативные документы не содержат дифференцированных расчётных положений для лёгких высокопрочных бетонов и фактически распространяют на них те же аппроксимационные подходы, что и для тяжёлых бетонов. В условиях ограниченности экспериментальных данных по выносливости ЛВБ это создаёт дополнительную неопределённость при назначении расчётных уровней нагружения и требует дальнейшего обоснования на основе целенаправленных экспериментальных исследований.

3. Результаты исследования и их анализ

В статье рассмотрены действующие нормативные методы оценки выносливости бетона, применяемые при проектировании и расчёте бетонных и железобетонных конструкций транспортных сооружений. Анализ выполнен на основе сопоставления требований стандартов, регламентирующих лабораторные испытания бетона на выносливость, и расчётных подходов, реализованных в отраслевых нормативных документах.

Показано, что ГОСТ 24545–2021 формирует экспериментальную основу для определения выносливости бетона, связывая предельный уровень нагружения с числом циклов до разрушения. Вместе с тем результаты испытаний, получаемые в соответствии с данным стандартом, в настоящее время не имеют прямого продолжения в расчётных методиках, используемых при проектировании бетонных и железобетонных конструкций.

Установлено, что в нормативных документах, регламентирующих расчёт мостовых сооружений (СП 35.13330.2011), учёт выносливости бетона осуществляется косвенно – за счёт снижения расчётных сопротивлений и введения коэффициентов условий работы. Такой подход приводит к формированию нормативного диапазона уровней нагружения $\eta = 0,45\text{--}0,53$ по отношению к призмочной прочности бетона, который фактически принимается в качестве допустимого эксплуатационного уровня напряжений при многократно повторяющихся нагрузках.

Сопоставление рассмотренных нормативных подходов показало, что при различии формальных методов учёта выносливости их объединяет отсутствие прямой связи с экспериментально определяемыми усталостными характеристиками бетона, такими как число циклов до разрушения, амплитуда напряжений и асимметрия цикла. Нормативная оценка выносливости в настоящее время основывается преимущественно на косвенных понижающих допущениях, величины которых не калибруются по данным усталостных испытаний.

Особую актуальность выявленные ограничения приобретают в связи с расширением области применения лёгких высокопрочных бетонов (ЛВБ) в транспортном и инфраструктурном строительстве. Использование ЛВБ позволяет существенно снизить массу конструкций и эксплуатационные нагрузки, однако действующие нормативные методы

оценки выносливости не учитывают особенности данных материалов и не содержат специализированных положений, регламентирующих их работу при многократно повторяющихся нагрузках.

4. Заключение

1. Действующие нормативные методы оценки выносливости бетона носят отраслевой и аппроксимационный характер и не обеспечивают унифицированного подхода к учёту усталостной долговечности современных бетонов, включая лёгкие высокопрочные составы.

2. Отсутствует прямая связь между экспериментально определяемыми усталостными характеристиками бетона (число циклов до разрушения, амплитуда напряжений, асимметрия цикла) и расчётными методиками, регламентированными отраслевыми нормативными документами.

3. Существующий косвенный учёт выносливости через снижение расчётных сопротивлений и введение коэффициентов условий работы не калибруется по данным усталостных испытаний, что ограничивает достоверность оценки долговечности конструкций при циклических нагрузках.

4. Выявленные ограничения указывают на целесообразность дальнейшего развития нормативно-методической базы с учётом экспериментальных данных по выносливости бетона, особенно применительно к сооружениям транспортного назначения, эксплуатируемым в условиях интенсивных циклических нагрузок, а также к конструкциям из лёгких высокопрочных бетонов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Перевозки грузов всеми видами транспорта в России увеличиваются [Электронный ресурс] // ТАСС. Мнения. — Режим доступа: <https://tass.ru/opinions/25386075> (дата обращения: 21.10.2025).
2. Транспорт России: информационно-статистический бюллетень. — 2023 г. — М.: Министерство транспорта Российской Федерации, 2024. — 42с.
3. Министерство транспорта Российской Федерации. В 2024 году благодаря нацпроекту «Безопасные качественные дороги» строят и обновляют 58,7 тыс. пог. м мостов и путепроводов [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.mintrans.gov.ru/press-center/news/11399> (дата обращения: 21.10.2025).
4. В России около 4 тыс. автомобильных мостов находятся в аварийном либо предаварийном состоянии [Электронный ресурс] // РЖД-Партнёр. — 2024. — Режим доступа: <https://www.rzd-partner.ru/auto/news/v-rossii-okolo-4-tys-avtomobilnykh-mostov-nakhodyatsya-v-avariynom-libo-predavariynom-sostoyanii/> (дата обращения: 21.10.2025).
5. 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).
6. СП 35.13330.2011 «Мосты и трубы. Свод правил. Расчёт и строительство». — Москва: АО «ЦНИИПромзданий», 2011. — 344 с.
7. СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения». — Москва: АО «ЦНИИПромзданий», 2018. — 416 с.
8. Probst E. The Influence of Rapidly Alternating Loading on Concrete and Reinforced Concrete // The Structural Engineer. — 1931. — Vol. 9, Issue 10: p. 326–340; Issue 12: p. 410–429.
9. Физические основы теории прочности бетона и железобетона [Текст] / О. Я. Берг, д-р техн. наук проф. - Москва : Госстройиздат, 1961. - 96 с. : ил.; 22 см.
10. Мирсаяпов Илизар Т., Гарифуллин Д. Р. Инженерные методы расчета деформаций, модуля упругости и предела выносливости бетона при циклическом нагружении // Известия КазГАСУ. 2020. №3 (53). С. 15-26.
11. Р. Л. Маилян Проектирование и расчет конструкций из легких бетонов// Бетон и железобетон. — 1985. — № 7, апр. — С. 26–28.
12. Zhang M., Ma J., Wang Q., Shi C.. 2018 Flexural fatigue behavior of ultra-lightweight cement composite and high strength lightweight aggregate concrete // Construction and Building Materials 173 (2018). С. 90–100
13. Gray W. E. Mc lavghlin J.FAntrin. J. D. Study of the Fatigue Properties of Lightweight Aggregate Concrete // Joint Highway Research Project. November 1960 №20 C.

REFERENCES

1. Freight transportation by all modes of transport in Russia is increasing [Electronic resource] // TASS. Opinions. — Access mode: <https://tass.ru/opinions/25386075> (accessed: 10/21/2025).
2. Transport of Russia: information and statistical bulletin. — 2023. — Moscow: Ministry of Transport of the Russian Federation, 2024. — 42 p.
3. Ministry of Transport of the Russian Federation. In 2024, thanks to the national project "Safe Quality Roads", 58.7 thousand linear meters of bridges and overpasses are being built and renovated [Electronic resource]. — Access mode: <https://www.mintrans.gov.ru/press-center/news/11399> (accessed: 10/21/2025).
4. About 4 thousand road bridges in Russia are in emergency or pre-emergency condition [Electronic resource] // RZD-Partner. — 2024. — Access mode: <https://www.rzd-partner.ru/auto/news/v-rossii-okolo-4-tys-avtomobilnykh-mostov-nakhodyatsya-v-avariynom-libo-predavariynom-sostoyanii/> (accessed: 10/21/2025).
5. GOST 24545-2021. Concretes. Test methods for fatigue endurance [Electronic resource]. — Effective 03/01/2022. — Moscow: Standartinform, 2022. — 24 p. — Access mode: <https://docs.cntd.ru/document/1200182179> (accessed: 10/22/2025).
6. SP 35.13330.2011 "Bridges and pipes. Code of practice. Design and construction". — Moscow: JSC "TSNIIPromzdaniy", 2011. — 344 p.
7. SP 63.13330.2018 "Concrete and reinforced concrete structures. Basic provisions". — Moscow: JSC "TSNIIPromzdaniy", 2018. — 416 p.
8. Probst E. The Influence of Rapidly Alternating Loading on Concrete and Reinforced Concrete. *The Structural Engineer*. 1931;9(10):326–340; (12):410–429.
9. Berg O.Ya. Physical foundations of the theory of strength of concrete and reinforced concrete. Moscow: Gosstroyizdat; 1961. 96 p.
10. Mirsayapov Ilizar T., Garifullin D.R. Engineering methods for calculating deformations, modulus of elasticity and endurance limit of concrete under cyclic loading. *Izvestiya KazGASU [Proceedings of Kazan State University of Architecture and Engineering]*. 2020;(3(53)):15-26.
11. Mailyan R.L. Design and calculation of lightweight concrete structures. *Beton i zhelezobeton [Concrete and Reinforced Concrete]*. 1985;(7):26–28.
12. Zhang M., Ma J., Wang Q., Shi C. Flexural fatigue behavior of ultra-lightweight cement composite and high strength lightweight aggregate concrete. *Construction and Building Materials*. 2018;173:90–100.
13. Gray W.E., McLaughlin J.F., Antrim J.D. Study of the Fatigue Properties of Lightweight Aggregate Concrete. Joint Highway Research Project. November 1960;(20).

Информация об авторах:

Джагарян Игорь Григорьевич

Старший преподаватель кафедры «Строительные конструкции, здания и сооружения», Российский университет транспорта, РУТ (МИИТ)
E-mail: djagajon@gmail.com

Федоров Виктор Сергеевич,

Профессор кафедры «Строительные конструкции, здания и сооружения», Российский университет транспорта, РУТ (МИИТ)
E-mail: fvs_skzs@mail.ru

Information about authors:

Dzhagaryan Igor Gr.

Senior Lecturer, Department of "Building structures, buildings and constructions", Russian University of Transport, RUT (MIIT)
E-mail: djagajon@gmail.com

Fedorov Viktor S.

Professor, Department of "Building structures, buildings and constructions", Russian University of Transport, RUT (MIIT)
E-mail: fvs_skzs@mail.ru

Статья поступила в редакцию 08.02.2026
Одобрена после рецензирования 13.03.2026
Принята к публикации 01.04.2026

The article was submitted 08.02.2026
Approved after reviewing 13.03.2026
Accepted for publication 01.04.2026