

С.С. КАПРИЕЛОВ¹, д-р техн. наук, академик РААСН (kapriellov@mail.ru),
А.В. ШЕЙНФЕЛЬД¹, д-р техн. наук, советник РААСН;
В.И. ТРАВУШ², д-р техн. наук, проф., академик РААСН;
Н.И. КАРПЕНКО³, д-р техн. наук, проф., академик РААСН;
С.Б. КРЫЛОВ¹, д-р техн. наук, член-корр. РААСН

¹ Научно-исследовательский проектно-конструкторский институт бетона и железобетона им. А.А. Гвоздева

АО «Научно-исследовательский центр «Строительство» (109428, г. Москва, ул. 2-я Институтская, 6, корп. 5)

² АО «Городской проектный институт жилых и общественных зданий» (105064, г. Москва, Нижний Сусальный пер., 5, стр. 5А)

³ Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН (127238, г. Москва, Локомотивный пр., 21)

Оценка прочностных и деформационных характеристик высокопрочных бетонов в конструкциях и динамики их изменения во времени

По данным многочисленных производственных и лабораторных испытаний проведен анализ фактических значений основных нормируемых прочностных и деформационных характеристик высокопрочных бетонов классов В60–В100: предельного сопротивления осевому сжатию, начального модуля упругости и коэффициента Пуассона. Установлено, что значения призмочной прочности (R_b) приближаются к кубиковой (R), а соотношение между ними (коэффициент призмочной прочности) не ниже 0,85. Сравнение фактических значений R_b с расчетными для предельных состояний I группы по СП 63.13330.2018 показывает, что для бетонов классов выше В70 в нормативном документе расчетные значения R_b необоснованно занижены. Величина коэффициента вариации высокопрочных бетонов не превышает 6,5%, что предопределено особенностями их составов, обеспечивающих стабильность консистенции, сегрегационную устойчивость и технологическую надежность бетонных смесей. Значения начального модуля упругости (E_b) превышают нормативные, предусмотренные СП 63.13330.2018. Установлена зависимость значений начального модуля упругости бетонов одинакового класса от природы крупного заполнителя. По данным эксперимента, модуль упругости может, в зависимости от характеристик применяемого крупного заполнителя, изменяться в диапазоне до 19%. Такая вариабельность E_b согласуется с рекомендациями EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2, но не учитывается в СП 63.13330.2018. Временной фактор влияет на изменение значений прочности (R и R_b) и модуля упругости (E_b). Согласно полученным данным, в период от 28 сут до 1,5 лет прирост прочности составил 15–17%, модуля упругости 8,8–9,8%. Установлено, что изменение указанных характеристик во времени описывается математическими моделями и соответственно поддается прогнозированию в зависимости от возраста бетонов. Полученные результаты свидетельствуют о том, что нормируемые параметры СП 63.13330.2018 не полностью учитывают ресурс современных высокопрочных бетонов, это делает необходимым внесение изменений в указанный документ.

Ключевые слова: высокопрочный бетон, модуль упругости, кубиковая прочность, призмочная прочность, динамика изменения характеристик, коэффициент Пуассона, диаграммы деформирования, степень гидратации цемента.

Для цитирования: Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Травуш В.И., Карпенко Н.И., Крылов С.Б. Оценка прочностных и деформационных характеристик высокопрочных бетонов в конструкциях и динамики их изменения во времени // *Строительные материалы*. 2023. № 11. С. 28–38. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-819-11-28-38>

S.S. KAPRIELOV¹, Doctor of Sciences (Engineering), Academician of RAACS (kapriellov@mail.ru),

A.V. SHEYNFELD¹, Doctor of Sciences (Engineering), Advisor of RAACS; V.I. TRAVUSH², Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Academician of RAACS;

N.I. KARPENKO³, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Academician of RAACS;

S.B. KRYLOV¹, Doctor of Sciences (Engineering), Corresponding Member of RAACS

¹ Research Institute for Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC "Research Center of Construction" (6, bldg. 5, 2ya Institutskaya Street, Moscow, 109428, Russian Federation)

² JSC "City Design Institute of Residential and Public Buildings (5, bldg. 5A, Nizhniy Susalnyi Lane, Moscow, 105064, Russian Federation)

³ Research Institute of Building Physics of RAACS (21, Lokomotivny Passage, Moscow, 127238, Russian Federation)

Assessment of Strength and Deformation Characteristics of High-Strength Concrete in Structures and the Dynamics of Their Changes over Time

Based on the data from numerous production and laboratory tests, an analysis of the actual values of the main standardized strength and deformation characteristics of high-strength concrete of classes B60–B100 was carried out: ultimate resistance to axial compression, initial modulus of elasticity and Poisson's ratio. It has been established that the values of prismatic strength (R_b) are close to cubic (R), and the ratio between them (prismatic strength coefficient) is not lower than 0.85. A comparison of R_b values with those calculated for limit states of the 1st group according to SP 63.13330.2018 shows that for concrete classes above B70 in the regulatory document they are unreasonably underestimated. The value of the coefficient of variation of high-strength concretes does not exceed 6.5%, which is predetermined by the features of their compositions, which ensure stability of consistency, segregation stability and technological reliability of concrete mixtures. The values of the initial elastic modulus (E_b) exceed the normative ones provided for by SP 63.13330.2018.

The dependence of the values of the initial modulus of elasticity of concrete of the same class on the nature of the coarse aggregate has been established. According to experimental data, the elastic modulus can vary in the range of up to 19% depending on the characteristics of the coarse aggregate used. This variability of E_b is consistent with the recommendations of EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2, but is not taken into account in SP 63.13330.2018. The time factor affects the change in the values of strength (R and R_b) and elastic modulus (E_b). According to the data obtained, in the period from 28 days to 1.5 years the increase in strength was 15–17%, elastic modulus – 8.8–9.8%. It has been established that changes in these characteristics over time are described by mathematical models and, accordingly, can be predicted depending on the age of concrete. The results obtained indicate that the standardized parameters of SP 63.13330.2018 do not fully take into account the service life of modern high-strength concrete, which makes it necessary to make changes to the specified document.

Keywords: high-strength concrete, modulus of elasticity, cubic strength, prismatic strength, dynamics of changes in characteristics, Poisson's ratio, deformation diagrams, degree of cement hydration.

For citation: Kapriyev S.S., Sheynfeld A.V., Travush V.I., Karpenko N.I., Krylov S.B. Assessment of strength and deformation characteristics of high-strength concrete in structures and the dynamics of their changes over time. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 11, pp. 28–38. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-819-11-28-38>

Объективная оценка значений нормативных и расчетных характеристик высокопрочных бетонов и динамики их изменения во времени, начиная от периода возведения монолитных конструкций до момента ввода в эксплуатацию сооружения, представляется одним из важных факторов оптимизации как строительного производства, так и продолжительности жизненного цикла сооружений.

Значимость этого фактора особенно велика для уникальных, в частности высотных, сооружений, если иметь в виду, как правило, 3–4-летнюю продолжительность их строительства, в течение которой свойства бетонов будут изменяться.

Между тем действующими нормами проектирования СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения» [1] изменение основных нормативных характеристик в зависимости от возраста бетонов не учитывается. Так же как не учитывается изменчивость деформационных характеристик равнопрочных бетонов в зависимости от технологических или рецептурных факторов, в частности от природы крупного заполнителя, и некоторые другие особенности современных бетонов.

Предметом рассмотрения являются изменения значений прочности при сжатии кубов (R) и призм (R_b), начального модуля упругости (E_b) и коэффициента Пуассона (ν) высокопрочных бетонов (классы В60–В100), твердеющих в нормальных температурно-влажностных ($t=18–22^\circ\text{C}$; $W=90–100\%$) условиях или в режиме выдерживания монолитных конструкций в естественных условиях, в зависимости от технологических факторов и возраста бетонов.

Изменение прочности и модуля упругости во времени, зависящее от качества и соотношения компонентов бетонных смесей и условий твердения бетонов, можно прогнозировать с учетом возраста бетонов разными способами, например рассчитать по формулам из EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2 [2]:

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t)f_{cm}; \quad (1)$$

$$\beta_{cc}(t) = \exp\{s[1-(28/t)^{1/2}]\}; \quad (2)$$

$$E_{cm}(t) = E_{cm}(28)[f_{cm}(t)/f_{cm}]^{0,3}, \quad (3)$$

где $f_{cm}(t)$ – средняя цилиндрическая прочность бетона при сжатии в возрасте t сут, МПа; f_{cm} – средняя цилиндрическая прочность бетона при сжатии в воз-

расте 28 сут, МПа; t – возраст бетона, сут; $\beta_{cc}(t)$ – коэффициент, зависящий от возраста бетона t ; s – коэффициент (0,2–0,38), зависящий от типа используемого цемента; $E_{cm}(t)$ – модуль упругости бетона в возрасте t сут, МПа; $E_{cm}(28)$ – модуль упругости бетона в возрасте 28 сут, МПа.

Значения начального модуля упругости бетона также могут быть рассчитаны по разным формулам, или расчетным моделям, выражающим зависимость этого параметра от пределов прочности при сжатии. Так, например:

– по EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2 [2]

$$E_{cm} = 22 k (f_{cm}/10)^{0,3}; \quad (4)$$

– по норвежскому стандарту NS 3473 [3]

$$E_{cm} = 9,5 f_{cm}^{0,3} (\rho/2400)^{1,5}; \quad (5)$$

– по Model Code 2010 [4]

$$E_{cm} = 10 k (f_{cm}+8)^{1/3}; \quad (6)$$

– по данным И.М. Безгодова с соавторами [5],

$$E_{cm} = 52000 R_b / (23+0,92 R_b), \quad (7)$$

где k – коэффициент (0,7–1,2), зависящий от вида крупного заполнителя; R_b – призматическая прочность бетона в возрасте 28 сут, МПа; ρ – средняя плотность бетона, кг/м³.

Заметим, что аналогами обозначений f_{cm} и E_{cm} являются принятые в РФ R_b и E_b . Указанные формулы (4)–(7) по определению значений модуля упругости бетона получены расчетно-эмпирическим путем, что придает им оттенок субъективности и не позволяет признать универсальными, так как все они, так же как подобные им другие, требуют учета разных коэффициентов, отражающих технологические факторы, такие как подвижность бетонных смесей, плотность бетона, качество вяжущего и заполнителей и др.

Поэтому, наряду с расчетом, остается актуальным вопрос определения фактических значений модуля упругости и оптимизации методики контроля этой характеристики в конструкциях.

Для расчета E_b следует иметь в виду и рецептурные факторы – удельный объем и модуль упругости составляющих частей бетона: цементного камня и заполнителей [5, 6] или растворной части и крупного заполнителя [7]. В общем это может быть выражено зависимостями:

$$E_b = E_{цк} V_{цк} + E_p V_p + E_{щ} V_{щ}; \quad (8)$$

$$E_b = E_p V_p + E_{щ} V_{щ}, \quad (9)$$

где $E_{цк}$, E_p , $E_{щ}$ и $V_{цк}$, V_p , $V_{щ}$ – соответственно модули упругости и удельные объемы цементного камня, песка и щебня; E_p и V_p – модуль упругости и удельный объем растворной части бетона.

Зависимость E_b от характеристик крупного заполнителя отражает номограмма, представленная Р.-С. Айтсін [8, 9], проанализировавшим информацию из разных источников [2, 3, 5]. Из нее следует, что модуль упругости как обычных, так и высокопрочных бетонов прочностью при сжатии от 20 до 120 МПа, в зависимости от качества горной породы, из которой получен крупный заполнитель, а по существу – от модуля упругости крупного заполнителя, может варьироваться в широком диапазоне – до 20%. Заметим, что такая вариабельность модуля упругости бетона в зависимости от свойств крупного заполнителя нашла отражение и в ряде нормативных и рекомендательных документов, в частности в EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2 и Model Code 2010.

Приведенные выше расчетные модели и зависимости позволяют в общем, основываясь на прочности бетона, прогнозировать модуль упругости с той или иной достоверностью. В то же время для оценки динамики их изменения важно учитывать и рецептурно-технологические особенности высокопрочных бетонов, в частности то, что ключевым фактором их производства является использование портландцементов типа ЦЕМ I в сочетании с высокоактивными минеральными добавками и суперпластификаторами или с комплексными продуктами – органоминеральными модификаторами типа МБ [10].

Целью работы являлась оценка фактических значений и динамики изменения во времени пределов прочности при сжатии и деформационных характеристик модифицированных высокопрочных бетонов классов В60–В100 и сравнение их с нормативными и расчетными характеристиками.

Для этого решали следующие задачи:

- выполнен статистический анализ опубликованных данных о кинетике твердения высокопрочных бетонов, произведенных заводами в массовых объемах и доставленных на строящиеся объекты делового центра «Москва-Сити»;

- оценивалось влияние прочностных и деформационных характеристик крупного заполнителя из разных горных пород на прочность, модуль упругости и коэффициент Пуассона самоуплотняющихся бетонов классов В30–В100;

- обосновывался метод определения фактических значений начального, или статического, модуля упругости бетона (E_b) в конструкциях по значению динамического модуля упругости (E_d), полученного по испытанию образцов-кернов, отобранных из конструкций;

- оценивались предельные относительные деформации сжатия и полные диаграммы деформирования самоуплотняющихся бетонов классов В30–В100;

- исследовались изменения во времени, в течение 1,5 лет (до 550 сут), пределов прочности при сжатии и модуля упругости высокопрочных бетонов возведенных конструкций каркасов трех высотных зданий жилого комплекса Capital Towers в г. Москве;

- проведено сравнение полученных данных с нормативными характеристиками, приведенными в СП 63.13330.2018 и в зарубежных нормативно-технических документах.

Методика проведения работ и характеристики материалов

Компоненты бетонных смесей

Для производства бетонных смесей применяли материалы, которые используются для массового производства высокопрочных и малоцементных бетонов [5, 11], в частности:

- портландцемент ЦЕМ I 52,5 Н, соответствующий ГОСТ 31108–2020 «Цементы общестроительные. Технические условия»;

- органоминеральный модификатор бетона МБ10-50С А-II-2, включающий в себя микрокремнезем (45%), золу-уноса (45%) и суперпластификатор (10%), соответствующий ГОСТ Р 56178–2014 «Модификаторы органоминеральные типа МБ для бетонов, строительных растворов и сухих смесей. Технические условия» и ТУ 5743-083-46854090–98 с изм. № 1–3;

- микрозаполнитель – порошок минеральный неактивированный марки МП-1 (молотый известняк) с размером частиц менее 1,25 мм, соответствующий ГОСТ Р 52129–2003 «Порошок минеральный для асфальтобетонных и органоминеральных смесей. Технические условия» и ГОСТ Р 56592–2015 «Добавки минеральные для бетонов и строительных растворов. Общие технические условия»;

- песок кварцевый I класса с модулем крупности $M_{кр}=2,5$, соответствующий ГОСТ 8736–2014 «Песок для строительных работ. Технические условия»;

- щебень фракции 3–10 мм из разных горных пород (гравия плотностью 2650 кг/м³ марки 1200 с модулем упругости до 60 ГПа, гранита плотностью 2670 кг/м³ марки 1400 с модулем упругости до 68 ГПа, габбро-диабазы плотностью 3070 кг/м³ марки 1400 с модулем упругости до 125 ГПа, базальта плотностью 3000 кг/м³ марки 1400 с модулем упругости до 100 ГПа), соответствующий ГОСТ 8267–93 «Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия»;

- вода для затворения бетонных смесей, соответствующая ГОСТ 23732–2011 «Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия».

Составы бетонных смесей

Приготовлены семь серий самоуплотняющихся бетонных смесей с расходом цемента от 290 до 480 кг/м³ с добавками модификатора от 10 до 27% массы цемента и микрозаполнителя от 50 до 150 кг/м³ при водовяжущем отношении В/(Ц+МБ) от 0,25 до 0,69,

составы которых оптимизированы для каждого класса бетона. Каждая серия приготавливалась с четырьмя видами крупного заполнителя (щебнем из гравия, гранитным, габбро-диабазовым и базальтовым щебнем) с расчетом на одинаковую объемную дозировку крупного заполнителя, которая находилась в узком диапазоне – от 0,31 до 0,335 м³/м³. Составы бетонных смесей и свойства бетонов представлены в таблице, которая воспроизведена ниже по данным из предыдущих публикаций [5, 11].

Испытания бетонов

Пределы прочности при сжатии кубов (R) и призм (R_b) определяли на образцах размером 100×100×100 и 100×100×400 мм соответственно.

Модуль упругости (E_b) и коэффициент Пуассона (ν) определяли на образцах 100×100×400 мм.

Испытания проводили согласно ГОСТ 24452–80 «Бетоны. Методы определения призмочной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона» и ГОСТ 31914–2012 «Бетоны высокопрочные тяжелые и мелкозернистые для монолитных конструкций. Правила контроля и оценки качества».

Прочность бетонов в конструкциях определяли комплексом неразрушающих методов и испытанием кернов согласно ГОСТ 28570–2019 «Бетоны. Методы определения прочности по образцам, отобраным из конструкций», ГОСТ 22690–2015 «Бетоны. Определение прочности механическими методами неразрушающего контроля», ГОСТ 18105–2018 «Бетоны. Правила контроля и оценки прочности».

Модуль упругости (E_b) бетонов непосредственно в конструкциях определяли путем измерения величины динамического модуля упругости (E_d) на образцах-кернах диаметром 74, длиной 296 мм и сопоставления по градуировочной зависимости с результатами измерений E_b на образцах-призмах 100×100×400 мм из аналогичных бетонов. Величина E_d определялась согласно инструкциям [12, 13].

Зависимость (E_b-E_d) по ранее опубликованным данным [11] воспроизведена на рис. 1 и выражается формулой:

$$E_b = 0,982 E_d - 3,437. \quad (10)$$

Кинетика изменения свойств бетонов

Статистическая обработка опубликованных ранее [14] данных о кинетике изменения в течение 12 мес прочности бетонов класса В90 проводилась по данным испытаний контрольных образцов-кубов размером 100×100×100 мм, приготовленных на стройплощадке при приемочном контроле качества 313 партий готовых бетонных смесей, доставленных на строительство комплекса «Федерация» на территории ММДЦ «Москва-Сити». Все образцы приготовлены из высокоподвижных (ОК=22–26 см) и самоуплотняющихся (РК=60–70 см) бетонных смесей и выдерживались в нормальных температурно-влажностных условиях.

Кинетика изменения в течение 18 мес фактических значений прочности и модуля упругости бетонов классов В60 и В80 непосредственно в вертикальных конструкциях высотных зданий жилого комплекса Capital Towers в Москве определялась в процессе их строительства по результатам комплексных испытаний неразрушающими и разрушающим методами. Конструкции были сгруппированы по проектному классу бетона и периоду их возведения, что позволило построить соответствующие градуировочные зависимости и определить значения коэффициентов вариации и фактические значения характеристик бетонов в разном возрасте с учетом их однородности.

Степень гидратации цемента

Степень гидратации цемента определяли рентгенофазовым анализом путем сопоставления количества C_3S в исходном вяжущем до затворения водой и в затвердевшем цементном камне. Количество

Составы и свойства самоуплотняющихся бетонных смесей
Compositions and properties of self-compacting concrete mixtures

Составы бетонных смесей, кг/м ³							Свойства бетонных смесей			
Ц	МБ	МП-1	П	Щ	СП	В	γ , кг/м ³	$V_{щ}$, м ³ /м ³	РК, см	В/(Ц+МБ)
290	–	150	820	855 ¹ / 870 ² / 995 ³ / 970 ⁴	3,52	198	2316–2456	0,32	55–58	0,69
300	30	170	835	830 ¹ / 835 ² / 960 ³ / 940 ⁴	–	176	2341–2471	0,31	55–59	0,53
300	50	180	845	835 ¹ / 850 ² / 970 ³ / 950 ⁴	–	158	2368–2503	0,32	60–63	0,45
350	65	150	815	820 ¹ / 840 ² / 955 ³ / 930 ⁴	–	160	2360–2495	0,31	60–70	0,39
420	70	100	825	830 ¹ / 845 ² / 955 ³ / 930 ⁴	–	161	2406–2531	0,31	60–68	0,33
450	100	50	790	870 ¹ / 875 ² / 1005 ³ / 1000 ⁴	–	154	2414–2549	0,33	62–70	0,28
480	130	50	725	880 ¹ / 905 ² / 1015 ³ / 985 ⁴	–	152	2417–2552	0,33	62–70	0,25

Примечания:

Ц – портландцемент ЦЕМ I 52,5 Н; МБ – органоминеральный модификатор бетона; МП-1 – микрозаполнитель; П – песок кварцевый, Мкр = 2,5; Щ – щебень фракции 5–10 мм: ¹ из гравия плотностью 2650 кг/м³; ² гранитный плотностью 2670 кг/м³; ³ габбро-диабазовый плотностью 3070 кг/м³; ⁴ базальтовый плотностью 3000 кг/м³; СП – суперпластификатор; В – вода; γ – средняя плотность смеси; $V_{щ}$ – объем крупного заполнителя в объеме бетонной смеси; РК – подвижность по распылу нормального конуса.

С₃S определяли по интенсивности основного рефлекса алита ($\alpha=1,76$). Образцы приготовлены из вяжущего, включающего цемент марки ЦЕМ I 52,5 Н и добавки разных модификаторов типа МБ в одинаковом количестве – 20% от массы цемента при водвяжущем отношении (В/В) от 0,14 до 0,3.

Результаты

Фактические значения кубиковой и призмной прочности бетонов классов В30–В100 в возрасте 28 сут, по данным [5], в сравнении с нормативными и расчетными значениями сопротивления бетонов осевому сжатию (R_b и $R_{b,ser}$) по СП 63.13330.2018 и EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2 приведены на рис. 2.

Экспериментально полученные фактические значения призмной прочности бетонов классов В30–В100 значительно превосходят нормативные и расчетные значения сопротивления бетонов осевому сжатию, приведенные в СП 63.13330.2018 на 47–64% и 113–119%, а в EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2 – на 22–45% и 113–184% соответственно.

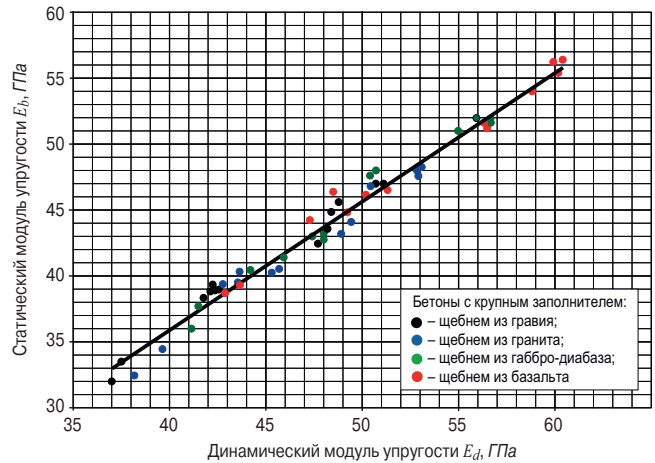


Рис. 1. Зависимость между значениями статического (начального) и динамического модулей упругости для бетонов классов В30–В100 с заполнителями из разных горных пород [11]

Fig. 1. Relationship between the values of static (initial) and dynamic modulus of elasticity for concrete classes B30–B100 with coarse aggregates from different rocks [11]

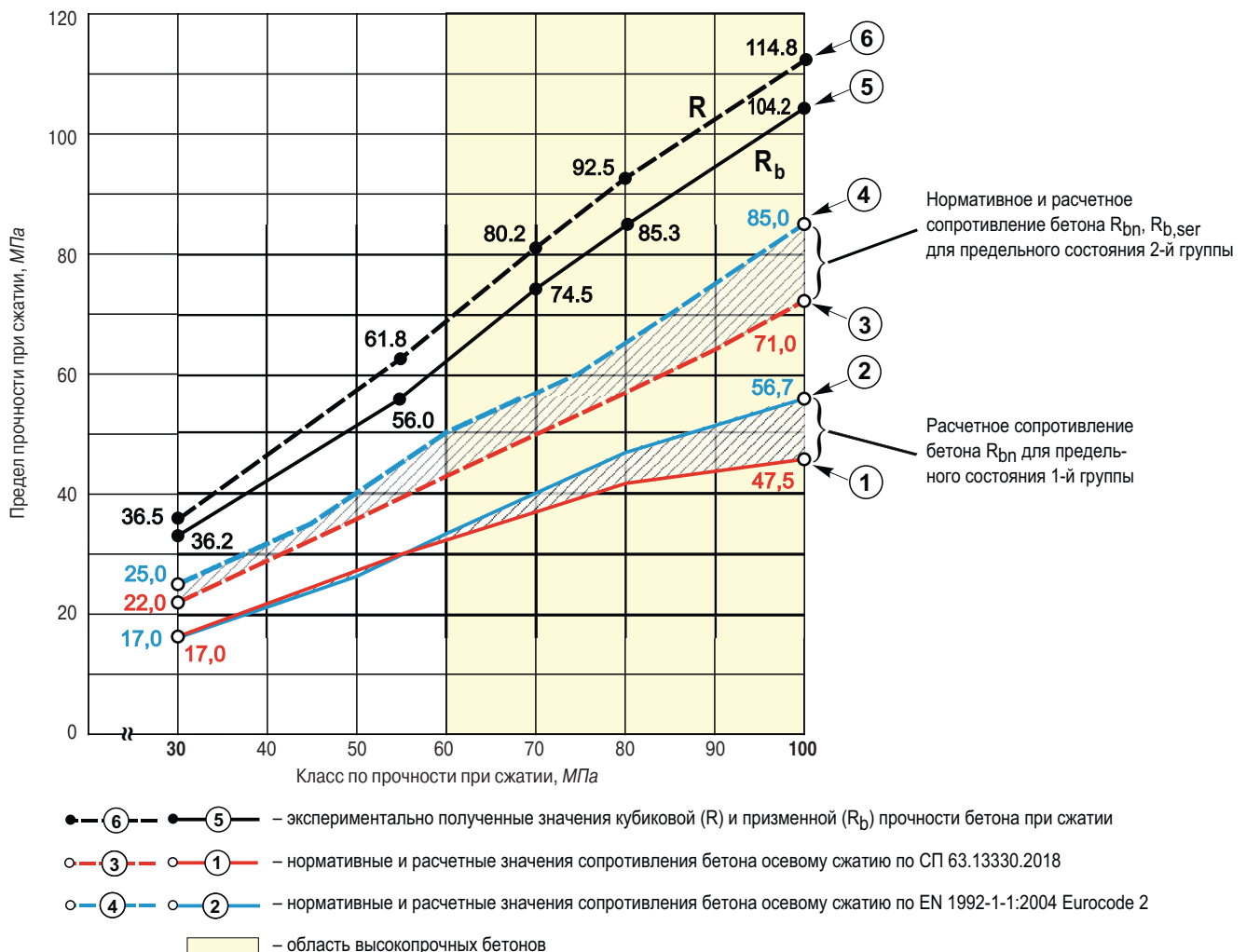


Рис. 2. Кубиковая (R) и призмная (R_b) прочность бетонов классов В30–В100 в сравнении с нормативными и расчетными значениями сопротивления бетонов осевому сжатию по СП 63.13330.2018 и EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2 для расчета по предельным состояниям 1-й и 2-й групп

Fig. 2. Cubic (R) and prismatic (R_b) compressive strength of concrete classes B30–B100 in comparison with standard ones and calculated values of concrete resistance to axial compression according to SP 63.13330.2018 and EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2 for calculations based on limit states of groups 1 and 2

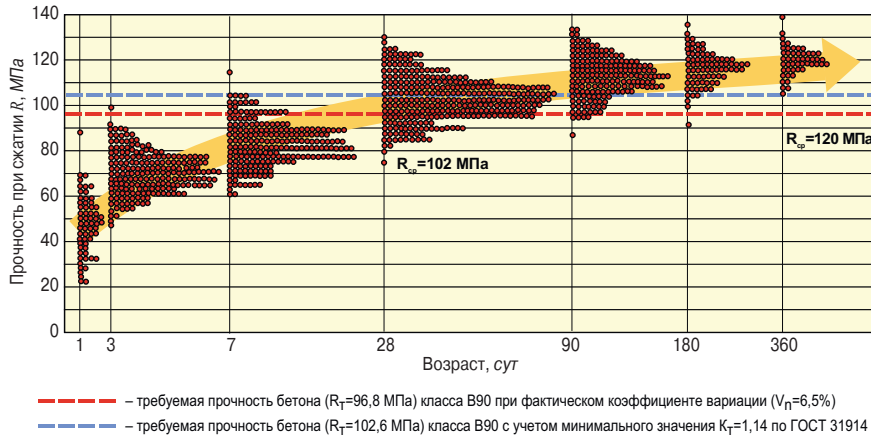


Рис. 3. Фактические значения прочности при сжатии бетона класса В90 в течение года по результатам контроля 313 партий бетонных смесей, доставленных на стройплощадку [14]
Fig. 3. Actual values of compressive strength of concrete class B90 during the year, based on the results of control of 313 batches of concrete mixtures delivered to the construction site [14]

На рис. 3 приведены, по данным [14], кубиковая прочность при сжатии и кинетика твердения высокопрочных бетонов класса В90 в течение 360 сут, которая получена при статистической обработке результатов контроля 313 промышленных партий высокоподвижных и самоуплотняющихся бетонных смесей, доставленных на стройплощадку. Прирост прочности в период от 28 сут ($R_{ср}=102$ МПа) до одного года ($R_{ср}=120$ МПа) составляет 17%, что характерно для бетонов конкретного вещественного состава: приготовленных с использованием портландцемента типа ЦЕМ I и органоминеральных модификаторов типа МБ. Следует отметить однородность результатов испытаний образцов, приготовленных из многочисленных партий бетонных смесей, произведенных разными заводами при разных погодных условиях, которая выражается в сравнительно низком коэффициенте вариации, равном 6,5%.

Тенденция прироста прочности, а также значений модуля упругости наблюдается в течение более продолжительного времени – до 1,5 лет, что подтверждается данными испытаний бетонов классов В60 и В80

в вертикальных конструкциях высотных зданий жилого комплекса Capital Towers (Москва).

Кинетика изменения фактических значений прочности при сжатии и начального модуля упругости бетонов в конструкциях в сравнении с рассчитанными по формулам (1) и (3) EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2 приведена на рис. 4.

Как видно из рис. 4, в период от 28 до 550 сут в зависимости от класса прирост прочности бетонов составил 15–17% и соответствует рассчитанному согласно EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2 уровню 17%. Прирост модуля упругости бетонов классов В60 и В80 за тот же период составил 5,8% и в целом соответствует рассчитанному согласно EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2 уровню 4,4–4,8%.

Так как кинетика твердения бетона, соответственно прирост прочности и модуля упругости связаны с кинетикой гидратации цемента, следует обратить внимание на результаты определения изменения степени гидратации цемента в высокопрочных бетонах с модификаторами типа МБ. По данным [15–17], приведенным на рис. 5, к 28 сут нормального твердения степень гидратации цемента с 20% органоминерального модификатора в зависимости от водовязущего отношения изменяется от 30% (при $V/(Ц+МБ)=0,14$) до 80% (при $V/(Ц+МБ)=0,3$). Это свидетельствует о наличии в цементном камне значительного количества – не менее 20% не полностью гидратированного цемента, так называемого остаточного «клинкерного фонда» – главного фактора повышения характеристик бетона во времени.

Результаты определения и зависимость начального модуля упругости от классов бетонов В30–В100 (прочностью при сжатии 36,2–115,1 МПа) с различными видами крупного заполнителя, по данным [11],

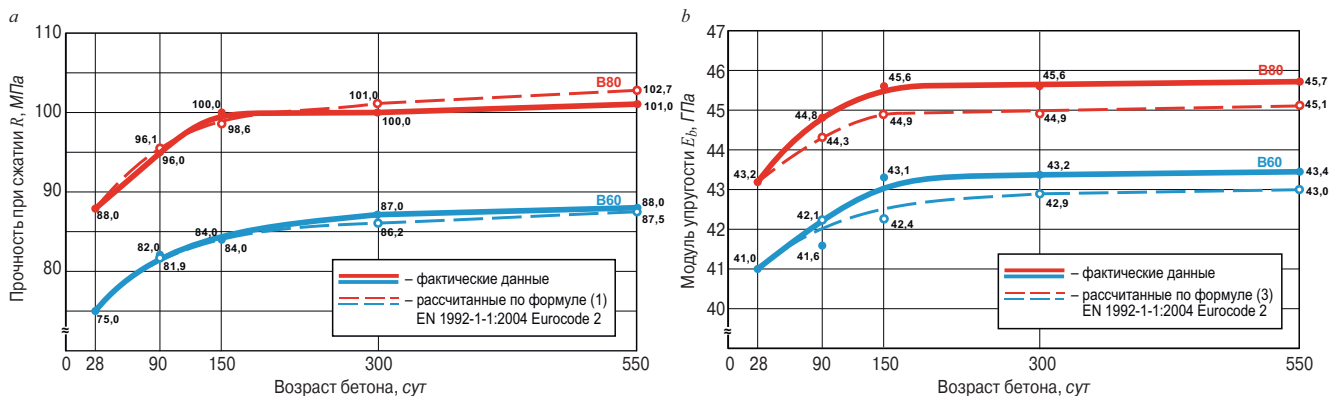


Рис. 4. Фактические и расчетные значения прочности при сжатии (а) и начального модуля упругости (b) бетонов проектных классов В60 и В80 в вертикальных конструкциях высотных зданий жилого комплекса Capital Towers в период от 28 до 550 сут после бетонирования
Fig. 4. Actual and calculated values of compressive strength (a) and initial modulus of elasticity (b) of concrete of design classes B60 and B80 in vertical structures of high-rise residential buildings Capital Towers complex in the period from 28 to 550 days after concreting

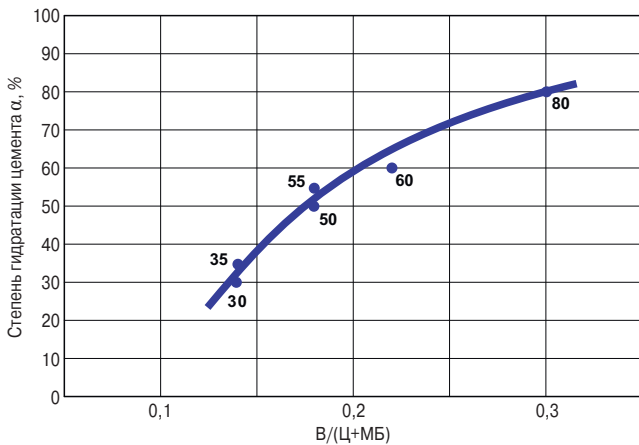


Рис. 5. Зависимость степени гидратации портландцемента в возрасте 28 сут от водовязящего отношения – $W/(C+MB)$
Fig. 5. Dependence of the degree of hydration of portland cement at the age of 28 days from the water-binding ratio – $W/(C+MB)$

и их сравнение со значениями по СП 63.13330.2018 представлены на рис. 6.

Полученные результаты (рис. 6) показывают, что модуль упругости бетонов классов В30–В70 на обычных крупных заполнителях (гранитном щебне и щебне из гравия) соответствует значениям, приведенным в СП 63.13330.2018. Модуль упругости высокопрочных бетонов классов В70–В100 на тех же обычных крупных заполнителях (гранитном щебне и щебне из гравия) превышает на 5–14% значения, приведенные в СП 63.13330.2018, и соответствует Model Code MC 2010. Использование в качестве крупного заполнителя габбро-диабазового и базальтового щебня позволяет повысить статический модуль упругости тяжелых бетонов классов по прочности при сжатии В30–В100 на 9 и 19% соответственно, что согласуется с информацией, приведенной FIB в Model Code 2010 и EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2.

По данным [5, 11], коэффициент Пуассона бетонов классов В30–В100 имеет тенденцию к повышению по мере увеличения прочности бетона при сжатии, находится в диапазоне от 0,2 до 0,25 и в целом соответствует значению 0,2, нормированному в СП 63.13330.2018, EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2 и Model Code MC 2010.

Полные диаграммы деформирования бетонов классов В30–В100 с призменной прочностью (R_b) от 36,2 до 104,2 МПа, приведенные по данным [5] на рис. 7, показывают, что для высокопрочных бетонов предельные относительные деформации находятся в диапазоне от 294×10^{-5} до 326×10^{-5} , что выше значения (200×10^{-5}), предусмотренного СП 63.13330.2018.

Нисходящая ветвь при уровне нагружения $0,85R_b$ наблюдается только у бетона класса В30, где предельные относительные деформации оказались на близком уровне к СП 63.13330.2018, т. е. 261×10^{-5} . У бетонов более высоких классов при том же уровне нагружения нисходящая ветвь отсутствует. В це-

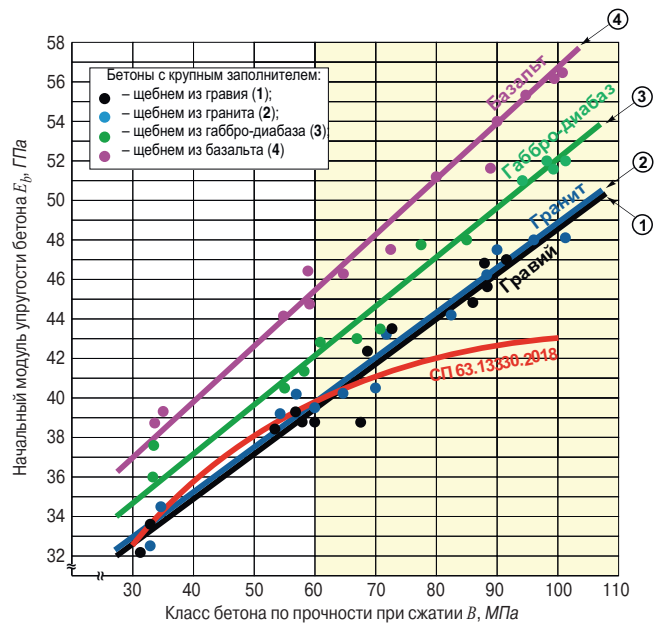


Рис. 6. Зависимость модуля упругости от класса бетона и вида крупного заполнителя [11]
Fig. 6. Dependence of the elastic modulus on the class of concrete and type of coarse aggregate [11]

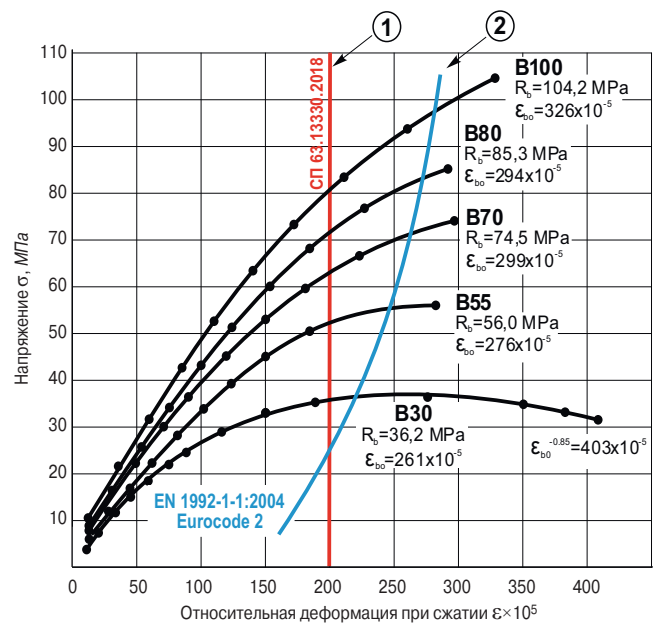


Рис. 7. Полные диаграммы деформирования бетонов классов В30–В100 при сжатии [5]
Fig. 7. Complete diagrams of the deformation of concrete classes В30–В100 under compression [5]

лом фактические значения предельных деформаций в большей мере соответствуют значениям по EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2.

Анализ результатов

О кубиковой прочности и кинетике ее изменения во времени

Указанные на рис. 3 фактические значения кубиковой прочности (R) бетона класса В90, определенные при контроле качества более трехсот промышленных партий бетонных смесей в течение

одного года, показывают однородность и стабильность свойств высокопрочных бетонов, которая выражается в низком коэффициенте вариации, равном 6,5%.

Характерный для высокопрочных бетонов низкий коэффициент вариации, отмеченный ранее Р.-С. Aitcin [8], ACI 363 R [18] и авторами [14], связан с особенностями составов смесей, в которых, как правило, повышен расход вяжущего и понижено водо-вяжущее отношение, что делает их значительно более устойчивыми к расслоению и соответственно технологически стабильными.

Эти обстоятельства учитываются при производстве высокопрочных бетонов и отражены в ГОСТ 31914–2012 «Бетоны высокопрочные тяжелые и мелкозернистые для монолитных конструкций. Правила контроля и оценки качества», согласно которому при контроле качества высокопрочных бетонов по контрольным образцам-кубам требуемая прочность в проектном возрасте назначается с учетом минимального значения $K_T=1,14$. Такой «запас» является своеобразной гарантией обеспечения требуемых характеристик бетонов непосредственно в конструкциях.

Тем не менее тенденция увеличения прочности и соответственно класса бетона в период от 28 до 370 сут на величину 15–17% представляется вполне достоверной, так как обоснована не только статистическими данными, но и присутствием в модифицированном цементном камне остаточного «клинкерного фонда», который является своеобразным резервным источником, обеспечивающим прирост прочности бетонов. Значительное в сравнении с обычным цементным камнем количество неиспользованного клинкерного фонда, составляющее в возрасте 28 сут около 15–20% массы цемента, связано с невысокой степенью гидратации цемента в высокопрочных бетонах в этом возрасте из-за низкого водосодержания бетонных смесей.

Приведенные на рис. 4, а данные об изменении фактической прочности бетонов при сжатии проектных классов В60 и В80 непосредственно в конструкциях в течение более длительного периода подтверждают указанную выше тенденцию, которая вписывается в математическую модель:

$$R_t = R_0 [1,164 \cdot t / (4,73 + t)], \quad (11)$$

где R_t – кубиковая прочность бетона при сжатии в возрасте t сут, МПа; R_0 – кубиковая прочность бетона при сжатии в возрасте 28 сут, МПа; t – возраст бетона, сут.

Сравнение фактических данных, описанных моделью (11), с расчетными значениями, полученными по указанной выше формуле (1) из EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2, показывает сходимость результатов, что подтверждает достоверность выявленной кинетики твердения высокопрочных бетонов и показывает возможность прогнозирования прироста прочности во времени расчетным методом.

В этом контексте стоит отметить более явную тенденцию прироста призмочной прочности модифицированного высокопрочного бетона класса В95, приготовленного в лабораторных условиях. По данным [19], в период от 30 сут до 1,5 лет призмочная прочность на осевое сжатие (R_b) возрастает на 23%.

О призмочной прочности

Из рис. 2 следует, что у бетонов классов В30–В100 фактические значения призмочной прочности превышают на 64–47% нормативные и расчетные сопротивления бетонов осевому сжатию $R_{b,n}$ и $R_{b,ser}$, предусмотренные действующим СП 63.13330.2018 для расчета конструкций по 2-й группе предельных состояний (по деформациям и раскрытию трещин).

При этом значения призмочной прочности (R_b) приближаются к кубиковой прочности (R) бетона. Коэффициент призмочной прочности (R_b/R), который не является нормативной характеристикой, но принимается во внимание при необходимости косвенно определить ориентировочное значение R_b по прочности образцов-кубов, находится в диапазоне от 0,86 до 0,99 [5, 10] и превосходит значения этого коэффициента, рассчитанного по параметрам, приведенным в СП 63.13330.2018 (от 0,71 до 0,73).

Сравнение фактических значений призмочной прочности с предусмотренным в СП 63.13330.2018 и EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2 сопротивлением бетонов осевому сжатию R_b для расчета конструкций по I группе предельных состояний (по несущей способности), приведенное на рис. 2, показывает, что нормируемые расчетные значения R_b ниже фактических, это логично и связано с использованием принятых в нормативах понижающих коэффициентов надежности (1,3 – в СП 63.13330.2018 и 1,5 – в EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2). Однако если для бетонов классов до В60 нормируемые расчетные характеристики, предусмотренные двумя вышеуказанными нормативными документами, практически одинаковы, то для высокопрочных бетонов классов от В60 до В100 расчетные параметры по EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2 выше. Разница увеличивается по мере повышения класса бетонов, достигая 25 % (кривые 1 и 2 на рис. 2). Это расхождение объясняется тем, что, согласно СП, при определении расчетных значений R_b для предельных состояний I группы для бетонов классов В70–В100 в отличие от обычных бетонов более низких классов следует применять понижающий коэффициент $\gamma_{b,br}=(360-B)/300$, учитывающий хрупкость высокопрочных бетонов. Между тем характер кривых на диаграммах напряженного состояния, приведенных на рис. 7, и предельные относительные деформации у высокопрочных бетонов находятся в диапазоне от 294×10^{-5} до 326×10^{-5} , что выше нормируемого сводом правил значения 200×10^{-5} .

Это является косвенным свидетельством недооценки реального ресурса высокопрочных бетонов

из-за необоснованного занижения нормируемых расчетных значений R_b в СП 63.13330.2018.

О начальном модуле упругости и кинетике его изменения во времени

Как видно из рис. 6, фактические значения начального модуля упругости высокопрочных бетонов на стандартных заполнителях (щебне из гравия и гранитном щебне) классов В70–В100, определенные путем испытаний образцов-призм в возрасте 28 и 90 сут, выше нормируемых значений, предусмотренных СП 63.13330.2018. Разница между фактическими и нормативными значениями E_b , так же как в случае с призмной прочностью (R_b), возрастает с повышением класса бетона и составляет от 5 до 14%.

Результаты, приведенные на рис. 6, показывают, что модуль упругости бетонов классов В30–В100 в значительной степени зависит от вида крупного заполнителя, возрастая по мере повышения прочности, плотности и модуля упругости горной породы, и при использовании крупного заполнителя из габбро-диабазового и базальтового щебня нормативные значения E_b могут приниматься с повышающими коэффициентами 1,09 и 1,19 соответственно, что согласуется с информацией, приведенной FIB в Model Code 2010 и EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2.

Фактические значения начального модуля упругости бетонов классов В60 и В80, определенные путем испытаний образцов-кернов, выбуренных из возведенных конструкций, в «стандартном» 28-суточном возрасте, также на 2,9–3,8% выше нормируемых значений, предусмотренных СП 63.13330.2018. Более значимо это проявляется в позднем 550-суточном возрасте. Разница между фактическими и нормативными значениями E_b с повышением возраста бетона от 28 до 550 сут возрастает до 8,8–9,8% (рис. 4, б).

То же отмечалось в разных публикациях, в частности А. Абдельразак [20], анализируя свойства высокопрочного бетона класса С80 (аналог В100 по стандартам РФ) в вертикальных конструкциях высотного здания Бурдж-Халифа, отмечает превышение фактических значений начального модуля упругости над расчетными на величину около 7% и повышение E_b в период от 56 до 90 сут после бетонирования на 11%, а Н.И. Карпенко с соавторами [19] отмечает повышение модуля упругости (E_b) бетона класса В95 в период с 30 сут до 1,5 лет на 9,7%.

Тенденция изменения во времени полученных авторами фактических значений модуля упругости бетонов классов В60 и В80, приведенная на рис. 4, б, вписывается в математическую модель:

$$E_t = E_0 [1,06 \cdot t / (1,74 + t)], \quad (12)$$

где E_t – модуль упругости бетона в возрасте t сут, МПа; E_0 – модуль упругости бетона в возрасте 28 сут, МПа; t – возраст бетона, сут.

Сравнение характера кривых, описываемых формулой (12) и полученных расчетным путем по форму-

ле (3) EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2, показывает идентичность тенденций изменения модуля упругости во времени. Положительная динамика изменения E_b во времени связана с отмеченным выше приростом прочности бетонов при сжатии и может с той или иной достоверностью рассчитываться по разным математическим моделям, в частности по предложенной нами или приведенной в EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2 унифицированной формуле.

О динамическом модуле упругости

Учитывая неизбежные отклонения модуля упругости бетона от расчетных значений, актуализируется проблема определения фактических значений начального модуля упругости в конструкциях. Одним из доступных методов является оценка значений E_b через динамический модуль упругости.

Динамический модуль упругости E_d бетонов классов от В30 до В100 выше начального модуля на 2,5–5,3 ГПа. При этом значения начального (статического) и динамического модулей упругости коррелируются независимо от качества крупного заполнителя в составе бетона, что отражает прямая зависимость (10), представленная на рис. 1.

Выявленная закономерность позволяет рассчитывать по соответствующей градуировочной зависимости фактические значения E_b по значениям E_d , определенным при испытаниях образцов-кернов, выбуренных из конструкций, и может быть основанием для разработки стандартизированной методики определения начального модуля упругости в конструкциях.

О коэффициенте Пуассона

Коэффициент Пуассона бетонов классов В30–В100 имеет тенденцию к повышению от 0,2 до 0,25 с увеличением прочности бетона при сжатии и в целом соответствует нормируемому значению 0,2 по СП 63.13330.2018, EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2 и Model Code MC 2010.

О предельных относительных деформациях сжатия

Полные диаграммы деформирования бетонов классов В30–В100 при сжатии, приведенные на рис. 7, показывают, что нисходящая ветвь наблюдается только у бетона класса В30, а для бетонов с более высокой прочностью нисходящая ветвь отсутствует. Предельные относительные деформации сжатия высокопрочных бетонов классов В70–В100 превышают их нормированное значение в СП 63.13330.2018 на 50–63% и больше соответствуют нормируемым переменным значениям для бетонов разных классов по прочности по EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2.

Выводы

На основании анализа имеющихся многочисленных данных о значениях пределов прочности при сжатии и начального модуля упругости высокопрочных бетонов классов В60–В100 в конструкциях, воз-

веденных на объектах строительства комплекса «Москва-Сити», а также результатов испытаний установлено следующее.

1. Фактические значения призменной прочности (R_b) приближаются к кубиковой (R), по которой с учетом коэффициентов вариации рассчитываются классы бетона. Отношение R_b/R (коэффициент призменной прочности) не ниже 0,85. Величина коэффициентов вариации высокопрочных бетонов не превышает 6,5%.

2. Значения призменной прочности – предела прочности на осевое сжатие (R_b) – для бетонов классов от В60 до В100 превышают нормативные и расчетные (R_b и $R_{b,ser}$), предусмотренные в СП 63.13330.2018 для предельных состояний I и II групп, а также принятые в EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2, что связано с учетом в указанных нормативах понижающих коэффициентов, включая соответствующие коэффициенты надежности.

3. Сравнение расчетных значений R_b для I группы предельных состояний по СП 63.13330.2018 и EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2 показывает, что у обычных бетонов классов до В60 они практически совпадают, однако у высокопрочных бетонов этот расчетный параметр по EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2 выше. Разница увеличивается по мере повышения класса бетона от В60 до В100, достигая 25%. Такое расхождение связано с приведенным в СП 63.13330.2018 понижающим коэффициентом $\gamma_{b,br}=(360-B)/300$, который недостаточно обоснованно, без учета реальной диаграммы напряженного состояния и предельных относительных деформаций высокопрочных бетонов, введен в расчете на хрупкость бетонов классов В70 и выше.

4. Фактические значения начального модуля упругости E_b для бетонов классов от В60 до В100 превышают нормативные, предусмотренные СП 63.13330.2018.

На модуль упругости высокопрочных, так же как обычных, бетонов существенно влияет качество крупного заполнителя: при использовании щебня из габбро-диабазы или базальта вместо менее плотной гранитной породы значения модуля упругости при равном классе бетона оказываются выше на 9 и 19 % соответственно.

Это согласуется с рекомендациями EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2 и СЕВ/FIP Model Code 2010, в которых отмечается переменность значений E_b в бетонах одного класса, в зависимости от вида крупного заполнителя, в пределах до 20%, однако не учитывается действующим СП 63.13330.2018.

Коэффициент Пуассона бетонов классов В60–В100 находится в диапазоне 0,20–0,25, что соответствует значениям, приведенным в нормативных документах.

5. Вариативность значений начального модуля упругости в зависимости от технологических факторов, в частности и от качества крупного заполнителя, делает актуальной проблему оценки фактического

значения этого параметра непосредственно в конструкциях.

Выявленная взаимосвязь между начальным модулем упругости (E_b) и динамическим (E_d), который определяется путем испытаний образцов-кернов, выбуренных из конструкций, является основанием для разработки стандартизированной методики определения начального модуля упругости в конструкциях.

6. Временной фактор оказывает существенное влияние на изменение прочности при сжатии (R , R_b) и начального модуля упругости (E_b) высокопрочного бетона: согласно полученным данным, прирост прочности бетонов класса В80–В90 в период от 28 до 570 сут составляет 15–17%, прирост значений модуля упругости за тот же период – 9,8%.

В основе этой тенденции – присутствие в высокопрочном бетоне в 28-суточном возрасте не полностью гидратированного цемента, так называемого остаточного «глинкерного фонда» – главного фактора, влияющего на повышение характеристик бетона во времени.

Тенденция прироста со временем прочности и начального модуля упругости поддается математическому моделированию с той или иной достоверностью, с учетом в качестве исходных данных фактических значений R , R_b и E_b в конкретный момент времени и информации о вещественном составе бетонов.

7. Положительная динамика изменения прочности и модуля упругости бетонов, так же как переменность значений модуля упругости в зависимости от качества крупного заполнителя, согласуется с нормативами и рекомендациями EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2 и СЕВ/FIP Model Code 2010, однако не учитывается сводом правил СП 63.13330.2018.

Вышеизложенное свидетельствует о том, что нормируемые параметры СП 63.13330.2018 не полностью учитывают ресурс высокопрочных бетонов, это делает необходимым внесение изменений в указанный документ.

Список литературы / References

- СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения». М.: Минстрой, 2018.
- SP 63.13330.2018 “Betonnnye I zhelezobetonnnye konstruksii. Osnovnye polozheniya” [Concrete and reinforced concrete structures. Basic provisions]. Moscow. 2018.
- EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2: Design of concrete structures — Part 1-1: General rules and rules for buildings.
- NS 3473 Design of Concrete Structures, Norwegian Counsel for Standardization, Oslo, Norway.
- Model Code 2010. First complete draft, VI. FIB.

5. Bezgodov I., Kaprielov S., Sheynfeld A. Relationship between strength and deformation characteristics of high-strength self-compacting concrete. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2022. 18 (2), pp. 175–183.
6. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Карпенко Н.И., Кузнецов Е.Н. О регулировании модуля упругости и ползучести высокопрочных бетонов с модификатором МБ-50С // *Бетон и железобетон*. 2003. № 6. С. 8–12.
6. Kaprielov S.S., Sheinfeld A.V., Karpenko N.I., Kuznetsov E.N. On the regulation of the modulus of elasticity and creep of high-strength concrete with a modifier MB-50C. *Beton i zhelezobeton*. 2003. No. 6, pp. 8–12. (In Russian).
7. Colleparidi M. The New Concrete Published by G. Tintoretto. V. Verdi 45/47. Castrette di Vil-lorba – Italy. 2006. 421 p.
8. Aitcin P.-C. High Performance Concrete. E and FN. Spon, London. 1998. 591 p.
9. Baalbaki W., Benmokrane B., Chaallal O., Aitcin P.-C. Influence of coarse aggregate on elastic properties of high-performance concrete. *ACI Materials Journal*. 1991. 88 (5). September-October, pp. 499–503.
10. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Дондуков В.Г. Цементы и добавки для производства высокопрочных бетонов // *Строительные материалы*. 2017. № 11. С. 4–10.
10. Kaprielov S.S., Sheinfeld A.V., Dondukov V.G. Cements and additives for the production of high-strength concrete. *Stroitelnye Materialy* [Construction Materials]. 2017. No. 11, pp. 4–10. (In Russian).
11. Kaprielov S., Sheynfeld A., Selyutin N. Control of heavy-weight concrete characteristics affecting structural stiffness. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2022. 18 (1), pp. 24–39. <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2022-18-1-24-39>
12. Resonant Frequency Testing. Technical Reference Manual / CNS Farnell Limited Elstree Business Center, Elstree Way, Borehamwood, Hertfordshire, WD6 1RX, August 2005. 24 p.
13. Operating instructions. ERUDITE MKIV (PC 1004) / CNS Farnell Limited Elstree Business Center, Elstree Way, Borehamwood, Hertfordshire, England. WD6 1RX, 2004. 34 p.
14. Каприелов С.С., Травуш В.И., Карпенко Н.И., Шейнфельд А.В., Кардумян Г.С., Киселёва Ю.А., Пригоженко О.В. Модифицированные высокопрочные бетоны классов В80 и В90 в монолитных конструкциях // *Строительные материалы*. 2008. № 3. С. 9–13.
14. Kaprielov S.S., Travush V.I., Karpenko N.I., Sheinfeld A.V., Kardumyan G.S., Kiseleva Yu.A., Prigozhenko O.V. Modified high-strength concretes of classes B80 and B90 in monolithic structures. *Stroitelnye Materialy* [Construction Materials]. 2008. No. 3, pp. 9–13. (In Russian).
15. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В. Влияние состава органоминеральных модификаторов бетона серии «МБ» на их эффективность // *Бетон и железобетон*. 2001. № 5. С. 11–15.
15. Kaprielov S.S., Sheynfeld A.V. Influence of the composition of organomineral concrete modifiers of the MB series on their effectiveness. *Beton i zhelezobeton*. 2001. No. 5, pp. 11–15. (In Russian).
16. Батраков В.Г., Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Силина Е.С. Модифицированные бетоны в практике современного строительства // *Промышленное и гражданское строительство*. 2002. № 9. С. 23–25.
16. Batrakov V.G., Kaprielov S.S., Sheynfeld A.V., Silina E.S. Modified concrete in the practice of modern construction. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo*. 2002. No. 9, pp. 23–25. (In Russian).
17. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Кардумян Г.С., Дондуков В.Г. Структура и свойства высокопрочных бетонов, содержащих комплексный органоминеральный модификатор «Эмбэлит». II *Всероссийская Международная конференция по бетону и железобетону «Бетон и железобетон – пути развития»*. 5–9 сентября 2005. М., 2005. Т. 3. С. 657–671.
17. Kaprielov S.S., Sheynfeld A.V., Kardumyan G.S., Dondukov V.G. Structure and properties of high-strength concrete containing complex organomineral modifier “Embelit”. II *All-Russian International Conference on Concrete and Reinforced Concrete «Concrete and Reinforced Concrete – Paths of Development»*. September 5–9, 2005. Moscow. 2005. Vol. 3, pp. 657–671. (In Russian).
18. ACI 363 R-10: Report on High-Strength Concrete. Reported by ACI Committee 363.
19. Карпенко Н.И., Каприелов С.С., Кузнецов Е.Н., Шейнфельд А.В., Безгодов И.М. Меры ползучести высокопрочных мелкозернистых бетонов на основе МБ // *Вестник отделения строительных наук*. М.: РААСН. 2004. Вып. 8. С. 203–214.
19. Karpenko N.I., Kaprielov S.S., Kuznetsov E.N., Sheinfeld A.V., Bezgodov I.M. Measures of creep of high-strength fine-grained concrete based on MB. *Vestnik otdeleniya stroitelnykh nauk*. 2004. Iss. 8, pp. 203–214. (In Russian).
20. Абдельразак Ахмад. Планирование бетонных работ. Ранняя стадия строительства «Бурдж-Халифа» // *Высотные здания*. 2015. № 4. С. 94–99.
20. Abdelrazaq Ahmad. Planning of concrete works. Early stage of construction of the Burj Khalifa. *Vysotnye zdaniya*. 2015. No. 4, pp. 94–99. (In Russian).