

П.Д. АРЛЕНИНОВ^{1,2}, С.Б. КРЫЛОВ¹

¹ Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона им. А.А. Гвоздева, г. Москва, Россия

² Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫСОКОПРОЧНЫХ БЕТОНОВ В СОСТАВЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Аннотация. Статья посвящена актуальным проблемам определения деформационных характеристик высокопрочных бетонов (В60–В100) в составе железобетонных конструкций. На основе обширных экспериментальных данных авторы демонстрируют несоответствие нормативных подходов СП 63.13330 и ГОСТ 24544, разработанных для бетонов обычной прочности, современным самоуплотняющимся модифицированным составам. Показано, что понижающий коэффициент 0,85 к модулю упругости для кратковременных нагрузок завышен и требует дифференциации по классу бетона. Выявлены значительные расхождения в методиках расчёта предельных деформаций ползучести и коэффициентов ползучести, особенно при учёте влажности. Предложены уточнённые значения и рекомендации по корректировке нормативных документов, а также обозначены перспективные направления дальнейших исследований релаксационных процессов и запредельного деформирования.

Ключевые слова: высокопрочный бетон; самоуплотняющийся бетон; модуль упругости; ползучесть; коэффициент ползучести; сталежелезобетон.

Для цитирования: Арленинов П.Д., Крылов С.Б. Актуальные проблемы исследований деформационных характеристик высокопрочных бетонов в составе железобетонных конструкций // Строительство и реконструкция. 2026. №4. С. 22-32. DOI: 10.33979/2073-7416-2026-126-4-22-32. EDN: NAWXGS

© Арленинов П.Д., Крылов С.Б., 2026



Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons NonCommercial license <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

Research Article

P.D. ARLENINOV^{1,2}, S.B. KRYLOV¹¹A.A. Gvozdev Research, Design, and Technological Institute of Concrete and Reinforced Concrete (NIIZHB),
Moscow, Russia²Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), Moscow, Russia

CURRENT ISSUES IN RESEARCH ON DEFORMATION CHARACTERISTICS OF HIGH-STRENGTH CONCRETE IN REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

Abstract. *The article is very strong, highly relevant, and of great practical value. It is based on unique, long-term experimental data and reveals real contradictions between current standards and the behaviour of modern concretes, offering concrete quantitative corrections. Particularly valuable are the new, previously unpublished findings on the elastic modulus after failure loads and on the influence of humidity on creep. The work is critical yet constructive — the authors not only point out shortcomings but also provide well-founded solutions. It will be useful for both structural engineers and code developers. Highly recommended for publication in a peer-reviewed journal.*

Keywords: *high-strength concrete; self-compacting concrete; modulus of elasticity; creep; creep coefficient; steel-reinforced concrete.*

For citation: Arleninov P.D., Krylov S.B. Current issues in research on deformation characteristics of high-strength concrete in reinforced concrete structures. *Building and Reconstruction*. 2026; 4: 22-32. DOI: 10.33979/2073-7416-2026-126-4-22-32. EDN: NAWXGS

Введение

Высокопрочные бетоны классов В60–В100 являются основным конструкционным материалом современного высотного, уникального и специального строительства [1]. Применение таких бетонов в каркасах высотных зданий, элементах ядер жёсткости и несущих конструкциях объектов атомной отрасли предъявляет повышенные требования к точности задания деформационных характеристик в расчётных моделях: модуля упругости, деформаций усадки и ползучести, относительных предельных деформаций. Ошибка в этих параметрах напрямую транслируется в ошибку в перемещениях элементов здания, перераспределении усилий в жёстких узлах и долгосрочном поведении конструкции.

Между тем основные положения действующей нормативной базы — прежде всего СП 63.13330.2018 и ГОСТ 24544 — были сформированы на основе испытаний бетонов обычной прочности в середине XX века. Появление современных модифицированных самоуплотняющихся бетонов со значительно изменённой поровой структурой и принципиально иным характером деформирования создало разрыв между нормативными предпосылками и реальной потребностью строительной отрасли. При этом обращает на себя внимание интересная комбинация фактов:

- бетоны, имеющие класс по прочности на сжатие ниже В60, могут быть как самоуплотняющимися, так и выполненными из жестких смесей с обязательным вибрированием, такие бетоны также могут иметь как модифицированную структуру цементного камня, так и стандартный набор компонентов (песок, щебень, вода, цемент).

- практически все современные высокопрочные бетоны имеют модифицированную структуру цементного камня и являются самоуплотняющимися.

Настоящая работа систематизирует ключевые особенности при определении набора деформационных характеристик таких бетонов, сложности в их научном обосновании, несоответствия, выявленные в ходе цикла исследований, проводимых авторами, и описывает пути их устранения.

Модели и методы

Работа железобетонных конструкций при кратковременных воздействиях

Основной деформационной характеристикой бетона при кратковременном воздействии, на которую опирается весь современный расчетно-аналитический аппарат, является начальный модуль упругости, коэффициент Пуассона, предельные относительные деформации бетона.

В соответствии с СП 63.13330.2018 при расчёте по второй группе предельных состояний на кратковременные нагрузки начальный модуль упругости бетона принимается с понижающим коэффициентом 0,85. Анализ отечественной технической литературы показывает, что данный коэффициент впервые был предложен А.А. Гвоздевым в 1962 г. для учёта неупругих деформаций при кратковременном нагружении бетонов обычной прочности [2]. В последующих работах его физический смысл неоднократно переосмысливался: в 1978 г. — как учёт быстронатекающей ползучести; в 1988 г. Залесов А.С. и Кодыш Э.Н. установили переменность коэффициента в зависимости от уровня нагружения и указали, что при различных сценариях нагружения значения этого коэффициента как могут приближаться к единице, так опускаться ниже нормативного значения 0,85 [3]. В зарубежных нормах (ACI 318-19, п. 6.6.3) разделение нагрузок на кратковременные и длительные при оценке жёсткости отсутствует вовсе, что свидетельствует об условности рассматриваемого коэффициента применительно к современным высокопрочным бетонам.

В связи с этим для оценки применимости коэффициента 0,85 к современным высокопрочным бетонам была проведена комплексная экспериментальная работа на более чем 100 образцах из самоуплотняющейся бетонной смеси В90–В100 с начальным модулем упругости 55 ГПа (призмы, цилиндры, сталежелезобетонные образцы с листовым армированием, керны из предварительно нагруженных колонн). Рассматривались все возможные сценарии снижения модуля: повышенные выдержки под нагрузкой (до 2 часов); нагрузки до 80% от разрушающей; предварительное обжатие в течение более 3 месяцев с последующим догружением без разгрузки; испытания кернов из образцов колонн, нагруженных до уровней от 0,3 до 0,8 от разрушающей нагрузки. По результатам всех сценариев максимальное снижение модуля упругости не превысило 10%, причем для образцов призм стандартного размера 150×150×600 мм — снижение составило не более 7% по отдельным образцам и около 6% в среднем по серии [4]. На основании полученных результатов при соответствующем теоретическом обосновании можно рекомендовать дифференцировать значение данного коэффициента в зависимости от класса бетона что при расчёте каркасов высотных зданий обеспечивает снижение расчётных горизонтальных перемещений на 5–10% — на рисунке 1 черным и серым цветом показаны графики зависимости начального модуля упругости от класса бетона без учета и с учетом снижения, синим и красным по результатам экспериментов и рекомендуемые значения.

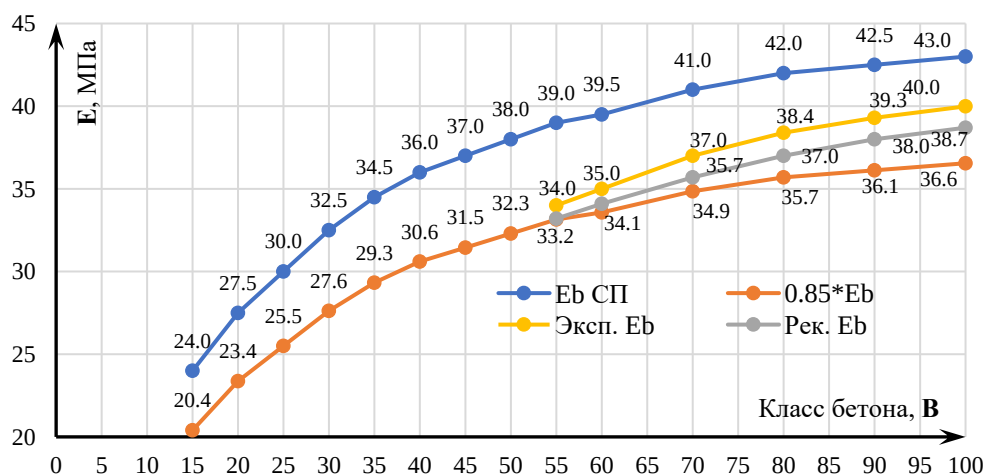


Рисунок 1 – Графики зависимости модуля упругости от класса бетона

Полученные результаты объясняются принципиально иным механизмом деформирования высокопрочных модифицированных бетонов — практически линейная диаграмма σ – ε вплоть до хрупкого разрушения, минимальное накопление внутренних микродефектов, крайне малые деформации быстроснатекающей ползучести. Для оценки механики деформирования рассматриваемых бетонов были проведены обширные экспериментально-теоретические исследования, для определения границ трещинообразования и возможности применимости существующих теорий для описания их работы под нагрузкой [5]. Первые исследования процессов микро трещинообразования и, соответственно, линейности работы бетона в зависимости от уровня напряжений были праведны американскими специалистами из Корнуэльского Университета, под руководством профессора Винтера [6] в 60-70-ых годах прошлого столетия (на основе этих экспериментов построено большинство последующих теоретических исследований), было определено, что микротрещины в бетоне начинают развиваться примерно после уровня 0,4-0,5 от разрушающей нагрузки (что в какой-то мере соответствует урону расчетного сопротивления бетона) и ближе к уровням напряжений 0,7-0,8 от разрушающей нагрузки интенсивность микро разрушений значительно возрастает. В продолжение этих исследований была разработана фундаментальная методика О.Я. Берга [7], на основе которой базируются все дальнейшие предложенные теории [8].

Испытания проводились на референсных образцах различных типоразмеров (призмы со стороной 100 и 150 мм и цилиндры Ø150мм высотой 300 и 600мм), на которых определялся модуль упругости и разрушающая нагрузка R_1 в соответствии с ГОСТ24452; образцах близнецах, которые нагружались деформациями и использовались для получения ниспадающей ветви и определения пикового значения нагрузки которую выдерживает образец R_2 (эта нагрузка хотя и близка к R_1 , получаемой при стандартном испытании в соответствии с ГОСТ24452, но несколько ниже вследствие отсутствия эффекта динамического удара при напряжениях близких к разрушению); образцах, которые вначале нагружались деформациями до пикового значения разрушающей нагрузки, после этого разгружались выдерживались определенное время и далее испытывались на модуль упругости и в последствии до разрушения R_3 . Полученные результаты сравнивались со значениями модуля упругости, полученными на этих же образцах в начале эксперимента, общая схема испытания приведена на рисунке 2а.

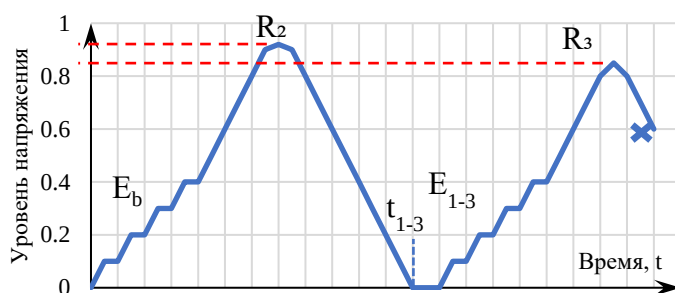


Рисунок 2а – Описание режима испытания для определения модуля упругости после работы в запредельном состоянии в осях «уровень напряжения – время испытания»

Рисунок 2б – Образец, доведенный до пиковой разрушающей нагрузки

Определение уровня начала образования микротрещин в бетоне определялось по О.Я. Бергу [7] для этого на каждом этапе нагружения образцы в прессе прозвучивались с помощью приборов ультразвукового контроля. Выполнялось как поверхностное, так и сквозное прозвучивание с помощью приборов УК-1401 и Пульсар 1.0 соответственно. Полученные результаты показали, что классические теории по определению уровня

микротрещинообразования и их производные не применимы в полной мере к высокопрочным бетонам.

Помимо определения границ микротрещинообразования исследовалось поведение рассматриваемого материала в так называемом запредельном состоянии — на рисунке 2b показан образец, доведенный до пиковой разрушающей нагрузки (сразу же сброшенной после нагружения) для последующего испытания на модуль упругости. Из рисунка видно, что образец сохранил форму, но получил ряд повреждений (сколы и трещины), которые видны невооруженным глазом, такие дефекты присутствовали на образцах всех видов.

По результатам испытаний были зафиксированы следующие значения модуля упругости после достижения бетоном предельной нагрузки и различной выдержки после разгрузки перед новым нагружением в сравнении с начальным модулем упругости, определенного непосредственно на этом же образце.

$E_b = 53,0$ ГПа – средний начальный модуль упругости для всех серий образцов.

$E_{b1} = 52,3-59,1$ ГПа

$E_1 = 1,41-1,71 E_{b1}$ (73,6-101,1 ГПа) – начальный модуль упругости для серии образцов и модуль упругости, определенный практически сразу же после доведения до разрушающей нагрузки с последующей разгрузкой (выдержка для релаксации остаточных напряжений составила около 1 часа).

$E_{b2} = 54,3$ ГПа, $E_2 = 1,06 E_{b2}$ (57,7 ГПа) – начальный модуль упругости для серии образцов и модуль упругости, определенный на разгруженных образцах с выдержкой в свободном состоянии, равной 8 суток.

$E_{b3} = 52,0-57,8$ ГПа, $E_3 = 1,00 E_{b3}$ (52,0-58,0 ГПа) – начальный модуль упругости для серии образцов и модуль упругости, определенный на разгруженных образцах с выдержкой в свободном состоянии, равной 1-3 суток.

Результаты исследования и их анализ

Анализируя данные результаты видно, что при небольших выдержках после доведения образца до разрушающей нагрузки, несмотря на накопленные в нем повреждения произошло значительное увеличение модуля упругости бетона от 1,4 до 1,7 раза. Возможно, это связано с механикой деформирования высокопрочного бетона при сверхвысоких нагрузках – практически линейное деформирования до разрушения, минимальное количество накопленных внутренних дефектов (микротрещин) и закрытие их при еще большем уровне напряжений, определенная инерционность процесса релаксации внутренних напряжений после снятия сжимающей нагрузки. Эти результаты являются новыми и ранее не опубликованными.

При выдержках сутки и более происходит значительная релаксация внутренних напряжений в образце и полученные значения модуля упругости оказываются близкими к начальному модулю упругости ($\pm 6\%$). Такие результаты также крайне необычны поскольку уже разрушенный образец сохранил свои основные начальные деформационные характеристики.

Крайне важным моментом в данном случае является величина выдержки, достаточная чтобы остаточные напряжения после разгрузки релаксировали. Точное ее значение будет зависеть от многих факторов, в первую очередь от состава бетонной смеси, то есть для каждого типа бетона она может быть своя. В результате данного эксперимента рассматривались несколько сценариев выдержки образца после первоначальной загрузки и усреднённой величиной можно принять одни сутки как полностью достаточную выдержку для релаксации всех внутренних напряжений.

Испытания показали, что при коротких выдержках произошло значительное увеличение модуля упругости, но одновременно произошло падение прочности бетона. При выдержках более суток произошла стабилизация всех данных с приближением к начальным

результатам. Эти результаты представляют огромный интерес и подтверждают одну из важнейших ролей процесса релаксации напряжений в бетоне. Процессы релаксации вообще исследованы недостаточно, при этом если теоретические работы в можно найти, то экспериментальные исследования являются единичными [9].

В исследованиях, рассмотренных выше, особое внимание уделялось форме и размерам образцов, и это неслучайно, проведенный анализ [10] основных этапов проведения испытаний по определению модуля упругости выявил серьезные отличия в подходах ГОСТ 24452 и зарубежных стандартов ISO 1920-10, ASTM C469, BS EN 12390 (между собой все зарубежные стандарты относительно гармонизированы, хотя также присутствуют отличия). Основных отличия два, хотя на самом деле их значительно больше, начиная измерительным оборудованием и заканчивая расчетом и оформлением результатов.

Первое, это отличия в отношении ширины или диаметра образца к его высоте (для ГОСТ 24452 отношение $\frac{1}{4}$, для зарубежных стандартов $\frac{1}{2}$).

Второе, разный подход к режимам загрузки, за рубежом образец нагружается монотонно за несколько циклов с обязательной разгрузкой для выборки неупругих деформаций, в ГОСТ 24452 – нагружение происходит ступенями с выдержкой и фиксацией напряжений для последующего вычета из общих деформаций деформаций быстроснабжающей ползучести. На рисунке 3 приведены схемы загрузки по всем рассмотренным стандартам, сведенные в одних координатах.

Указанные отличия при проведении испытаний могут оказывать влияние на получаемые результаты, что в свою очередь может привести к разнице значений модулей упругости для соответствующих по прочности классов бетона по российским нормам и зарубежным. Также это важно, поскольку в зарубежных нормативных документах помимо табличных значений модуля упругости (в зависимости от класса бетона) можно получить расчетным путем значения модуля на более прочных заполнителях в любом возрасте и т.д. По российским нормам такие результаты можно получить только путем испытаний.

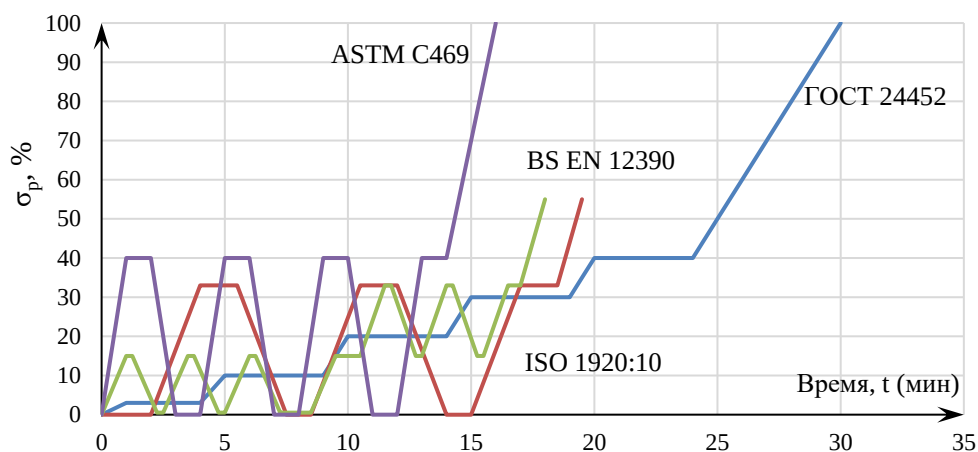


Рисунок 3 - Сравнительный график загрузки образцов при различных методах проведения испытаний по определению модуля упругости по ГОСТ, ISO, BS EN, ASTM

Работа железобетонных конструкций при длительных воздействиях

Длительные испытания по определению ползучести бетона — одно из наиболее сложных и ресурсоёмких направлений экспериментальных исследований. Для их проведения требуются климатические помещения со стабильными параметрами среды, специализированные установки, поддерживающие постоянную нагрузку в течение 6 месяцев и более, установленные в этих климатически помещениях, большое количество систем оснастки и съема показаний. Это делает такие исследования редкими и результаты их крайне ценными. Причем это справедливо не только для нашей страны, но и за рубежом. Применительно к высокопрочному бетону ситуация осложняется. При таких испытаниях повышаются требования к испытательному оборудованию (требуется создание более

высоких уровней напряжений). Высокопрочные бетоны широкое развитие особенно в нашей стране получили относительно недавно. Одновременно это совпало с развалом Советского Союза и практически полной остановкой всех экспериментальных исследований в этом направлении. Это привело к тому огромное количество экспериментальных [11-13] и теоретических исследований [14-16] проведенных ранее, устарели. Как будет показано ниже, к современным бетонам полученные ранее результаты могут быть применимы только с рядом ограничений и это особенно печально, поскольку советская научная школа была сильнейшей в мире и это признавалось ведущими зарубежными специалистами

При сравнения различных методик испытаний по определению деформаций ползучести бетона между российским ГОСТ 24544 и зарубежными стандартами ISO 1920-9, ASTM C512, EN 12390-17 отличий оказалось еще больше, чем при сравнении методик по определению модуля упругости [17]. Самыми принципиальными, оказывающими сдерживающий эффект на проведение широких исследований в этой области являются:

- во-первых, способ передачи нагрузки на образец, в России нагрузка на образцы передается через стальной шарик на опорные пластинки, приклеенные к образцу, и в купе с соотношением ширины к высоте образца 1 к 4 в пружинную или гидравлическую установку обычно ставится только один, максимум два и в крайне редком случае три образца (огромные установки и сложность центрирования). Западные стандарты регламентируют передачу усилия на образец и между образцами через плоский контакт выполненный из специального раствора на основе серы, и имея соотношения сторон образца 1 к 2 в установки свободно устанавливаются 4 и даже 5 образцов, то есть получается полноценная серия в одной компактной установке (рисунок 4).

- во-вторых, за рубежом периодические снятия показаний осуществляются с использованием переносных деформометров, работающих по принципу DEMEC которые с точностью 0,001 мм измеряют расстояние между специальными метками, приклеенными к образцу (рисунок 4). Только в 2020 году в актуализированной редакции ГОСТ 24544 добавилась возможность проводить измерения таким образом, несмотря на это и в настоящее время большая часть испытаний проводится с использованием стандартных рамок и механических индикаторов часового типа, с одной стороны это обеспечивает требуемую точность и удобство снятия показаний, с другой - требует огромного количества поверенных датчиков, накладываются ограничения по проведению испытаний при повышенной влажности, повышенных температурах и испытаний образцов увеличенных габаритов.

По результатам испытаний по определению деформаций ползучести бетона уже расчетным путем вычисляется коэффициент ползучести бетона $\varphi_{b,cr}$, который в свою очередь входит в основную формулу (1) для определения модуля упругости бетона при длительно действующей нагрузке $E_{b,T}$



Рисунок 4 - Испытания по определению ползучести бетона по ASTM C512 (слева) ГОСТ 24544 (справа)

$$\varphi_{b,cr} = \frac{\varepsilon_{п}}{\varepsilon_{уп}}, \quad E_{b,\tau} = \frac{E_b}{1 + \varphi_{b,cr}} \quad (1)$$

Величины $\varepsilon_{уп}$ и $\varepsilon_{п}$ представляют собой упругую и ползучую часть общей деформации образца (в относительных единицах) под длительно действующей нагрузкой. При этом $\varepsilon_{п}$ является предельной относительной деформацией ползучести бетона, то есть это максимальная возможная деформация образца при бесконечно большом времени приложения нагрузки. Понятно, что получить предельную относительную деформацию из реальных данных эксперимента можно только путем вероятностного прогнозирования. В ГОСТ 24544 приведена методика определения $\varepsilon_{п}$ с использованием линеаризации построенной по точкам функции ползучести. Для линеаризации осуществляется переход из координат $\varepsilon - t$ в координаты $t/\varepsilon - t$. После построения линии регрессии в координатах $t/\varepsilon - t$ определяется предельное значение относительных деформаций ползучести равное котангенсу угла наклона данной прямой к оси абсцисс (t). Эта методика впервые была предложена в 1981 году и с тех пор не менялась. Ниже в табличном виде приведены результаты расчета предельных деформаций ползучести бетона для нескольких составов тяжелого и легкого высокопрочного бетона классов по прочности на сжатие B60-B100, отличающихся модулем упругости и испытанными при разных влажностях [18]. По данной методике вычислялись предельные деформации ε_{cr}^1 . Также приведены последние зафиксированные значения по результатам испытаний ε_{cr}^2 , которые длились значительно более 180 суток (срок испытания по ГОСТ 24544) и по которым фиксировалось практически полное затухание деформаций ползучести в течении последних месяцев. Как видно из таблицы 1 при отдельных сценариях испытаний фиксируются отличия расчетных предельных относительных деформаций от полученных экспериментально, более чем в 1,6 раза. Учитывая длительность испытаний и затухающей характер кривой можно сделать вывод о значительных погрешностях при использовании методики ГОСТ применительно к высокопрочным бетонам.

Таблица 1 - Предельные деформации и коэффициенты ползучести

Класс бетона (Модуль упругости, ГПа), влажность, %	Относительные деформации ползучести			Коэффициент ползучести, $\varphi_{b,cr}^1 / \varphi_{b,cr}^2$
	$\varepsilon_{cr}^1 \cdot 10^5$	$\varepsilon_{cr}^2 \cdot 10^5$	$\varepsilon_{cr}^1 / \varepsilon_{cr}^2$	
B100 (55,0) W=60	13,81	12,3	1,13	0,26 / 0,24
B100 (44,6) W=60	37,0	25,5	1,45	0,59 / 0,41
B100 (40,5) W=20	63,2	39,2	1,61	0,99 / 0,61
B70 (40,5) W=20	50,6	40,5	1,25	0,89 / 0,71
B70 (40,5) W=60	28,6	27,5	1,04	0,52 / 0,50
B60л (40,5) W=20	28,2	25,8	1,09	0,48 / 0,44
B60л (40,5) W=90	13,3	10,1	1,32	0,21 / 0,16

Из таблицы 1 наглядно видно, как сильно влияет фактическая влажность на результаты испытаний относительно стандартной влажности 60% по ГОСТ 24544 для одних и тех же классов бетона. До последнего времени в России не было испытательных площадок, на которых такие испытания можно провести, а их важность невозможно переоценить. В своде правил по железобетону СП 63.13330 приведено единое значение коэффициентов ползучести для всех классов высокопрочных бетона от B60 до B10 (2,0 для W =20%, 1,0 для W =60% и 1,0 для W =60%). Эти цифры были и приняты в 2000-ых годах на основе обзора литературных источников для бетона класса B60 и распространены на высокопрочные бетоны, в зарубежных нормативных документах причем такая дифференциация есть (рисунок 5.) В 2024г. на испытательной площадке НИИЖБ им. А.А. Гвоздева были

подготовлены залы длительных испытаний, позволяющих проводить параллельные испытания в трех влажностях от 20 до 95%.

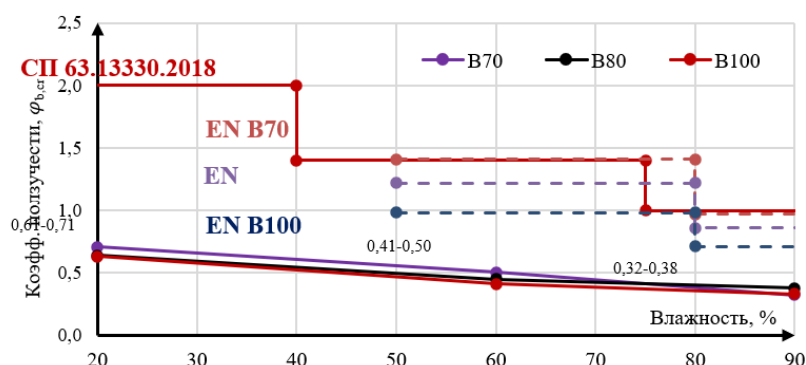


Рисунок 5 - Сравнение экспериментальных значений коэффициентов ползучести для бетонов классов В70-В100 при разной относительной влажности воздуха с их нормативными значениями по СП 63.13330.2018 и Еврокод EN 12390

В 2024-2025 г.г. была проведена комплексная экспериментально-теоретическая работа [18] по исследованию влияния влажности на коэффициенты ползучести высокопрочных бетонов с дифференциацией по классу и типу бетона (тяжелый легкий).

Полученные результаты свидетельствуют о значительных возможных резервах при назначении коэффициентов ползучести высокопрочных бетонов (на рисунке 5 коэффициенты ползучести определены по последним зафиксированным деформациям после их затухания). Эти данные являются крайне важными как для высотного строительства, так и для ответственных большепролетных конструкций, где жесткостные параметры могут быть важнее прочностных.

Заключение

В ходе комплексных исследований длительных и кратковременных деформационных характеристик железобетонных конструкций из обычных и высокопрочных бетонов, которая началась с 2017 года и продолжается по настоящее время авторами были получены следующие результаты:

1. Подготовлены и оснащены передовые испытательные площадки, позволяющие проводить параллельные длительные испытания образцов бетона и элементов железобетонных конструкций любого класса по прочности при сжатии, изгибе, различной влажности, воздействиях повышенных температур, режиме двухосного сжатия, экспериментального определения релаксации;

2. Разработаны методики проведения длительных и кратковременных испытаний, отличающихся от положений ГОСТ24544, а также методики расчета модуля упругости и прогнозирования деформаций ползучести бетона;

3. Определены недостаточно изученные научные области, в том числе и в нормативных документах, в части исследования деформационных характеристик высокопрочных бетонов;

4. Подготовлены предложения по учету особенностей деформирования железобетонных и сталежелезобетонных конструкций, выполняемых из высокопрочных бетонов, в нормативных документах и инженерных расчетах

В настоящей статье описана только часть проблем при исследовании высокопрочных бетонов и конструкций из них, эти работы в обязательном порядке должны продолжаться причем с вовлечением большего количества специалистов в области строительного материаловедения и железобетонных конструкций поскольку современные высокопрочные бетоны, учитывая входящее в них значительное количество разных компонентов даже в рамках одного класса могут иметь качественно разные деформационные характеристики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В. и др. Технология возведения конструкций каркасов высотных зданий из высокопрочных бетонов классов В60–В100 // Вестник НИЦ «Строительство». 2022. № 33(2). С. 106–121. DOI: 10.37538/2224-9494-2022-2(33)-106-121. EDN: MWKCIE.
2. Гвоздев А.А., Дмитриев С.А., Гуца Ю.П. и др. Новое в проектировании бетонных и железобетонных конструкций. М.: Стройиздат, 1978. 208 с.
3. Залесов А.С., Кодыш Э.Н., Лемыш Л.Л., Никитин И.К. Расчет железобетонных конструкций по прочности, трещиностойкости и деформациям. М.: Стройиздат, 1988. 320 с.
4. Арленинов П.Д. Применимость нормативного подхода снижения модуля упругости при непродолжительных воздействиях для высокопрочных бетонов // Вестник НИЦ «Строительство». 2026. № 48(1). С. 7–20. DOI: 10.37538/2224-9494-2026-1(48)-07-20. EDN: DPMORZ.
5. Arleninov P.D. High-strength concrete behavior in post-limit conditions // Magazine of Civil Engineering. 2025. 18(8). DOI: 10.34910/MCE.140.2
6. Hsu T.T.C., Slate F.O., Sturman G.M., Winter G. Microcracking of Plain Concrete and the Shape of Stress-Strain Curve // JACI. 1963. 60(2). Pp. 209–223. DOI: 10.14359/7852.
7. Берг О.Я., Щербakov Е.Н., Писанко Г.Н. Высокопрочный бетон. М.: Издательство литературы по строительству, 1971. 208 с.
8. Istomin A.D., Belikov N.A. Dependence of the Borders of the Microcreeping in Concrete from Strengths and Strain Condition // Bulletin of MGSU. 2011. 2-1. Pp. 159–162. EDN: OUVYTL.
9. Арленинов П.Д., Крылов С.Б., Калмакова П.С. и др. Экспериментальные исследования процесса релаксации бетона в разных режимах // Вестник НИЦ «Строительство». 2023. № 1(36). С. 86–98. DOI: 10.37538/2224-9494-2023-1(36)-86-98. EDN: LMVDTU.
10. 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.
11. Александровский С.В. Расчет бетонных и железобетонных конструкций на изменения температуры и влажности с учетом ползучести. М.: Стройиздат, 1973. 432 с.
12. Арутюнян Н.Х. Некоторые вопросы теории ползучести. М.: Гостехиздат, 1952. 324 с.
13. Тамразян А.Г., Есаян С.Г. Механика ползучести бетона. М.: МГСУ, 2012. 490 с. ISBN: 978-5-7264-0664-0. EDN: QNQFSB.
14. Тамразян А.Г. Жесткость изгибаемых железобетонных элементов с учетом нелинейной ползучести высокопрочного бетона на основе вязкоупругой модели наследственного старения // Вестник МГСУ. 2011. № 2-1. С. 121–126. EDN: OUVYQT.
15. Бондаренко В.М. Некоторые вопросы нелинейной теории железобетона. Харьков: Изд-во Харьковского ун-та, 1968. 324 с.
16. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. М.: Стройиздат, 1996. 413 с.
17. Арленинов П.Д., Крылов С.Б., Корнюшина М.П. Сравнение методов проведения длительных испытаний на ползучесть бетона в соответствии с российскими и зарубежными нормативными документами. Часть 1: Образцы и оборудование // Вестник НИЦ «Строительство». 2020. № 4(27). С. 5–17. DOI: 10.37538/2224-9494-2020-4(27)-5-17. EDN: BGUJFM.
18. Каприелов С.С., Арленинов П.Д., Шейнфельд А.В. и др. Влияние относительной влажности воздуха на коэффициент ползучести высокопрочных самоуплотняющихся бетонов // Строительные материалы. 2025. № 10. С. 25–35. DOI: 10.31659/0585-430X-2025-840-10-25-35. EDN: BYVKCZ.

REFERENCES

1. Kaprielov S.S., Sheinfeld A.V. et al. Technology for constructing frame structures of high-rise buildings from high-strength concretes of classes B60–B100. *Bulletin of the Research Center "Construction"*. 2022. No. 33(2). Pp. 106–121. (In Russ.) DOI: 10.37538/2224-9494-2022-2(33)-106-121, EDN: MWKCIE
2. Gvozdev A.A., Dmitriev S.A., Gushcha Yu.P. et al. New Developments in the Design of Concrete and Reinforced Concrete Structures. Moscow: Stroyizdat, 1978. 208 p. (In Russ.)
3. Zalesov A.S., Kodysh E.N., Lemysh L.L., Nikitin I.K. Calculation of Reinforced Concrete Structures for Strength, Crack Resistance and Deformations. Moscow: Stroyizdat, 1988. 320 p. (In Russ.)
4. Arleninov P.D. Applicability of the standard approach for reducing the elastic modulus under short-term loading for high-strength concretes. *Bulletin of the Research Center "Construction"*. 2026. No. 48(1). Pp. 7–20. (In Russ.) DOI: 10.37538/2224-9494-2026-1(48)-07-20, EDN: DPMORZ
5. Arleninov P.D. High-strength concrete behavior in post-limit conditions. *Magazine of Civil Engineering*. 2025. 18(8). DOI: 10.34910/MCE.140.2
6. Hsu T.T.C., Slate F.O., Sturman G.M., Winter G. Microcracking of Plain Concrete and the Shape of Stress-Strain Curve. *JACI*. 1963. 60(2). Pp. 209–223. DOI: 10.14359/7852
7. Berg O.Ya., Shcherbakov E.N., Pisanko G.N. High-Strength Concrete. Moscow: Publishing House of Literature on Construction, 1971. 208 p. (In Russ.)
8. Istomin A.D., Belikov N.A. Dependence of the Borders of the Microcreeping in Concrete from Strength and Strain Condition. *Bulletin of MGSU*. 2011. 2-1. Pp. 159–162. EDN: OUVYTL

9. Arleninov P.D., Krylov S.B., Kalmakova P.S. et al. Experimental studies of concrete relaxation process under different loading regimes. *Bulletin of the Research Center "Construction"*. 2023. No. 1(36). Pp. 86–98. (In Russ.) DOI: 10.37538/2224-9494-2023-1(36)-86-98, EDN: LMVDTU
10. Krylov S.B., Arleninov P.D., Kalmakova P.S. Comparison of test methods for concrete elastic modulus according to Russian and foreign regulatory documents. *Construction Materials*. 2022. No. 9. Pp. 4–9. (In Russ.) DOI: 10.31659/0585-430X-2022-806-9-4-9, EDN: KOHZOS
11. Alexandrovsky S.V. Calculation of Concrete and Reinforced Concrete Structures for Temperature and Moisture Changes Considering Creep. Moscow: Stroyizdat, 1973. 432 p. (In Russ.)
12. Arutyunyan N.Kh. Some Problems of Creep Theory. Moscow: Gostekhizdat, 1952. 324 p. (In Russ.)
13. Tamrazyan A.G., Yesayan S.G. *Mechanics of Concrete Creep*. Moscow: MGSU, 2012. 490 p. (In Russ.) EDN: QNQFSB
14. Tamrazyan A.G. Stiffness of bent reinforced concrete elements considering the nonlinear creep of high-strength concrete based on a viscoelastic model of hereditary aging. *Vestnik MGSU*. 2011. No. 2-1. Pp. 121–126. (In Russ.) EDN: OUVYQT
15. Bondarenko V.M. Some Problems of the Nonlinear Theory of Reinforced Concrete. Kharkiv: Kharkiv University Press, 1968. 324 p. (In Russ.)
16. Karpenko N.I. General Models of Reinforced Concrete Mechanics. Moscow: Stroyizdat, 1996. 413 p. (In Russ.)
17. Arleninov P.D., Krylov S.B., Korniyushina M.P. Comparison of methods for conducting long-term concrete creep tests in accordance with Russian and foreign regulatory documents. Part 1: Specimens and equipment. *Bulletin of the Research Center "Construction"*. 2020. No. 4(27). Pp. 5–17. (In Russ.) DOI: 10.37538/2224-9494-2020-4(27)-5-17, EDN: BGUJFM
18. Kapriylov S.S., Arleninov P.D., Sheinfeld A.V. et al. Effect of relative air humidity on the creep coefficient of high-strength self-compacting concretes. *Construction Materials*. 2025. No. 10. Pp. 25–35. (In Russ.) DOI: 10.31659/0585-430X-2025-840-10-25-35, EDN: BYVKCZ

Сведения об авторах:

Арленинов Петр Дмитриевич, кандидат технических наук, доцент кафедры железобетонных и каменных конструкций, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия; заместитель заведующего лабораторией № 8 «Механики железобетона» НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», г. Москва, Россия. <https://orcid.org/0000-0003-4737-1549>. Email: arleninoff@gmail.com.

Крылов Сергей Борисович, академик РААСН, доктор технических наук, заведующий лабораторией № 8 «Механики железобетона» НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», г. Москва, Россия. <https://orcid.org/0009-0006-5633-399X>. Email: niizhb_lab8@mail.ru.

About the authors:

Petr D. Arleninov, Candidate of Technical Sciences, Docent of the Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia; Deputy Head of Laboratory No. 8 "Reinforced Concrete Mechanics", A.A. Gvozdev Research Institute of Reinforced Concrete, JSC "Research Center "Construction", Moscow, Russia. <https://orcid.org/0000-0003-4737-1549>. Email: arleninoff@gmail.com.

Sergey B. Krylov, Member of the RAACS, Doctor of Technical Sciences, Head of Laboratory No. 8 "Reinforced Concrete Mechanics", A.A. Gvozdev Research Institute of Reinforced Concrete, JSC "Research Center "Construction", Moscow, Russia. <https://orcid.org/0009-0006-5633-399X>. Email: niizhb_lab8@mail.ru.

Вклад авторов: авторы внесли равный вклад в работу.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Авторы утвердили окончательный вариант статьи.

The authors declare no conflict of interest.

The authors have approved the final version.

Статья поступила в редакцию 20.07.2026
Одобрена после рецензирования 02.08.2026
Принята к публикации 13.08.2026

The article was submitted 20.07.2026
Approved after reviewing 02.08.2026
Accepted for publication 13.08.2026