

# ПРИМЕНИМОСТЬ НОРМАТИВНОГО ПОДХОДА СНИЖЕНИЯ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ ПРИ НЕПРОДОЛЖИТЕЛЬНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ ДЛЯ ВЫСОКОПРОЧНЫХ БЕТОНОВ

П.Д. АРЛЕНИНОВ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона им. А.А. Гвоздева, Москва, Россия

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия

## Аннотация

**Введение.** Согласно СП 63.13330.2018, при расчете по второй группе предельных состояний на кратковременные нагрузки модуль упругости бетона принимается с понижающим коэффициентом 0,85. Данный коэффициент исторически учитывал неупругие деформации и кратковременную ползучесть. Однако его обоснованность для современных высокопрочных и модифицированных бетонов, а также сталежелезобетонных конструкций экспериментально не подтверждена.

**Цель.** Экспериментально-теоретическая оценка применимости коэффициента 0,85 к начальному модулю упругости высокопрочных модифицированных бетонов при кратковременных воздействиях на предварительно загруженные конструкции.

**Материалы и методы.** Испытано более 100 образцов из самоуплотняющегося бетона класса В90–В100 с модулем упругости 55 ГПа: призмы, цилиндры, сталежелезобетонные призмы с листовым армированием и керны из обжатых колонн. Реализованы сценарии: стандартные испытания, увеличенные выдержки, повышенные уровни напряжений (до 80 %), длительное предварительное обжатие (более 3 месяцев) с догрузением, а также испытания кернов, отобранных из ранее нагруженных конструкций. Модуль упругости определялся по ГОСТ и по специально разработанной методике (между ступенями нагружения).

**Результаты.** Деформирование исследуемого бетона – практически линейное до разрушения, с минимальными микротрещинами и ползучестью. Максимальное снижение модуля упругости по всем сценариям не превысило 10 %, для эталонных призм – не более 7 %, что ниже нормативных 15 %. Подтверждена применимость выводов для сталежелезобетона и возможность оценки модуля упругости по кернам.

**Выводы.** Для высокопрочных модифицированных бетонов обосновано применение понижающего коэффициента 0,9 вместо 0,85 при кратковременных нагрузках, что позволяет снизить расчетные горизонтальные перемещения высотных зданий на 5–10 %.

**Ключевые слова:** модуль упругости, ползучесть бетона, сталежелезобетонная конструкция, листовое армирование

**Для цитирования:** Арленинов П.Д. Применимость нормативного подхода снижения модуля упругости при непродолжительных воздействиях для высокопрочных бетонов // Вестник НИЦ «Строительство». 2026. 1(48). С. 07–20. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-1\(48\)-07-20](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-1(48)-07-20)

## Вклад автора

Автор берет на себя ответственность за все аспекты работы над статьей.

## Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

## Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 14.01.2026

Поступила после рецензирования 20.02.2026

Принята к публикации 27.02.2026

## APPLICABILITY OF THE REGULATORY APPROACH FOR REDUCING THE MODULUS OF ELASTICITY UNDER SHORT-TERM ACTIONS FOR HIGH-STRENGTH CONCRETES

P.D. ARLENINOV<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> JSC Research Center of Construction, NIIZHB named after A.A. Gvozdev, Moscow, Russia

<sup>2</sup> National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

### Abstract

*Introduction.* According to SP 63.13330.2018, when calculating the second group of limit states for short-term loads, the modulus of elasticity of concrete is taken with a reduction factor of 0.85. Historically, this factor accounted for inelastic deformations and short-term creep. However, its validity for modern high-strength (B80–B100 and higher) and modified concretes, as well as for steel-concrete composite structures, has not been experimentally confirmed.

*Aim.* An experimental and theoretical assessment of the applicability of the 0.85 factor to the initial modulus of elasticity of high-strength modified concretes under short-term actions on pre-loaded structures.

*Materials and methods.* More than 100 specimens of self-compacting concrete class B90–B100 with a modulus of elasticity of 55 GPa were tested: prisms, cylinders, steel-concrete composite prisms with steel plates, and cores extracted from pre-compressed columns. The following scenarios were implemented: standard tests, increased load holding times, elevated stress levels (up to 80 %), long-term pre-compression (over 3 months) followed by additional loading, and core tests. The modulus of elasticity was determined according to GOST standards and by a developed methodology (between loading stages).

*Results.* The deformation behavior of the concrete under study was almost linear up to failure, with minimal microcracking and creep. The maximum reduction in the modulus of elasticity across all scenarios did not exceed 10 %, and for reference prisms it was no more than 7 %, which is lower than the standard 15 %. The applicability of the findings to steel-concrete composite structures and the feasibility of estimating the modulus of elasticity from core samples were confirmed.

*Conclusions.* For high-strength modified concretes, the application of a reduction factor of 0.9 instead of 0.85 under short-term loads is justified, which allows for a reduction in the design horizontal displacements of high-rise buildings by 5–10 %.

**Keywords:** modulus of elasticity, concrete creep, steel-concrete composite structure, steel plate reinforcement

**For citation:** Arleninov P.D. Applicability of the regulatory approach for reducing the modulus of elasticity under short-term actions for high-strength concretes. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*, 2026, no. 1(48), pp. 07–20. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-1\(48\)-07-20](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-1(48)-07-20)

### Author contribution statement

The author takes responsibility for all aspects of the paper.

### Funding

No funding support was obtained for the research.

### Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

Received 14.01.2026

Revised 20.02.2026

Accepted 27.02.2026

## Введение

При расчете по второй группе предельных состояний в соответствии с действующим сводом правил СП63.13330.2018 при непродолжительном действии нагрузки (кратковременном воздействии) для определения жесткости элемента конструкции модуль упругости бетона определяется по формуле (1). Какое-либо обоснование применимости данного коэффициента отсутствует как в самом своде правил, так и производных от него документах СП 430.1325800, СП 266.1325800 и всевозможных пособиях и рекомендациях. Особенно интересна обоснованность применения данного коэффициента к современным железобетонным и сталежелезобетонным конструкциям из высокопрочных бетонов.

$$E_{b1} = 0,85 E_b \quad (1)$$

где:  $E_b$  – начальный модуль упругости бетона.

По результатам анализа литературных источников, включающих экспериментальные и теоретические исследования [1–4], а также серии собственных испытаний на бетонах различных классов по прочности установлено историческое происхождение коэффициента 0,85, а также факторы, из-за которых такое снижение возможно. Ниже приведена трансформация физического смысла этого коэффициента в понимании его научным сообществом нашей страны.

В отечественной технической литературе одно из первых упоминаний данного редуцирующего коэффициента ( $k_n$ ) было отражено в работе Гвоздева А.А. [5] в 1962 году, используемого при определении изгибной жесткости железобетонных конструкций при отсутствии трещин и непродолжительном (кратковременном) действии нагрузок (2). В описании коэффициента 0,85 указывалось, что он учитывает развитие неупругих деформаций за время приложения и действия кратковременной нагрузки:

$$D = k_n \cdot E_b \cdot I_{red}, \quad (2)$$

где:  $I_{red}$  – момент инерции приведенного поперечного сечения железобетонного элемента.

При этом в 1978 году Гвоздевым А.А. [6] в своей работе было опубликовано, что при определении кривизны железобетонных элементов  $r$  при непродолжительном действии нагрузок, коэффициентом  $k_n$  учитывается уже влияние на деформации элемента кратковременной ползучести бетона, проявляющейся при непродолжительном времени приложения нагрузок. При этом этот коэффициент, в зависимости от вида бетона, равен либо 0,85, либо 0,7.

Залесовым А.С. и Кодышем Э.Н. в 1988 году в работе [7] было установлено, что при определении кривизны железобетонных элементов на участках без трещин в растянутой зоне при непродолжительном действии нагрузок коэффициент  $k_n$  не является постоянной величиной, а уменьшается по мере увеличения нагрузки. Так, для изгибаемых ненапрягаемых элементов в начале нагружения коэффициент  $k_n$  близок к единице. Но с ростом нагружения все заметнее начинают проявляться неупругие деформации (кратковременная ползучесть бетона), при этом в растянутом бетоне, начиная с определенного уровня нагружения, образуются и развиваются микротрещины. Авторы отмечают, что учесть в расчетах все эти процессы весьма сложно, поэтому в результате анализа данных по испытаниям изгибаемых элементов конструкций из тяжелого бетона предлагается учитывать все эти эффекты при помощи коэффициента  $k_n$  равного 0,85. При этом в этой же работе указывается, что во внецентренно сжатых элементах, нагруженных значительными сжимающими силами  $N$ ,

процесс развития неупругих деформаций начинается еще до приложения изгибающих моментов. Авторы отмечают, что для таких элементов коэффициент  $k_n$  может быть менее 0,85.

Значительно позже в 2008 году в работе Иванова А. [8] было предложено определение жёсткостных характеристик элементов при сжатии по двухлинейной диаграмме «усилия–деформации».

В соответствии с современными представлениями, коэффициентом 0,85 описывается снижение модуля упругости бетона при определении кривизны изгибаемых, внецентренно сжатых и внецентренно растянутых элементов во время приложения к зданию, уже нагруженному длительно действующей нагрузкой, дополнительного непродолжительного (кратковременного) воздействия (ветрового, применительно к высотным зданиям).

В зарубежных нормативных документах, в частности в разделе 6.6.3 АСІ 318-19, учет снижения жесткости железобетонных элементов в изгибаемых и внецентренно сжатых элементах за счет образования трещин или эффектов ползучести допускается выполнять за счет понижающих коэффициентов, которые применяются к моменту инерции и площади сечений (в зависимости от вида НДС) при выполнении расчетов в упругой стадии. Так, при выполнении расчетов по первой группе предельных состояний при нагрузках, близких к предельным, изгибные жесткости (момент инерции приведенного сечения) в зависимости от типа элемента снижаются до:

– Колонны:  $I'_{red} = 0.7 \cdot I_{red}$  ;

– Стены при отсутствии трещин:  $I'_{red} = 0.7 \cdot I_{red}$  ;

– Стены при наличии трещин:  $I'_{red} = 0.35 \cdot I_{red}$  ;

– Балки:  $I'_{red} = 0.35 \cdot I_{red}$  ;

– Плиты безбалочных перекрытий:  $I'_{red} = 0.35 \cdot I_{red}$  .

Указанные коэффициенты получены путем умножения своих базовых значений (более высоких) на дополнительный коэффициент запаса 0,875, учитывающий естественный разброс в свойствах материалов, точности соблюдения геометрических размеров, и других факторов, влияющих на реальную жесткость конструкции. При этом, согласно этому же разделу, АСІ 318-19, осевые жесткости элементов (центральное сжатие) не снижаются в зависимости от типа элемента, а также и при наличии трещин, это свидетельствует о определенном запасе заложенном в данный коэффициент, поскольку общая жесткость сжатого железобетонного сечения складывается из жесткостей бетонной части и арматуры, а предлагается использовать только площадь бетона, часть жесткости, которая дает арматура, по логике документа, примерно компенсирует потерю жесткости из-за микротрещин и нелинейности бетона.

Принципиальное отличие АСІ от действующих российских норм, что по указанным выше коэффициентам нет дифференциации в зависимости от времени действия нагрузки и документ не разделяет нагрузки на кратковременные и длительные, подразумевается, что все нагрузки длительные.

Деформирование современных высокопрочных бетонов (под современным в данном случае подразумеваются самоуплотняющиеся бетоны с модифицированной структурой) значительно отличается от бетонов обычной структуры и прочностей до В60, на основе испытаний которых и разработано большая часть разделов действующих нормативных документов [9, 10], также появились новые сталежелезобетонные конструкции с жесткой арматурой [11–13] и листовым армированием [14, 15], данных по деформированию такого композитного материала под длительно действующей нагрузкой за исключением отдельных работ [16, 17] практически нет.

В связи с этим, была проведена комплексная экспериментально-теоретическая работа по исследованию всех возможных факторов, которые могут оказать влияние на величину модуля упругости при непродолжительном воздействии уже эксплуатируемых зданий и сооружений, то есть оценить правомерность применения снижающего коэффициента, 0,85 о котором было сказано выше (в данной работе в режиме сжатия).

## Материалы и методы испытаний

В рамках эксперимента из бетона одного состава (модифицированный самоуплотняющийся бетон класса В90–В100 с повышенным проектным модулем упругости 55ГПа, было подготовлено более 100 бетонных и железобетонных образцов различных типоразмеров (рисунок 1). Состав с модифицированным модулем упругости относительно приведенного в СП 63.13330 был выбран не случайно, поскольку бетоны классов выше В80 обычно применяются в высотном строительстве, где значений модуля упругости практически всегда критично и использования бетонов таких классов с обычным модулем упругости не совсем рационально [18, 19]. В данном бетоне использовались добавки Sika, но бетон с аналогичными свойствами можно получить с использованием других добавок и микронаполнителей [18]. Были подготовлены следующие типы образцов:

- образцы призмы  $150 \times 150 \times 600$  мм и  $100 \times 100 \times 400$  мм.
- образцы цилиндры  $\varnothing 100 \times 200$  мм;  $\varnothing 100 \times 400$  мм;  $\varnothing 150 \times 300$  мм;  $\varnothing 150 \times 600$  мм;
- сталежелезобетонные образцы призмы с внешним листовым армированием  $150 \times 150 \times 600$  мм, схема армирования аналогична приведённой в работе [18];
- образцы колонны  $400 \times 400 \times 1600$  мм для последующего отбора образцов кернов  $\varnothing 70$  и  $\varnothing 100$  мм.

Образцы испытывались по следующим сценариям:

А. Проведение стандартных испытаний по ГОСТ 24452-2023, а также с измененными режимами нагружения в соответствии с иностранными стандартами BS EN 12390, ASTM C469, ISO 1920 и их комбинациями [20].

Б. Проведение испытаний по определению модуля упругости при повышенных выдержках (до 2-х часов) для более полного учета быстро натекающей ползучести.

В. Проведение испытаний по определению модуля упругости при повышенных уровнях напряжений (до 80 % от разрушающей нагрузки – выше расчетного сопротивления бетона).

Г. Проведение испытаний по определению модуля упругости на образцах предварительно нагруженных длительно действующей нагрузкой (более трех месяцев, чтобы выбрать большую часть деформаций ползучести) в пружинных установках (20 % от разрушающей) с догрузением еще на 10 % без предварительной разгрузки в этих же установках. Повторение испытаний при повышенных уровнях нагрузки 30 % → 40 %.

Д. Проведение испытаний по определению модуля упругости на образцах кернах различного диаметра, выбуренных из образцов колонн после их предварительного обжатия до уровня напряжений 0,3 (П1) и 0,8 (П4) от разрушающей нагрузки (рисунок 1) в тысячетонных прессах, а также контрольных ненагруженных образцах (П0). Данный сценарий испытаний моделировал изъятие керна из реальной нагруженной вертикальной конструкции, причем правильно ориентированный (кern испытывается нагрузкой ортогональной, реально действующей в конструкции). Схемы испытаний приведены на рисунке 2.

Е. Проведение оценочных испытаний образцов призм низких классов бетона (В20–В30) для возможности построения совместных графиков деформирования с высокопрочным модифицированным бетоном, на котором проводилась основная серия испытаний.

Ж. Дополнительно проводились испытания при определении модуля упругости при предварительном воздействии сверх высоких напряжений близких к пределу прочности образца, результаты этих испытаний в данной работе не приведены и будут опубликованы отдельно.



Рис. 1. Процесс испытания образцов по сценариям А, Г, Д  
Fig.1. The process of testing samples according to scenarios A, G, D

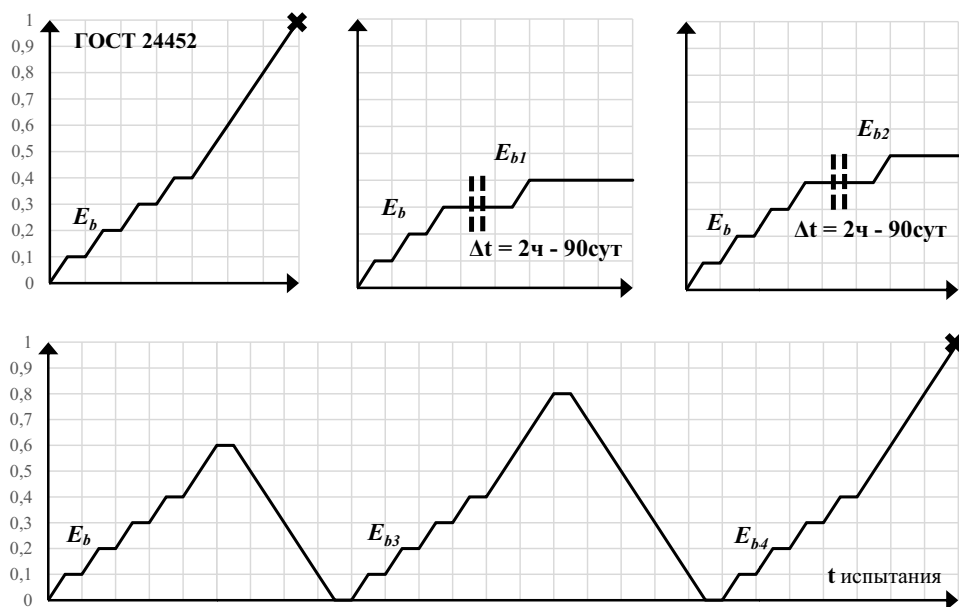
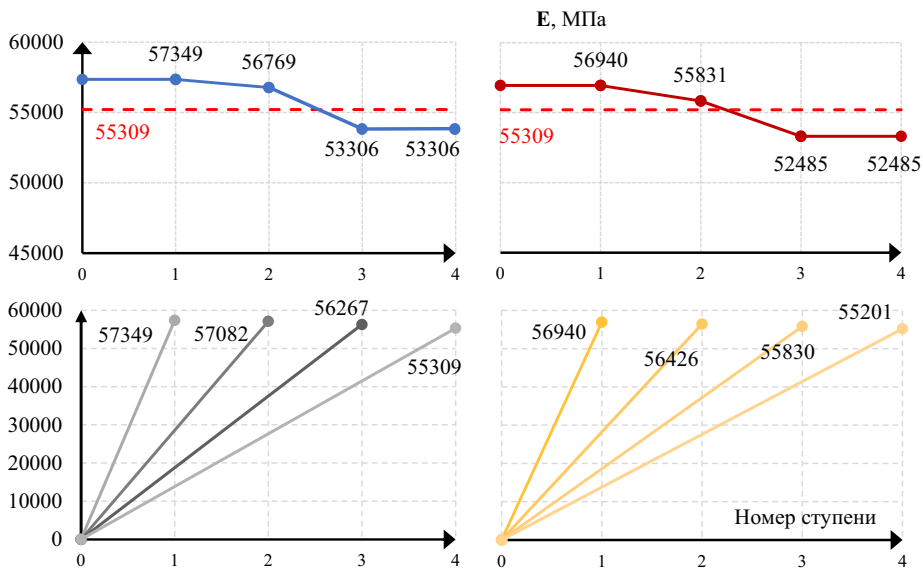


Рис. 2. Схемы испытаний по различным сценариям  
Fig. 2. Test schemes for various scenarios

## Результаты и обсуждение

Расчет модуля упругости на основе всех результатов испытаний помимо стандартного подхода ГОСТ 24452-2023 дополнительно выполнялся еще следующим образом по специально разработанной методике – рассчитывались модули упругости между ступенями нагружения (с различной конфигурацией расчетного диапазона) с учетом и без учета быстронатекающей ползучести. Для примера на рисунке 3 графическом виде показаны посчитанные значения модуля упругости для образца призмы  $150 \times 150 \times 600$  мм. Данный рисунок следует читать следующим образом: на верхней группе графиков приведены значения модуля упругости, посчитанные между ступенями нагружения, пунктиром показан результат определения модуля упругости по ГОСТ24452-2023. Видно, что с каждой последующей ступенью значение модуля несколько снижается, но одновременно асимптотически приближается к горизонтали (каждая ступень соответствует 10 % от разрушающей нагрузки). На нижней группе графиков лучами показаны значения модуля, рассчитанные в диапазоне от начала загрузки до значения, полученного на каждой ступени. Слева и справа соответственно приведены результаты с вычетом деформаций быстронатекающей ползучести и без вычета. При этом ожидаемо без вычета деформаций быстронатекающей ползучести значения модуля несколько ниже, однако это снижение минимальное, в связи с практически линейным деформированием исследуемого высокопрочного бетона и совсем малых деформаций ползучести при каждой выдержке. Приведенная методика позволяет оценивать влияние на модуль упругости как быстронатекающей ползучести, так и неупругих деформаций – именно эти два фактора являлись причиной снижения модуля упругости при кратковременной нагрузке на 15 % (рассматриваемый коэффициент 0,85) в первых редакциях нормативных документах в соответствии с [5, 6].



**Рис. 3.** Результаты расчета модуля упругости бетона разными способами  
**Fig. 3.** Results of calculating the modulus of elasticity of concrete using different methods

Сводные результаты испытаний приведены в таблице 1 (средние значения по серии выделены жирным, цветом выделены средние результаты для эталонного образца). Средние разбросы составляют до 9,6 % для армированных образцов и 7,8 для бетонных, однако, на об-

разцах-призмах 150 × 150 × 600 мм, которые являются эталонными, была зафиксированы максимальная разница не более 6 % в среднем по серии и не более 7 % – для наихудшего образца.

Таблица 1

**Сводные результаты испытаний по всем типам моделей**

Table 1

**Summary test results for all model types**

Наименование модели	E, МПа ГОСТ 24452	E min, Мпа		E, МПа после догрузки длит. нагрузкой
		С вычетом быстронатек. полз.	Без вычета быстронатек. полз.	
Бетонные призмы 150 × 150 × 600 мм	55817 (+0.08 %)	54437(-2.47 %)	54008 (-3.24 %)	
	55688 (-0.15 %)	53468(-3.99 %)	51558 (-7.42 %)	
	55309 (-0.8%)	53306 (-3.43 %)	52485 (-4.92 %)	
	56990 (+2.18 %)	54276(-4.76 %)	53868 (-5.48 %)	
	55164 (-1.09 %)	52148 (-5.47 %)	51387 (-6.85 %)	
	<b>55772 (100 %)</b>	<b>53527 (-4.03 %)</b>	<b>52661 (-5.58 %)</b>	
СЖБ призмы 150 × 150 × 600 мм	58685 (+0,35 %)	56583 (-3,58 %)	55191 (-5,95 %)	
	58982 (+0,86 %)	58871 (-0,19 %)	58871 (-0,19 %)	
	58176 (-0,52 %)	58871 (+1,19 %)	57921 (-0,44 %)	
	59815 (+2,29 %)	60245 (+0,72 %)	59751 (-0,11 %)	
	56734 (-2,98 %)	56437 (-0,52 %)	55993 (-1,31%)	
	<b>58478 (100 %)</b>	<b>58201 (-0,47 %)</b>	<b>57545 (-1,6 %)</b>	
Бетонные призмы 100 × 100 × 400 мм	54785 (+0,05 %)	53764 (-1,86 %)	52477 (-4,21 %)	
	55144 (+0,7 %)	52320 (-5,12 %)	51386 (-6,81 %)	
	56621 (+3,4 %)	51645 (-8,79 %)	50739 (-10,39 %)	
	52668 (-3,82 %)	50143 (-4,79 %)	49263 (-6,47 %)	
	54578 (-0,33 %)	51527 (-5,59 %)	50607 (-7,28 %)	
	<b>54759 (100 %)</b>	<b>51880 (-5,26 %)</b>	<b>50894 (-7,06 %)</b>	
Бетонные цилиндры 150 × 300 мм	48101(-10,5 %)	45095 (-6,25 %)	44564 (-7,35 %)	
	54835 (+2,03 %)	51311(-6,43 %)	49410 (-9,89 %)	
	52335 (-2,62 %)	49323 (-5,76 %)	48714 (-6,92 %)	
	54314 (+1,06 %)	51919 (-4,41 %)	50587 (-6,86 %)	
	59141(+10,04 %)	55988 (-5,33 %)	54514 (-7,82 %)	
	<b>53745 (100 %)</b>	<b>50727 (-5,62 %)</b>	<b>49558 (-7,79 %)</b>	
Бетонные цилиндры 150 × 600 мм	58736 (+8,65 %)	56389 (-4 %)	54411 (-7,36 %)	
	52655 (-2,6 %)	50741 (-3,63 %)	49295 (-6,38 %)	
	52893 (-2,16 %)	50290 (-4,92 %)	49165 (-7,05 %)	
	53415 (-1,19 %)	51125 (-4,29 %)	49641 (-7,07%)	
	52594 (-2,71 %)	50455 (-4,07 %)	49641 (-5,61 %)	
	<b>54059 (100 %)</b>	<b>51800 (-4,18%)</b>	<b>50431 (-6,71 %)</b>	
Бетонные цилиндры 100 × 400 мм	45407 (-15,12 %)	43005 (-5,29 %)	40567 (-10,66 %)	
	54783 (+2,4 %)	52169 (-4,77 %)	51901 (-5,26 %)	
	47111 (-11,94 %)	44782 (-4,94 %)	42704 (-9,35 %)	
	61048 (+14,11%)	58407 (-4,33 %)	57417 (-5,95 %)	
	59138 (+10,54 %)	59552 (+0,7 %)	59095 (-0,07 %)	
	<b>53497 (100 %)</b>	<b>51583 (-3,58 %)</b>	<b>50337 (-5,91 %)</b>	

Наименование модели	E, МПа ГОСТ 24452	E min, Мпа		E, МПа после догрузки длит. нагрузкой
		С учетом быстронатек. полз.	Без вычета быстронатек. полз.	
Бетонные призмы 150 × 150 × 600 мм (длительные испытания)	53991 [-1.15 %]	52936 [-1.95 %]	52788 [-2.23 %]	52641 [-2.5 %]
	55251 [+1.15 %]	53084 [-3.92 %]	52641 [-4.72 %]	53534 [-3.11 %]
	54621 (100 %)	53010 [-2.95 %]	52715 [-3.49 %]	53088 [-2.81 %]
	53653 [-0.79 %]	53445 [-0.39 %]	53238 [-0.77 %]	52522 [-2.11 %]
	54503 [+0.79 %]	53758 [-1.37 %]	53135 [-2.51 %]	53084 [-2.6 %]
	<b>54078 (100 %)</b>	<b>53602 (-0.88 %)</b>	<b>53187 (-1.65 %)</b>	<b>52803 (-2.36 %)</b>
СЖБ призмы 150 × 150 × 600 мм (длительные испытания)	59594 [-1.11 %]	57954 [-2.75 %]	56402 [-5.36 %]	53084 [-10.92 %]
	60935 [+1.11 %]	58854 [-3.42 %]	58311 [-4.31 %]	57297 [-5.97 %]
	60265 (100 %)	58404 [-3.09 %]	57357 [-4.83 %]	55191 [-8.42 %]
	60790 [+0.1 %]	58745 [-3.36 %]	58908 [-3.1 %]	56097 [-7.72 %]
	60674 [-0.1 %]	58261 [-3.98 %]	58261 [-3.98 %]	53771 [-11.38 %]
	<b>60732 (100 %)</b>	<b>58503 (-3.67 %)</b>	<b>58585 (-3.54 %)</b>	<b>54934 (-9.55 %)</b>
Бетонные керны 100 × 400 мм из модели колонны П0	54384 [5.25 %]	50344 [-7.43 %]	49259 [-9.42 %]	
	48959 [-5.25 %]	45436 [-7.2 %]	45216 [-7.65 %]	
	<b>51672 (100 %)</b>	<b>47890 (-7.32 %)</b>	<b>47238 (-8.58 %)</b>	
Бетонные керны 100 × 400 мм из модели колонны П1	53277 [+2.68 %]	52814 [-0.87 %]	51803 [-2.77 %]	
	51911 [+0.04 %]	50491 [-2.74 %]	49652 [-4.35 %]	
	48903 [-5.75 %]	46313 [-5.3 %]	45537 [-6.88 %]	
	50397 [-2.87 %]	49983 [-0.82 %]	48880 [-3.01 %]	
	54955 [+5.91 %]	52689 [-4.12 %]	51091 [-7.03 %]	
	<b>51889 (100 %)</b>	<b>50458 (-2.76 %)</b>	<b>49393 (-4.81 %)</b>	
Бетонные керны 70 × 280 мм из модели колонны П1	54784 [+1.45 %]	54452 [-0.61 %]	53479 [-2.38 %]	
	54701 [+1.3 %]	54395 [-0.56 %]	54093 [-1.11 %]	
	54964 [+1.79 %]	54004 [-1.75 %]	53316 [-3 %]	
	53175 [-1.53 %]	52250 [-1.74 %]	51577 [-3.01 %]	
	52371 [-3.01 %]	52159 [-0.4 %]	51948 [-0.81 %]	
	<b>53999 (100 %)</b>	<b>53452 (-1.01 %)</b>	<b>52883 (-2.07 %)</b>	
Бетонные керны 100 × 400 мм из модели колонны П4	52368 [+3.23 %]	50676 [-3.23 %]	50676 [-3.23 %]	
	52358 [+3.21 %]	49596 [-5.28 %]	48566 [-7.24 %]	
	47465 [-6.44 %]	45767 [-3.58 %]	45011 [-5.17 %]	
	<b>50730 (100 %)</b>	<b>48680 (-4.04 %)</b>	<b>48084 (-5.22 %)</b>	

Резюмируя: при всех возможных рассмотренных сценариях работы бетона под нагрузкой разной длительности не удалось зафиксировать эффект снижения модуля упругости к величине близкой к 15 % для рассматриваемого состава бетона, это свидетельствует о принципиально другом деформировании высокопрочных бетонов и особенно бетонов с модифицированной структурой. Это хорошо видно на сравнительных графиках в координатах  $\sigma$ - $\epsilon$  исследуемого бетона и обычного бетона класса В25 (для корректности результатов такие испытания были проведены на одном прессовом оборудовании, одинаковом размере призм 150 × 150 × 600 и в одном возрасте), результаты приведены на рисунке 4.

На рисунке 5 приведены кривые нормативных значений начального модуля упругости в зависимости от класса бетона, с учетом снижения на 15 % в соответствии с СП 63.13330.2018, а также на основе полученных результатов. Для бетонов классов от В60 до В100 кривая построена на основе интерполяции.

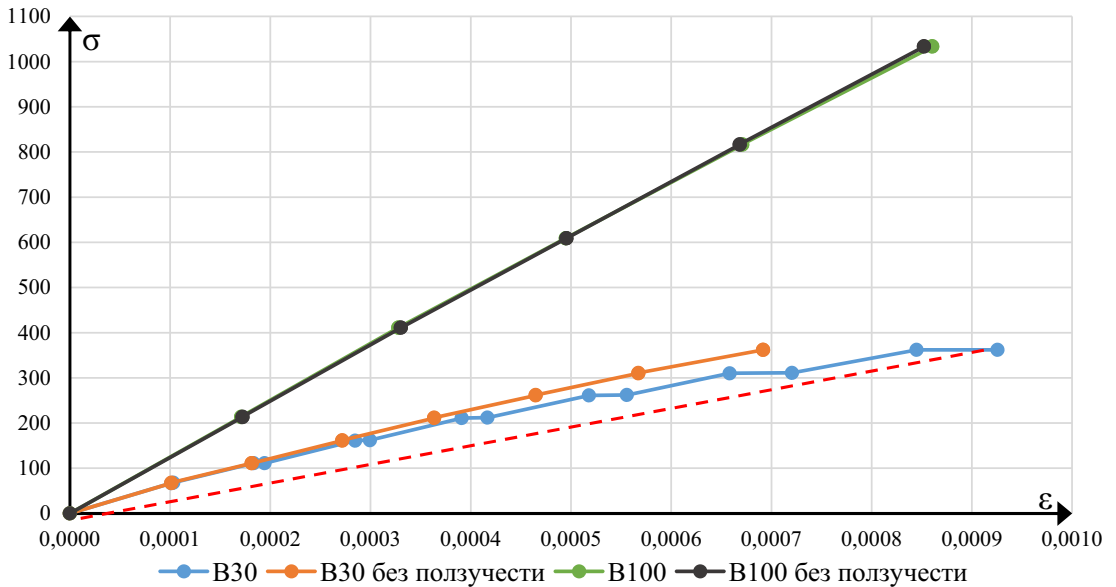


Рис. 4. Сравнительные графики деформирования бетонов В100 и В25  
 Fig. 4. Comparative graphs of deformation of concrete B100 and B25

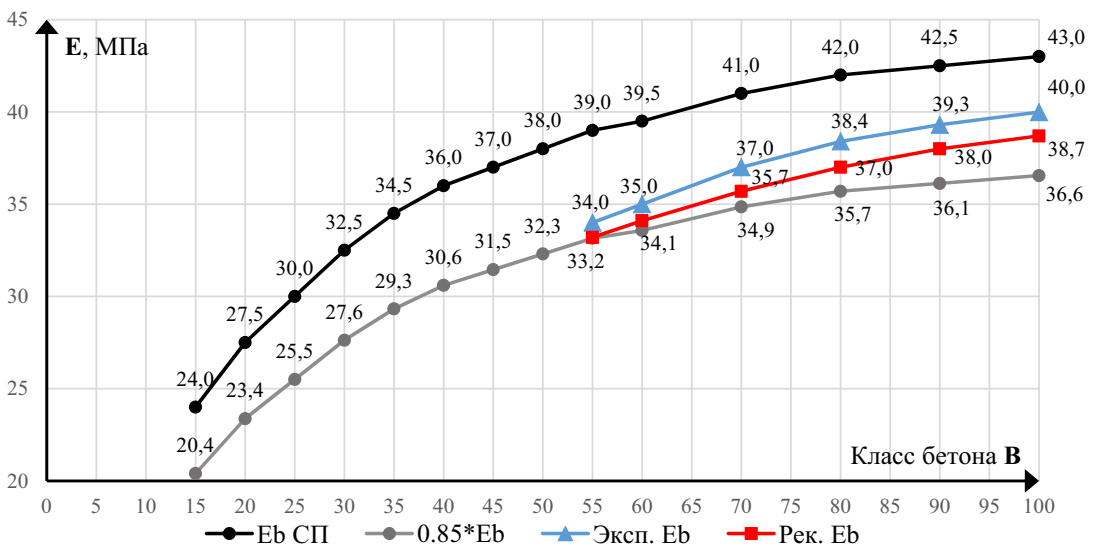


Рис. 5. Графики зависимости модуля упругости от класса бетона  
 Fig. 5. Graphs of the dependence of the modulus of elasticity on the concrete class

## Заключение

1. Для оценки применимости коэффициента 0,85, снижающего в соответствии с СП 63.13330.2018 начальный модуль упругости, к высокопрочным бетонам, была проведена комплексная экспериментально теоретическая работа, рассматривающая все возможные сценарии, при котором такое снижение возможно:

- влияние быстроснатекающей ползучести;
- влияние неупругих деформаций на разных этапах нагружения;
- влияние накопленных длительных деформаций за время эксплуатации здания при догружении кратковременным воздействием;
- влияние формы, размеров образцов и различные варианты нагружения при экспериментальном определении модуля упругости;
- влияние различных методик расчета модуля упругости на основе полученных экспериментальных данных.

2. В соответствии с разработанной программой работ были проведены экспериментальные исследования бетонных образцов-призм и цилиндров разных размеров, а также образцов-призм с внешним листовым армированием на одноосное сжатие по различным сценариям, описанным выше. По результатам проведенных испытаний, установлено:

- деформирование высокопрочных модифицированных самоуплотняющихся бетонов (B90–B100) с увеличенным значением начального модуля упругости, отличается от деформирования бетонов классов по прочности на сжатие от B15 до B55, широко исследовавшихся ранее и характеризуется практически линейной работой до разрушения образца, минимальным количеством накопленных внутренних микротрещин, что делает не в полной мере применимым к ним классических теорий деформирования и микротрещинообразования;

- наибольшее снижение модуля упругости, которое было зафиксировано при проведении различных испытаний на сжатие по различным сценариям, находилось в пределах 10 %, то есть минимальный коэффициент снижения модуля упругости бетона при действии кратковременных нагрузок составил 0,9 к начальному модулю упругости, что перекрывается действующим нормативным коэффициентом 0,85, для стандартных образцов (призмы  $150 \times 150 \times 600$ ) было зафиксировано снижение модуля упругости не более 7 % по отдельным образцам и в пределах 6 % если оценивать по среднему значению;

- результаты испытания призм с внешним листовым армированием, подтверждает применимость выводов, сделанных выше по результатам испытания бетонных образцов, к сталежелезобетону;

- разница значений начального модуля упругости образцов кернов, отобранных из конструкции и контрольных образцов цилиндров, составила до 5 %, что позволяет оценивать фактический модуль упругости по образцам, отобранным из конструкции.

3. Полученные результаты позволяют с достаточной обоснованностью при использовании в конструкциях высокопрочных модифицированных бетонов принимать снижающий коэффициент к модулю упругости сжатых элементов при непродолжительном воздействии 0,9 вместо 0,85, что позволит снизить горизонтальные перемещения высоких и сверхвысоких зданий как минимум на 5 %. Также необходимо отметить, что для зданий с разными конструктивными системами эта величина также будет отличаться и расчетные значения горизонтальных перемещений могут быть в диапазоне уже 5–10 %. Такой результат, разумеется, справедлив только для рассматриваемого состава бетона, однако с большой вероятностью близкие значения будут получены и для большей части высокопрочных бетонов, отличающихся линейным деформированием практически до разрушения.

## Список литературы

1. Берг О.Я., Щербаков Е.Н., Писанко Г.Н. Высокопрочный бетон. М.: Издательство литературы по строительству. 1971. 208 с.
2. Travush V.I. et al. The stiffness of steel-plate composite structures for short-term loads. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 2024, vol. 20, no. 4, pp. 105–118. doi: 10.22337/2587-9618-2024-20-4-105-118
3. Taube C., Flohr A., Morgenthal G. Experimental investigations on the influence of the short-term load history on the creep behaviour of normal concrete. *Construction and Building Materials*, 2025, no. 473(1), Article 121073.
4. Mustafa E. Mithaiwala, Prof. Amol A. Patil, Dr. Navnath V. Khadake. A Review on Effect of Different Set of Stiffness Modifiers Varying Through Height of Structure on Analysis of Multi-Story R.C.C. Structure. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 2020.
5. Гвоздев А.А., Дмитриев С.А., Немировский Я.М. О расчете перемещений (прогибов) железобетонных конструкций по проекту новых норм (СНиП II-V.1-62) // *Бетон и железобетон*. 1962. № 6. С. 245–250.
6. Гвоздев А.А., Дмитриев С.А., Гуца Ю.П., Залесов А.С., Мулин Н.М., Чистяков Е.А. Новое в проектировании бетонных и железобетонных конструкций. М.: Стройиздат, 1978. 208 с.
7. Залесов А.С., Кодыш Э.Н., Лемыш Л.Л., Никитин И. К. Расчет железобетонных конструкций по прочности, трещиностойкости и деформациям. Москва: Стройиздат, 1988. 320 с.
8. Иванов А. Развитие теории и прикладных методов оценки силового сопротивления монолитных гражданских зданий с учетом нелинейности деформирования: дис. д-ра тех. наук: 05.23.01 / Иванов Акрам. М., 2008. 361 с.
9. Каприелов С.С., Арленинов П.Д., Шейнфельд А.В., Калмакова П.С. Влияние относительной влажности воздуха на коэффициент ползучести высокопрочных самоуплотняющихся бетонов // *Строительные материалы*. 2025. № 10. С. 25–35. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2025-840-10-25-35>
10. Arleninov P. Short-term and long-term testing of beams made of high-strength concrete with different types of reinforcement; 2025; *Construction of Unique Buildings and Structures*; 120 Article No 12006. doi: 10.4123/CUBS.120.6
11. Мартиросян А.С., Травуш В.И., Кашеварова Г.Г. Исследование влияния геометрии жесткой арматуры на распределение нагрузки в элементах сталежелезобетонной конструкции // *Вестник ПНИПУ. Прикладная экология. Урбанистика*. 2017. № 1. С. 147–158. DOI: 10.15593/2409-5125/2017.01.13
12. Травуш В.И., Каприелов С.С., Конин Д.В., Крылов А.С., Чилин И.А. Экспериментальные исследования сталежелезобетонных конструкций, работающих на изгиб // *Строительство и реконструкция*. 2017;(4):63–71.
13. Тамразян А.Г., Арутюнян С.Н. К оценке надежности сталежелезобетонных плит перекрытий с профилированными настилами // *Вестник гражданских инженеров*. 2015. № 6(53). С. 52–57.
14. Varma A.N., Malushte S.R., Sener K.C., Lai Z. Steel-Plate Composite (SC) Walls for Safety Related Nuclear Facilities: Design for In-Plane Force and Out-of-Plane Moments. *Nuclear Engineering and Design*, 2014, vol. 269, pp. 240–249.
15. Travush V.I. et al. Static bearing capacity of steel-plate composite walls. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 2023, vol. 19, no. 4, pp. 166–181. doi: 10.22337/2587-9618-2023-19-4-166-181
16. Травуш В.И., Конин Д.В., Крылов А.С., Арленинов П.Д. [и др.]. Прочность и деформативность изгибаемых сталежелезобетонных элементов с листовым армированием с учетом трещин // *Строительство и реконструкция*. 2025. № 5(121). С. 42–56. DOI 10.33979/2073-7416-2025-121-5-42-56
17. Травуш В.И., Арленинов П.Д., Десяткин М.А. [и др.] Исследование ползучести сталежелезобетонных образцов // *Строительство и реконструкция*. 2024. № 1(111). С. 49–63. DOI 10.33979/2073-7416-2024-111-1-49-63. EDN AETEPS.
18. Kaprielov S.S. Control of Heavy Concrete Characteristics Affecting Structural Stiffness / S.S. Kaprielov, A.V. Sheinfeld, N.M. Selyutin. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2022, vol. 18, no. 1, pp. 24–39. DOI 10.22337/2587-9618-2022-18-1-24-39. EDN DWQHTT.
19. Kolchunov V., Fedorov S. Serviceability limit state parameters for high strength concrete structures. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 2024, vol. 20, no. 3, pp. 145–158. DOI: 10.22337/2587-9618-2024-20-3-145-158/
20. Крылов С.Б., Арленинов П.Д., Калмакова П.С. Сравнение методов испытаний на модуль упругости бетона по российским и зарубежным нормативным документам // *Строительные материалы*. 2022. № 9. С. 4–9. DOI 10.31659/0585-430X-2022-806-9-4-9. EDN KOHZOS.

## References

1. Berg O.Ya., Shcherbakov E.N., Pisanko G.N. High-Strength Concrete. Moscow, Publishing House of Literature on Construction, 1971, 208 p. (In Russian)
2. Travush V.I., et al. The stiffness of steel-plate composite structures for short-term loads. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 2024, vol. 20, no. 4, pp. 105–118. doi: 10.22337/2587-9618-2024-20-4-105-118
3. Taube C., Flohr A., Morgenthal G. Experimental investigations on the influence of the short-term load history on the creep behaviour of normal concrete. *Construction and Building Materials*, 2025, no. 473(1), Article 121073.
4. Mithaiwala M.E., Patil A.A., Khadake N.V. A review on effect of different set of stiffness modifiers varying through height of structure on analysis of multi-story R.C.C. structure. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 2020, vol. 7, issue 6, pp. 2395–0056.
5. Gvozdev A.A., Dmitriev S.A., Nemirovsky Ya.M. On the calculation of displacements (deflections) of reinforced concrete structures according to the draft of new codes (SNiP II-B.I-62). *Concrete and Reinforced Concrete*, 1962, no. 6, pp. 245–250. (In Russian)
6. Gvozdev A.A., Dmitriev S.A., Gushcha Yu.P., Zalesov A.S., Mulin N.M., Chistyakov E.A. New developments in the design of concrete and reinforced concrete structures. Moscow, Stroyizdat Publ., 1978. 208 p. (In Russian)
7. Zalesov A.S., Kodysh E.N., Lemysh L.L., Nikitin I.K. Analysis of reinforced concrete structures for strength, crack resistance and deformations. Moscow, Stroyizdat Publ., 1988. 320 p. (In Russian)
8. Ivanov A. Development of theory and applied methods for assessing the strength resistance of monolithic civil buildings considering nonlinear deformation. Doctoral thesis in Technical Sciences: 05.23.01. Moscow, 2008. 361 p. (In Russian)
9. Kaprielov S.S., Arleninov P.D., Sheinfeld A.V., Kalmakova P.S. Influence of relative air humidity on the creep coefficient of high-strength self-compacting concretes. *Construction Materials*, 2025, no. 10, pp. 25–35. (In Russian). doi: 10.31659/0585-430X-2025-840-10-25-35.
10. Arleninov P. Short-term and long-term testing of beams made of high-strength concrete with different types of reinforcement. *Construction of Unique Buildings and Structures*, 2025, vol. 120, Article 12006. doi: 10.4123/CUBS.120.6
11. Martirosyan A.S., Travush V.I., Kashevarova G.G. Study of the influence of rigid reinforcement geometry on load distribution in elements of steel-concrete composite structure. *PNRPU Bulletin. Applied Ecology. Urban Development*, 2017, no. 1, pp. 147–158. (In Russian). doi: 10.15593/2409-5125/2017.01.13
12. Travush V.I., Kaprielov S.S., Konin D.V., Krylov A.S., Chilin I.A. Experimental studies of steel-reinforced concrete structures under bending. *Building and Reconstruction*, 2017, no. 4, pp. 63–71. (In Russian).
13. Tamrazyan A.G., Arutyunyan S.N. On the reliability assessment of steel-concrete composite floor slabs with profiled sheeting. *Bulletin of Civil Engineers*, 2015, no. 6 (53), pp. 52–57. (In Russian).
14. Varma A.H., Malushte S.R., Sener K.C., Lai Z. Steel-plate composite (SC) walls for safety related nuclear facilities: Design for in-plane forces and out-of-plane moments. *Nuclear Engineering and Design*, 2014, vol. 269, pp. 240–249. doi: 10.1016/j.nucengdes.2013.09.019.
15. Travush V.I., et al. Static bearing capacity of steel-plate composite walls. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 2023, vol. 19, no. 4, pp. 166–181. doi: 10.22337/2587-9618-2023-19-4-166-181
16. Travush V.I., Konin D.V., Krylov A.S., Arleninov P.D., et al. Strength and deformability of bent steel-concrete composite elements with steel plates considering cracks. *Building and Reconstruction*, 2025, no. 5 (121), pp. 42–56. (In Russian). doi: 10.33979/2073-7416-2025-121-5-42-56.
17. Travush V.I., Arleninov P.D., Desyatkin M.A., et al. Investigation of creep of steel-concrete composite specimens. *Building and Reconstruction*, 2024, no. 1 (111), pp. 49–63. (In Russian). doi: 10.33979/2073-7416-2024-111-1-49-63.
18. Kaprielov S.S., Sheinfeld A.V., Selyutin N.M. Control of heavy concrete characteristics affecting structural stiffness. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 2022, vol. 18, no. 1, pp. 24–39. doi: 10.22337/2587-9618-2022-18-1-24-39.
19. Kolchunov V., Fedorov S. Serviceability limit state parameters for high strength concrete structures. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 2024, vol. 20, no. 3, pp. 145–158. doi: 10.22337/2587-9618-2024-20-3-145-158
20. Krylov S.B., Arleninov P.D., Kalmakova P.S. Comparison of test methods for concrete modulus of elasticity according to Russian and foreign normative documents. *Construction Materials*, 2022, no. 9, pp. 4–9. (In Russian). doi: 10.31659/0585-430X-2022-806-9-4-9.

## Сведения об авторе / Information about author

**Арленинов Петр Дмитриевич**, кандидат технических наук, заместитель заведующего лаборатории механики железобетона. Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона (НИИЖБ) им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Россия, г. Москва, 2-я Институтская ул., д. 6, к. 5, 109428.

Доцент кафедры железобетонных и каменных конструкций (ЖБК) ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Россия, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, г., 129337, arleninoff@gmail.com

**Arleninov Petr D.**, Candidate of Technical Sciences, Deputy Head of the Reinforced Concrete Mechanics Laboratory A.A. Gvozdev Research, Design and Technological Institute of Concrete and Reinforced Concrete (NIIZhB) JSC Research Center of Construction, Russian Federation, Moscow, 2nd Institutskaya str., 6, bld. 5, 109428.

Associate Professor of the Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures (RCS) FGBOU VO "National Research Moscow State Construction University" (NIU MSCU), Russian Federation, Moscow, Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, arleninoff@gmail.com