

УДК 391.327.32

[https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-2\(627\)-27-42](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-2(627)-27-42)

**С.С. КАПРИЕЛОВ^{1,2}, А.В. ШЕЙНФЕЛЬД^{1,2,✉}, Н.И. КАРПЕНКО³,
Н.М. СЕЛЮТИН^{1,4}, Г.А. МОИСЕЕНКО³, И.М. БЕЗГОДОВ²**

¹ Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона (НИИЖБ) им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», 2-я Институтская ул., д. 6, к. 5, г. Москва, 109428, Российская Федерация

² ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Ярославское шоссе, д. 26, г. Москва, 129337, Российская Федерация

³ ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук» (НИИСФ РААСН), Локомотивный проезд, д. 21, г. Москва, 127238, Российская Федерация

⁴ ООО «Предприятие Мастер Бетон», ул. Саратовская, д. 31, г. Москва, 109518, Российская Федерация

ВЛИЯНИЕ ВИДА ЗАПОЛНИТЕЛЯ НА ФИЗИКО— ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫСОКОПРОЧНЫХ САМОУПЛОТНЯЮЩИХСЯ ЦЕМЕНТНЫХ СИСТЕМ

Аннотация

Введение. Представлены результаты исследований высокопрочных самоуплотняющихся цементных систем с различным видом заполнителя, которые показывают, что пониженная средняя плотность и возможность изменения модуля упругости в широком диапазоне делают высокопрочные легкие бетоны предпочтительным конструкционным материалом, позволяющим снизить массу и сократить расход арматуры железобетонных конструкций высотных зданий, мостов и путепроводов, а также сооружений, возводимых в сейсмоопасных регионах.

Цель. Сравнительная оценка влияния вида заполнителя из плотных горных пород и легких пористых материалов на среднюю плотность, прочностные и деформационные характеристики высокопрочных самоуплотняющихся цементных систем – цементного камня, мелкозернистого, тяжелых и легких бетонов.

Материалы и методы. Все цементные системы изготавливали с использованием модифицированного высокопрочного цементного камня одинакового качества на основе портландцемента и органоминерального модификатора типа МБ в количестве 24 % массы цемента с истинным водовязущим отношением 0,25. При производстве бетонов применяли заполнители из плотных горных пород (кварцевый песок, гранитный

и базальтовый щебень) и легких пористых материалов искусственного (керамзитового гравия) и природного (туфовый щебень) происхождения.

Результаты. Определены прочностные (кубиковая и призмная прочность на сжатие) и деформационные (начальный модуль упругости, коэффициент Пуассона и предельные относительные деформации сжатия) характеристики шести высокопрочных самоуплотняющихся цементных систем классов по прочности на сжатие В64–В88 с широким диапазоном средней плотности (от 1842 до 2497 кг/м³) с использованием стандартизированных и специальных методик. Сопротивление бетонов осевому сжатию находится в диапазоне 55,2–78,4 МПа и значительно превосходит нормативные значения по СП 63.13330.2018. Предельные относительные деформации высокопрочных бетонов в большей степени зависят от объемного содержания цементного камня, чем от вида заполнителя и прочности на сжатие. Введение в цементную систему легких пористых заполнителей вместо заполнителей из плотных горных пород позволило получить высокопрочные самоуплотняющиеся легкие бетоны классов В64–В72 с пониженной на 17–26 % средней плотностью и модулем упругости 29,5–33,9 МПа.

Выводы. Варьирование видом и объемом используемых заполнителей позволяет получать высокопрочные

самоуплотняющиеся легкие, мелкозернистые и тяжелые бетоны классов В60–В100 марок по средней плотности D1800–D2500 с регулируемыми деформационными характеристиками.

Ключевые слова: высокопрочная цементная система, модифицированный цементный камень, мелкозернистый бетон, тяжелый бетон, легкий бетон, самоуплотняющийся бетон, прочность на сжатие, модуль упругости, диаграмма деформирования, предельные относительные деформации сжатия

Для цитирования: Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Карпенко Н.И., Селютин Н.М., Моисеенко Г.А., Безгодов И.М. Влияние вида заполнителя на физико-технические характеристики высокопрочных самоуплотняющихся цементных систем // *Бетон и железобетон*. 2025. № 2 (627). С. 27–42. DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-2\(627\)-27-42](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-2(627)-27-42). EDN: TSNYUO

Вклад авторов

Каприелов С.С. – осуществлял научное руководство исследованиями и анализ полученных результатов.

Шейнфельд А.В. – осуществлял руководство экспериментом и анализ полученных результатов.

Карпенко Н.И. – осуществлял научное руководство исследований диаграмм деформирования цементных систем.

Селютин Н.М. – осуществлял выполнение экспериментальных работ и анализ полученных результатов.

Моисеенко Г.А. – осуществлял анализ диаграмм деформирования цементных систем.

Безгодов И.М. – осуществлял выполнение экспериментальных работ и анализ диаграмм деформирования цементных систем.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 20.02.2025

Поступила после рецензирования 28.03.2025

Принята к публикации 03.04.2025

**S.S. KAPRIELOV^{1,2}, A.V. SHEYNFELD^{1,2,✉}, N.I. KARPENKO³,
N.M. SELYUTIN^{1,4}, G.A. MOISEENKO³, I.M. BEZGODOV²**

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

² Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation

³ Federal State Budgetary Institution "Scientific Research Institute of Construction Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences" (FSBI SRICP RAACS), Locomotive Passage, 21, Moscow, 127238, Russian Federation

⁴ LLC "Master Concrete Enterprise", Saratovskaya str., 31, Moscow, 109518, Russian Federation

THE INFLUENCE OF THE TYPE OF AGGREGATES ON THE PHYSICAL AND TECHNICAL CHARACTERISTICS OF HIGH-STRENGTH SELF-COMPACTING CEMENT SYSTEMS

Abstract

Introduction. The results of studies of high-strength self-compacting cement systems with various types of aggregate are presented, that show that the reduced

average density and the possibility of changing the modulus of elasticity in a wide range make high-strength lightweight concretes the preferred structural material, allowing to reduce the weight and the consumption

of reinforcement of reinforced concrete structures of high-rise buildings, bridges and overpasses, as well as buildings being built in earthquake-prone regions.

Aim. Comparative assessment of the effect of the type of aggregate of dense rocks and light porous materials on the average density, strength and deformation characteristics of high-strength self-compacting cement systems – cement stone, fine-grained, heavy and light concrete.

Materials and methods. All cement systems were manufactured using modified high-strength cement stone of the same quality based on Portland cement and an organomineral modifier of the MB type in an amount of 24 % by weight of cement with a true water-binding ratio of 0.25. Aggregates of dense rocks (quartz sand, granite and basalt crushed stone) and light porous materials of artificial (expanded clay gravel) and natural (tuff crushed stone) origin were used in the production of concrete.

Results. The strength (cubic and prismatic compressive strength) and deformation (initial modulus of elasticity, Poisson ratio and maximum relative compression deformations) characteristics of six high-strength self-compacting cement systems of compressive strength classes B64–B88 with a wide range of average density (from 1842 to 2497 kg/m³) were determined using standardized and special techniques. The resistance of concrete to axial compression is in the range of 55.2–78.4 MPa and significantly exceeds the regulatory values for SP 63.13330.2018. The maximum relative deformations of high-strength concretes depend more on the volume content of cement stone than on the type of aggregate and compressive strength. The introduction of light porous aggregates into the cement system instead of aggregates from dense rocks made it possible to obtain high-strength self-compacting lightweight concretes of classes B64–B72 with an average density reduced by 17–26 % and an elastic modulus of 29.5–33.9 MPa.

Conclusions. Varying the type and volume of aggregates used makes it possible to obtain high-strength self-compacting light, fine-grained and heavy concretes of classes B60–B100 grades of average density D1800–D2500 with adjustable deformation characteristics.

Keywords: high-strength cement system, modified cement stone, fine-grained concrete, heavy concrete, light concrete, self-compacting concrete, compressive strength, modulus of elasticity, deformation diagram, marginal relative compression deformations

For citation: Kaprielov S.S., Sheynfeld A.V., Karpenko N.I., Selyutin N.M., Moiseenko G.A., Bezgodov I.M. The influence of the type of aggregates on the physical and technical characteristics of high-strength self-compacting cement systems. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2025, no. 2 (627), pp. 27–42. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-2\(627\)-27-42](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-2(627)-27-42). EDN: TSNYUO

Authors contribution statement

Kaprielov S.S. – provided scientific guidance for research and analysis of the results obtained.

Sheynfeld A.V. – supervised the experiment and analyzed the obtained results.

Karpenko N.I. – provided scientific guidance for the study of deformation diagrams of cement systems.

Selyutin N.M. – carried out experimental work and analyzed the obtained results.

Moiseenko G.A. – analyzed the deformation diagrams of cement systems.

Bezgodov I.M. – carried out experimental work and analyzed diagrams of deformation of cement systems.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 20.02.2025

Revised 28.03.2025

Accepted 03.04.2025

Введение

Увеличение объемов строительства уникальных сооружений, к которым, в частности, относятся высотные здания, мосты и путепроводы, так же, как проблема обеспечения сейсмостойкости современных зданий, возводимых в сейсмоопасных регионах, требует применения высокопрочных технологичных бетонов пониженной плотности с управляемыми деформационными характеристиками [1–4].

Высокий модуль упругости (40–56 ГПа) тяжелых бетонов классов В60–В100 позволяет повысить жесткость вертикальных конструкций, сократить расход арматуры и снизить перемещения высотных зданий от ветрового воздействия [5]. Однако высокая средняя плотность тяжелых бетонов (2360–2500 кг/м³) повышает долю собственного веса в нагрузках, воспринимаемых конструкциями, и ограничивает строительство большепролетных строений и массивных сооружений на слабых грунтах.

Пониженная средняя плотность (1800–2000 кг/м³) и высокая прочность, соответствующая классам В50–В70, делают самоуплотняющиеся легкие бетоны предпочтительным конструкционным материалом, позволяющим снизить массу сооружений, сократить расход арматуры и др. [2, 3, 6–10]. Несмотря на то, что появились технологические возможности получения таких бетонов, основанные на последних достижениях в области модифицирования цементных систем – получения высокопрочного цементного камня [2, 11–13], остаются вопросы, связанные с выбором заполнителей, а также с определением нормативных характеристик, необходимых для расчета и проектирования конструкций.

С учетом вышеизложенного **целью** работы являлась сравнительная оценка влияния вида заполнителя из плотных горных пород и легких пористых материалов искусственного и природного происхождения, доступных для стройиндустрии РФ, на среднюю плотность, прочностные и деформационные характеристики высокопрочных самоуплотняющихся цементных систем – цементного камня, мелкозернистого, тяжелого и легкого бетонов.

Материалы и методы

Для изготовления высокопрочных цементных систем в лабораторных условиях использовали материалы (портландцемент, органоминеральный модификатор, песок, щебень или гравий), которые массово производятся в РФ и применяются при производстве бетонных смесей для различных объектов строительства. В качестве мелкого заполнителя во всех составах использовался кварцевый песок. В качестве крупного заполнителя использованы разновидности крупного заполнителя как из плотных горных пород (гранитный и базальтовый щебень), так и легкие пористые заполнители (искусственный – керамзитовый гравий, природный – туфовый

щебень). Основанием для выбора мелкого и четырех разных видов крупного заполнителя являлись различия в их происхождении, в средней плотности, модуле упругости и в параметре, характеризующем прочность – «потеря массы при сжатии в цилиндре» [14–17], которые позволяют получить высокопрочные цементные системы (цементный камень, мелкозернистый, тяжелый и легкий бетоны) из самоуплотняющихся смесей [5, 6].

Характеристики используемых материалов:

- портландцемент ЦЕМ I 42,5 ЖИ с нормальной густотой 24,8 %, истинной плотностью 3100 кг/м³, производства завода «Пролетарий» АО «Новоросцемент», соответствующий требованиям ГОСТ Р 55224-2020 [18];

- органоминеральные модификаторы бетона МБ6-50С А-II-3 и МБ10-50С А-II-2 истинной плотностью 2200 кг/м³, включающие в себя микрокремнезем (47 и 45 %), золу-уноса (47 и 45 %) и суперпластификатор (в пересчете на сухое вещество 6 и 10 %) [19], производства ООО «Предприятие Мастер Бетон», соответствующие требованиям ГОСТ Р 56178-2014 [20];

- песок кварцевый I класса с модулем крупности Мкр = 2,42, истинной плотностью 2650 кг/м³, модулем упругости 55* ГПа, производства ГОК «Орешки», соответствующий требованиям ГОСТ 8736-2014 [21];

- щебень гранитный фракции 5–10 мм, марки по дробимости 1200, истинной плотностью 2650 кг/м³, модулем упругости 60* ГПа, производства карьера «Микашевичи», соответствующий требованиям ГОСТ 8267-93 [14];

- щебень базальтовый фракции 4–8 мм, производства карьера «Булатовский базальт», марки по дробимости 1400, истинной плотностью 3000 кг/м³, модулем упругости 80* ГПа, соответствующий требованиям ГОСТ 32703-2014 [15];

- гравий керамзитовый фракции 5–10 мм, марки по насыпной плотности М800, марки по прочности П150, средней плотностью 1460 кг/м³, производства ООО «Винзилинский завод керамзитового гравия», соответствующий требованиям ГОСТ 32496-2013 [16];

- щебень туфовый фракции 5–10 мм, марки по насыпной плотности М1000, марки по прочности П200, средней плотностью 1720 кг/м³, месторождения «Святогорское» Хабаровского края, соответствующий требованиям ГОСТ 22263-76 [17];

- вода для затворения бетонных смесей, соответствующая требованиям ГОСТ 23732-2011 [22].

* Модули упругости заполнителей из плотных горных пород приняты по усредненным данным [23–25].

Составы и свойства смесей

В лабораторных условиях из вышеуказанных материалов были приготовлены шесть составов высокопрочных цементных систем (цементного камня, мелкозернистого, тяжелых и легких бетонов) из самоуплотняющихся смесей с добавкой модификатора МБ в количестве 24 % от массы цемента при истинном (с учетом водопотребности легкого пористого заполнителя) водовязующем отношении $V/(Ц+МБ) = 0,25$.

Использование при производстве смесей цементного камня одного качества позволяет оценить влияние различных видов заполнителя на физико-технические характеристики высокопрочных самоуплотняющихся цементных систем.

Составы и свойства самоуплотняющихся смесей цементных систем представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1
Table 1

Составы самоуплотняющихся смесей
Compositions of self-compacting mixtures

№ состава	Составы самоуплотняющихся смесей цементных систем, кг/м³ / м³/м³							
	Ц	МБ	П	Щ _{гр}	Щ _{баз}	Г _{кер}	Щ _{туф}	В
1	1336	321 ¹	–	–	–	–	–	414
	0,431	0,146	–	–	–	–	–	0,414
2	795	193 ²	988	–	–	–	–	247
	0,256	0,088	0,373	–	–	–	–	0,247
3	497	120 ²	787	787	–	–	–	157
	0,160	0,055	0,297	0,291	–	–	–	0,157
4	510	123 ²	900	–	807	–	–	161
	0,165	0,056	0,340	–	0,269	–	–	0,161
5	487	119 ²	569	–	–	569	–	169
	0,157	0,054	0,215	–	–	0,390	–	0,169
6	538	130 ²	631	–	–	–	584	176
	0,157	0,054	0,215	–	–	–	0,340	0,176

Примечания:

Ц – портландцемент; МБ – органоминеральный модификатор: ¹)МБ6-50С А-II-3 и ²)МБ10-50С А-II-2; П – песок; Щ_{гр} – гранитный щебень; Щ_{баз} – базальтовый щебень; Г_{кер} – гравий керамзитовый; Щ_{туф} – туфовый щебень; В – вода.

Таблица 2
Table 2

Свойства самоуплотняющихся смесей
Properties of self-compacting mixtures

№ состава	Свойства смесей цементных систем				
	РК, см	ρ, кг/м³	V _{ист} , м³/м³	V _{цк} , м³/м³	В/(Ц+МБ)
1	76	2071	0,991	0,991	0,25
2	72	2223	0,964	0,591	0,25
3	62	2348	0,960	0,372	0,25
4	68	2501	0,990	0,381	0,25
5	65	1913	0,985	0,380	0,28
6	57	2059	0,986	0,409	0,26

Примечания:

РК – расплыв нормального конуса; ρ – средняя плотность смеси; V_{ист} – объем цементной системы без технологических пор ($V_{ист} = V_{цк} + V_{заполн}$); V_{цк} – объем цементного камня в составе смеси ($V_{цк} = V_{Ц} + V_{МБ} + V_{воды}$); В/(Ц+МБ) – водовязующее отношение.

Смеси изготавливались в смесителе принудительного действия объемом 0,025 м³ с перемешиванием в течение 5 мин. Результаты испытаний смесей показали (табл. 2), что их средняя плотность (ρ) зависит от объема и плотности заполнителя и изменяется в широком диапазоне – от 1914 до 2500 кг/м³, в том числе:

- цементный камень (без заполнителя) – 2071 кг/м³;
- мелкозернистый бетон на кварцевом песке – 2223 кг/м³;
- тяжелый бетон на кварцевом песке и гранитном или базальтовом щебне – 2348 и 2501 кг/м³;
- легкий бетон на кварцевом песке и керамзитовом гравии или туфовом щебне – 1913 и 2059 кг/м³.

Подвижность всех смесей, определенная по расплыву нормального конуса по ГОСТ Р 59715-2022 [26], находится в диапазоне от 57 до 76 см. Это позволяет, учитывая также отсутствие признаков водоотделения и расслоения смесей, согласно ГОСТ Р 59714-2021 [27], отнести их к категории самоуплотняющихся.

Объект исследований и методы испытаний

Из приготовленных смесей формовались образцы: кубы размером 100 × 100 × 100 мм в количестве 6 шт. для определения кубиковой прочности на сжатие по ГОСТ 10180-2012 [28] и ГОСТ 31914-2012 [29]; призмы размером 100 × 100 × 400 мм в количестве 3 шт. для определения призмочной прочности на сжатие, модуля упругости и коэффициента Пуассона по ГОСТ 24452-2023 [30]; призмы размером 70,7 × 70,7 × 280 мм в количестве 3 шт. для установления полных диаграмм деформирования цементных систем по методике [31, 32].

Контрольные образцы хранились до испытаний 100–110 суток в нормальных условиях (температура плюс (20 ± 2) °С, относительная влажность (95 ± 5) %). Нагружение призм производилось ступенями, равными 0,1 R_b , с выдержкой на каждой ступени 5 минут до разрушения образцов. Модуль упругости и коэффициент Пуассона определяли при уровне нагружения 30–40 % от величины призмочной прочности.

Значения средней плотности, прочности на сжатие, модуля упругости, коэффициента Пуассона и предельных относительных деформаций принимались как среднее значение результатов испытаний трех образцов.

С учетом того, что цементные системы содержат различный объем вовлеченного воздуха, для оценки влияния вида заполнителя на модуль упругости бетона определялись истинные значения модуля упругости затвердевшей системы без технологической пористости по формуле:

$$E_{ист} = E_b \times V_b / V_{ист}, \quad (1)$$

где $E_{ист}$ – модуль упругости цементной системы без технологической пористости, ГПа;

E_b – модуль упругости цементной системы с технологической пористостью, определенный по ГОСТ 24452-2023 [30], ГПа;

V_b – объем цементной системы с технологической пористостью, равный 1 м³/м³;

$V_{ист}$ – объем цементной системы без технологической пористости, определяемый как сумма объемов всех компонентов смеси, входящих в систему, м³/м³.

Фактический класс цементных систем по прочности на сжатие ($B_{ф}$) и сопротивление осевому сжатию (R_{bn}) определялись в соответствии с ГОСТ 18105-2018 [33] с учетом требований ГОСТ 31914-2012 [29] к минимальному значению коэффициентов вариации и требуемой прочности по формулам:

$$B_{ф} = \frac{R}{K_T} = \frac{R}{1,14}, \quad (2)$$

$$R_{bn} = R_b \left(1 - 1,64 \times \frac{V}{100} \right) = 0,836 R_b, \quad (3)$$

где $B_{ф}$ – фактический класс цементной системы по прочности на сжатие, МПа;

R – кубиковая прочность цементной системы на сжатие, МПа;

R_{bn} – сопротивление цементной системы осевому сжатию, МПа;

R_b – призмочная прочность цементной системы на сжатие, МПа;

K_T – коэффициент требуемой прочности, принимаемый равным 1,14 в случае определения прочности по контрольным образцам в соответствии с требованиями ГОСТ 31914-2012 [29];

V – коэффициент вариации прочности цементной системы, принимаемый равным 10 % в случае определения прочности по контрольным образцам в соответствии с требованиями ГОСТ 31914-2012 [29].

Результаты испытаний и дискуссия

Результаты испытаний цементных систем по показателям: средняя плотность (ρ) и марка по средней плотности (D), кубиковая прочность (R) и фактический класс по прочности на сжатие ($B_{ф}$), призмочная прочность (R_b) и сопротивление осевому сжатию (R_{bn}), модуль упругости (E_b), коэффициент Пуассона (ν_b), предельная относительная деформация сжатия (ϵ_{b0}), представлены в табл. 3, а полные диаграммы деформирования цементных систем на рис. 1.

Таблица 3

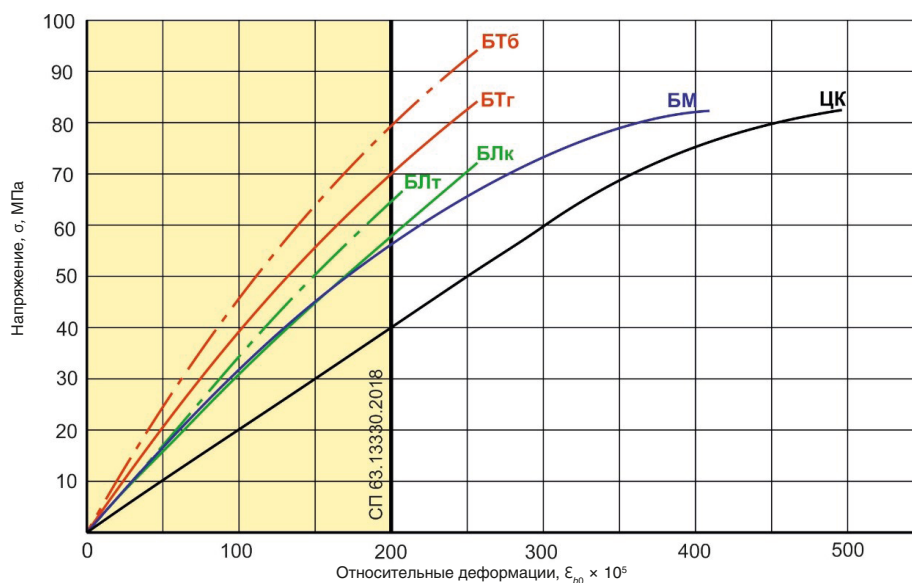
Table 3

Прочностные и деформационные характеристики цементных систем
Strength and deformation characteristics of cement systems

№ состава	Прочностные и деформационные характеристики цементных систем					
	ρ/D , кг/м ³	R/B_{ϕ} , МПа	R_b/R_{bn} , МПа	$E_b/E_{ист}$, ГПа	ν_b	$\epsilon_{b0} \times 10^5$
1	2063	96,7	82,9	21,0	0,27	493
	D2100	$B_{\phi} 85$	69,3	21,2		
2	2219	90,2	81,3	30,7	0,18	407
	D2300	$B_{\phi} 79$	68,0	31,9		
3	2360	93,7	83,8	40,0	0,20	252
	D2400	$B_{\phi} 82$	70,1	41,7		
4	2497	100,5	93,8	47,0	0,25	258
	D2500	$B_{\phi} 88$	78,4	47,5		
5	1842*	83,0	73,9	29,5	0,23	263
	D1900	$B_{\phi} 72$	61,8	29,8		
6	1948*	73,7	66,0	33,9	0,23	210
	D2000	$B_{\phi} 64$	55,2	34,4		

Примечания:

ρ – средняя плотность (*средняя плотность в сухом состоянии); D – марка по средней плотности; R – кубиковая прочность на сжатие; B_{ϕ} – фактический класс по прочности на сжатие; R_b – призмная прочность на сжатие; R_{bn} – сопротивление осевому сжатию; E_b – начальный модуль упругости; $E_{ист}$ – начальный модуль упругости без технологических пор; ν_b – коэффициент Пуассона; ϵ_{b0} – предельная относительная деформация сжатия.



ЦК – цементный камень (состав № 1);
 БМ – мелкозернистый бетон на кварцевом песке (состав № 2);
 БТ_г – тяжелый бетон на кварцевом песке и гранитном щебне (состав № 3);
 БТ_б – тяжелый бетон на кварцевом песке и базальтовом щебне (состав № 4);
 БЛ_к – легкий бетон на кварцевом песке и керамзитовом гравии (состав № 5);
 БЛ_т – легкий бетон на кварцевом песке и туфовом щебне (состав № 6).

Рис. 1. Диаграммы деформирования высокопрочных цементных систем
Fig. 1. Deformation diagrams of high-strength cement systems

Средняя плотность

Введение в цементные системы различных видов заполнителя приводит к значительным изменениям их средней плотности от 1842 кг/м³ (легкий бетон на керамзитовом гравии) до 2497 кг/м³ (тяжелый бетон на базальтовом щебне), что соответствует их маркам по средней плотности от D1900 до D2500 (табл. 3).

Введение в цементную систему легких пористых заполнителей (туфового щебня и керамзитового гравия) вместо заполнителей из плотных горных пород (гранитного и базальтового щебня) позволяет понизить среднюю плотность высокопрочных самоуплотняющихся бетонов на 17–26 % (рис. 2).

Прочность на сжатие

Кубиковая прочность на сжатие (R) всех цементных систем в возрасте 100–110 суток находится в диапазоне от 73,7 до 100,5 МПа, соответствует фактическим классам бетона по прочности на сжатие от В_ф64 до В_ф88 (табл. 3, рис. 3), что позволяет отнести их к высокопрочным бетонам, в том числе:

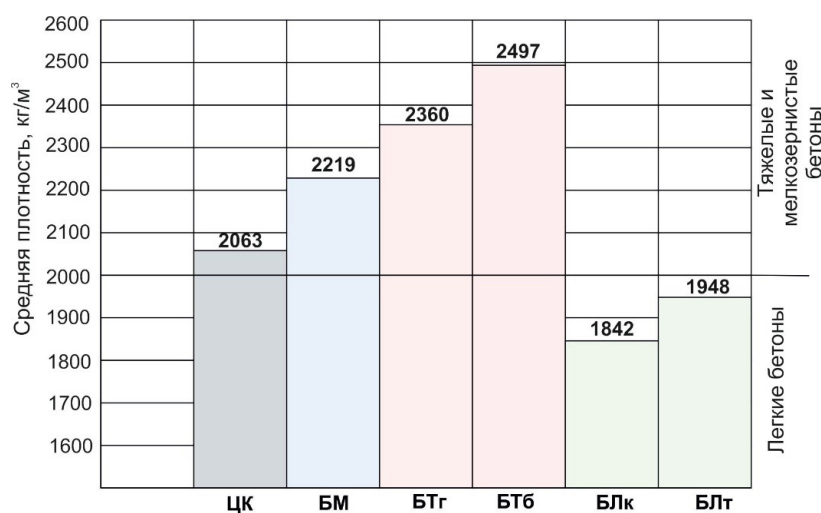
- цементный камень марки по средней плотности D2100 имеет прочность на сжатие 96,7 МПа, что соответствует классу В_ф85;
- мелкозернистый бетон (на кварцевом песке) марки по средней плотности D2300 имеет прочность на сжатие 90,2 МПа, что соответствует классу В_ф79;
- тяжелые бетоны (на гранитном и базальтовом щебне) марок по средней плотности D2400 и D2500 имеют прочность на сжатие 93,7 и 100,5 МПа, что соответствует классам В_ф82 и В_ф88;

– легкие бетоны (на керамзитовом гравии и туфовом щебне) марок по средней плотности D1900 и D2000 имеют прочность на сжатие 83,0 и 73,7 МПа, что соответствует классам В_ф72 и В_ф64 и на 65–80 % превышает максимальное значение класса (В40) для легкого бетона с маркой по средней плотности D2000 по СП 63.13330.2018 [34].

Призменная прочность (R_b) цементных систем на сжатие в возрасте 100–110 суток находится в диапазоне от 66,0 до 93,8 МПа. Оценка вышеприведенных результатов по критерию коэффициента призменной прочности, определяемого отношением призменной прочности бетона на сжатие к кубиковой ($K_{пр} = R_b/R$), показывает, что его фактические значения находятся в диапазоне от 0,86 до 0,93 и превосходят значения этого коэффициента, рассчитанного по параметрам, приведенным в СП 63.13330.2018 [34] (от 0,71 до 0,73).

Предельные относительные деформации сжатия

Полные диаграммы деформирования при сжатии показывают (рис. 1), что нисходящая ветвь у всех высокопрочных цементных систем отсутствует. Это соответствует результатам, полученным для высокопрочных тяжелых бетонов в [5, 35]. Предельные относительные деформации сжатия высокопрочных цементных систем классов В_ф64–В_ф88 находятся в широком диапазоне от 210×10^{-5} до 493×10^{-5} и превышают нормативное значение 200×10^{-5} , приведенное в СП 63.13330.2018 [34].

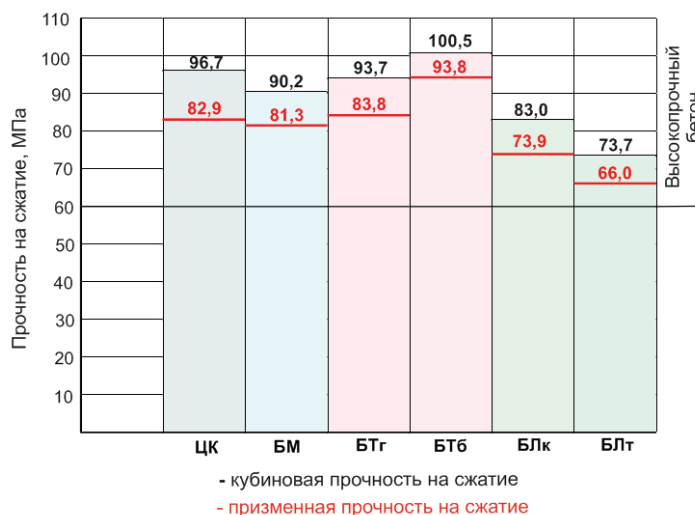


ЦК – цементный камень (состав № 1);
БМ – мелкозернистый бетон на кварцевом песке (состав № 2);
БТ_г – тяжелый бетон на кварцевом песке и гранитном щебне (состав № 3);
БТ_б – тяжелый бетон на кварцевом песке и базальтовом щебне (состав № 4);
ЛБ_к – легкий бетон на кварцевом песке и керамзитовом гравии (состав № 5);
ЛБ_т – легкий бетон на кварцевом песке и туфовом щебне (состав № 6).

Рис. 2. Влияние вида заполнителя на среднюю плотность цементных систем
Fig. 2. Influence of the type of aggregate on the average density of cement systems

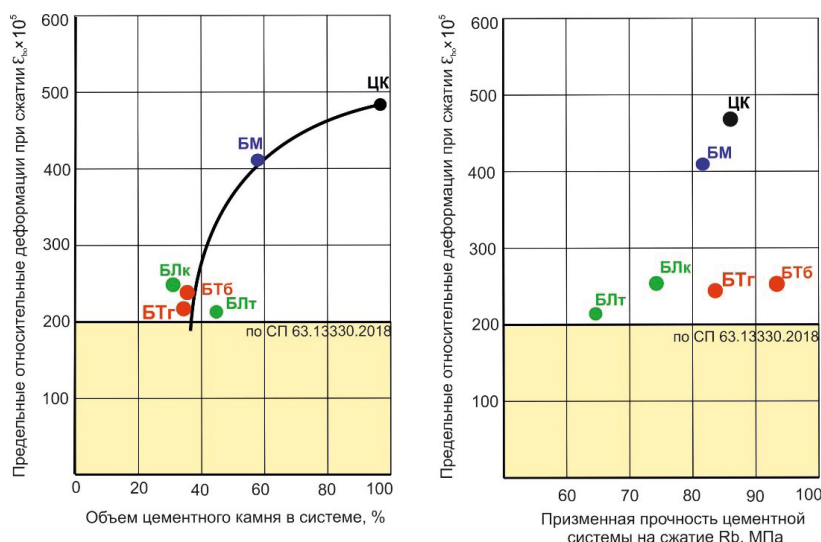
Следует отметить, что наибольшей деформативностью («податливостью») обладает цементный камень, предельные относительные деформации которого (493×10^{-5}) в 2,5 раза превышают нормативное значение. Таким образом, предельные относитель-

ные деформации высокопрочных бетонов в большей степени зависят от объемного содержания в них цементного камня, чем от вида заполнителя и прочности на сжатие (рис. 4).



ЦК – цементный камень (состав № 1);
 БМ – мелкозернистый бетон на кварцевом песке (состав № 2);
 БТ_г – тяжелый бетон на кварцевом песке и гранитном щебне (состав № 3);
 БТ_б – тяжелый бетон на кварцевом песке и базальтовом щебне (состав № 4);
 БЛ_к – легкий бетон на кварцевом песке и керамзитовом гравии (состав № 5);
 БЛ_т – легкий бетон на кварцевом песке и туфовом щебне (состав № 6).

Рис. 3. Влияние вида заполнителя на прочность цементных систем на сжатие
Fig. 3. Influence of the type of aggregate on the compressive strength of cement systems



ЦК – цементный камень (состав № 1);
 БМ – мелкозернистый бетон на кварцевом песке (состав № 2);
 БТ_г – тяжелый бетон на кварцевом песке и гранитном щебне (состав № 3);
 БТ_б – тяжелый бетон на кварцевом песке и базальтовом щебне (состав № 4);
 БЛ_к – легкий бетон на кварцевом песке и керамзитовом гравии (состав № 5);
 БЛ_т – легкий бетон на кварцевом песке и туфовом щебне (состав № 6).

Рис. 4. Влияние объема цементного камня на предельные относительные деформации высокопрочных цементных систем
Fig. 4. The effect of the volume of cement stone on the ultimate relative deformations of high-strength cement systems

Предельные относительные деформации при сжатии мелкозернистого бетона с призменной прочностью 81,3 МПа принимают повышенные значения 407×10^{-5} , что связано с высоким ($0,591 \text{ м}^3/\text{м}^3$) объемным содержанием цементного камня в его составе. У тяжелых и легких бетонов с призменной прочностью 83,8–93,8 МПа и 66,0–73,9 МПа с примерно одинаковым объемом цементного камня ($0,372$ – $0,409 \text{ м}^3/\text{м}^3$) предельные относительные деформации при сжатии находятся в узком диапазоне – от 210×10^{-5} до 263×10^{-5} .

Коэффициент Пуассона

Коэффициент Пуассона высокопрочных цементных систем классов В_ф64–В_ф88 находится в диапазоне от 0,18 (мелкозернистый бетон) до 0,27 (цементный камень). В целом, коэффициент Пуассона для тяжелых и легких высокопрочных бетонов находится в диапазоне 0,2–0,25, соответствует ранее полученным результатам [5] и нормативному значению коэффициента поперечных деформаций $\nu_{b,p} = 0,2$ по СП 63.13330.2018 [34].

Модуль упругости

Начальный модуль упругости высокопрочных цементных систем классов В_ф64–В_ф88 находится в широком диапазоне – от 21 до 47 ГПа (табл. 3, рис. 5), в значительной степени зависит от объема цементного камня в составе бетона и вида используемого заполнителя.

Полученные результаты (рис. 5) показывают, что:

- цементный камень класса В_ф85 и марки по средней плотности D2100 имеет наименьший модуль упругости – 21 ГПа;
- мелкозернистый бетон (на кварцевом песке)

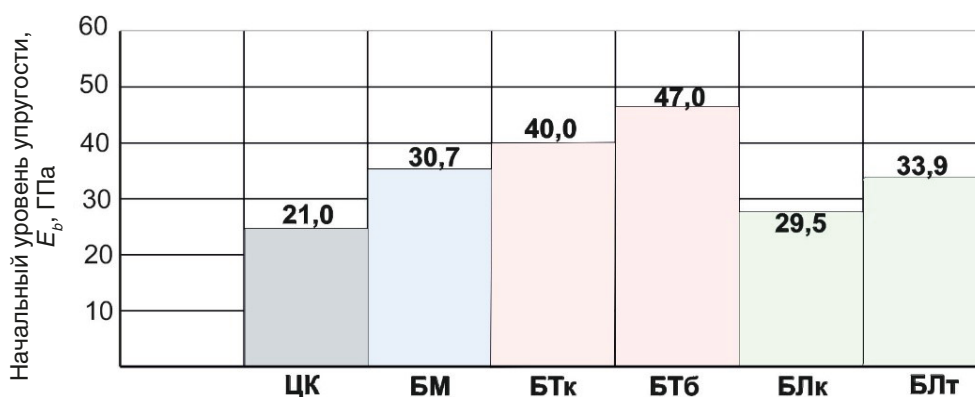
класса В_ф79 и марки по средней плотности D2300 с объемом цементного камня $0,591 \text{ м}^3/\text{м}^3$ имеет более высокий модуль упругости – 30,7 ГПа;

– тяжелые бетоны (на гранитном и базальтовом щебне) классов В_ф82 и В_ф88 соответственно, марок по средней плотности D2400 и D2500 с объемом цементного камня $0,372$ и $0,381 \text{ м}^3/\text{м}^3$ имеют наибольший модуль упругости – 40 и 47 ГПа, что в два раза выше, чем модуль упругости цементного камня;

– легкие бетоны (на керамзитовом гравии и туфовом щебне) классов В_ф72 и В_ф64 соответственно, марок по средней плотности D1900 и D2000 с объемом цементного камня $0,380$ и $0,409 \text{ м}^3/\text{м}^3$ имеют модуль упругости 29,5 и 33,9 ГПа, что на 37–58 % превышает максимальное значение модуля упругости (21,5 ГПа) для легкого бетона класса В40 марки по средней плотности D2000 по СП 63.13330.2018 [34].

Таким образом, с учетом данных [6], показано, что с использованием легких пористых заполнителей искусственного (керамзитовый гравий) и природного (туфовый щебень) происхождения возможно получение высокопрочных самоуплотняющихся конструкционных легких бетонов классов В50–В70 с маркой по средней плотности D1800–D2000 и с широким диапазоном начального модуля упругости 25–35 ГПа.

С использованием полученных результатов (табл. 2 и 3) проведена оценка достоверности расчета начального модуля упругости бетонов по объемам и модулям упругости входящих в него цементного камня и заполнителей из плотных горных пород (кварцевого песка, гранитного и базальтового щебня) по формуле [5]:



- ЦК – цементный камень (состав № 1);
 БМ – мелкозернистый бетон на кварцевом песке (состав № 2);
 БТ_г – тяжелый бетон на кварцевом песке и гранитном щебне (состав № 3);
 БТ_б – тяжелый бетон на кварцевом песке и базальтовом щебне (состав № 4);
 БЛ_к – легкий бетон на кварцевом песке и керамзитовом гравии (состав № 5);
 БЛ_т – легкий бетон на кварцевом песке и туфовом щебне (состав № 6).

Рис. 5. Влияние вида заполнителя на начальный модуль упругости цементных систем
Fig. 5. Influence of the type of aggregate on the initial modulus of elasticity of cement systems

$$E_{bp} = E_{цк} \times V_{цк} + E_n \times V_n + E_{щ} \times V_{щ}, \quad (4)$$

где E_{bp} – расчетное значение модуля упругости бетона, ГПа;

$E_{цк}$, E_n и $E_{щ}$ – модули упругости цементного камня, песка и щебня соответственно, ГПа;

$V_{цк}$, V_n и $V_{щ}$ – удельные объемы цементного камня, песка и щебня в бетоне соответственно, м³/м³.

Результаты оценки (табл. 4) показывают, что представленную формулу можно использовать для определения начального модуля упругости бетонов по объемам и модулям упругости входящих в него цементного камня и заполнителей, так как погрешность вычислений не превышает 4 %.

С учетом положительной оценки формулы (4) произведен расчет значений модуля упругости легких пористых заполнителей керамзитового гравия и туфового щебня в высокопрочном легком бетоне по формуле:

$$E_{лз} = (E_{ист} - V_{цк} \times E_{цк} - V_n \times E_n) / V_{лз}, \quad (5)$$

где $E_{лз}$ – расчетное значение модуля упругости легкого заполнителя (керамзитового гравия или туфового щебня) в бетоне, ГПа;

$E_{ист}$, $E_{цк}$ и E_n – модули упругости легкого бетона без технологических пор, цементного камня и песка соответственно, ГПа;

$V_{цк}$, V_n и $V_{лз}$ – удельные объемы цементного камня, песка и легкого заполнителя (керамзитового гравия

или туфового щебня) в бетоне соответственно, м³/м³.

Результаты расчетов (табл. 5) показывают, что значения модуля упругости легких пористых заполнителей в высокопрочном легком бетоне составляют:

– 26,0 ГПа – для керамзитового гравия фракции 5–10 мм, марки по насыпной плотности М800, марки по прочности П150, производства ООО «Винзилинский завод керамзитового гравия» и превышает диапазон значений 2–18,5 ГПа, полученных в [36, 37];

– 37,0 ГПа – для туфового щебня фракции 5–10 мм, марки по насыпной плотности М1000, марки по прочности П200, месторождения «Святогорское» Хабаровского края и находится в диапазоне значений 19–88 ГПа, полученных в [38, 39].

Повышенное значение модуля упругости легких пористых заполнителей (керамзитового гравия и туфового щебня) может быть обусловлено их высокой плотностью (М800 и М1000), а также тем, что в процессе испытаний легкого бетона зерна заполнителя находятся в «обойме» из высокопрочного мелкозернистого бетона, который ограничивает их поперечные и продольные деформации.

Таким образом, варьирование видом и объемом используемых заполнителей из плотных горных пород и легких пористых материалов, обладающих различной средней плотностью, прочностью и модулем упругости, позволяет управлять в широком диапазоне средней плотностью и модулем упругости конструкционных высокопрочных самоуплотняющихся бетонов.

Таблица 4
Table 4

Расчет начального модуля упругости бетонов по объемам и модулям упругости входящих в него компонентов
Calculation of the initial modulus of elasticity of concrete by volume and modulus of elasticity of its components

Удельные объемы и модули упругости компонентов бетона						$E_{бр}$, ГПа	$E_{ист}$, ГПа
ЦК		П		Щ			
$V_{цк}$, м³/м³	$E_{цк}$, ГПа	$V_{п}$, м³/м³	$E_{п}$, ГПа	$V_{щ}$, м³/м³	$E_{щ}$, ГПа		
Состав 2 – мелкозернистый бетон на кварцевом песке							
0,591	21,2	0,373	55,0	–	–	33,0	31,9
Состав 3 – тяжелый бетон на кварцевом песке и гранитном щебне							
0,372	21,2	0,297	55,0	0,291	60,0	41,7	41,7
Состав 4 – тяжелый бетон на кварцевом песке и базальтовом щебне							
0,381	21,2	0,340	55,0	0,269	80,0	48,3	47,5

Примечания:

ЦК – цементный камень; П – песок; Щ – щебень; $V_{цк}$, V_n и $V_{щ}$ – удельные объемы цементного камня, песка и щебня в бетоне; $E_{цк}$, E_n и $E_{щ}$ – модули упругости цементного камня, песка и щебня; E_{bp} – расчетное значение модуля упругости бетона; $E_{ист}$ – модуль упругости бетона без технологических пор.

Таблица 5

Table 5

Расчет начального модуля упругости легких заполнителей в бетоне
Calculation of the initial modulus of elasticity of light aggregates in concrete

Удельные объемы и модули упругости компонентов бетона						E_{bp} , ГПа	$E_{ист}$, ГПа
ЦК		П		ЛЗ			
$V_{цк}$, м³/м³	$E_{цк}$, ГПа	V_p , м³/м³	E_p , ГПа	$V_{лз}$, м³/м³	$E_{лз}$, ГПа		
Состав 4 – легкий бетон на кварцевом песке и керамзитовом гравии							
0,380	21,2	0,215	55,0	0,390	26,0	30,0	29,8
Состав 5 – легкий бетон на кварцевом песке и туфовом щебне							
0,409	21,2	0,238	55,0	0,340	37,0	34,3	34,4

Примечания:

ЦК – цементный камень; П – песок; Щ – щебень; ЛЗ – легкий пористый заполнитель; $V_{цк}$, V_p и $V_{щ}$ – удельные объемы цементного камня, песка и щебня в бетоне соответственно; $E_{цк}$, E_p и $E_{щ}$ – модули упругости цементного камня, песка и щебня соответственно; $E_{бр}$ – расчетное значение модуля упругости бетона; $E_{ист}$ – модуль упругости бетона без технологических пор.

Выводы

1. Определены в возрасте 100–110 суток прочностные (кубиковая и призмная прочность на сжатие) и деформационные (начальный модуль упругости, коэффициент Пуассона и предельные относительные деформации сжатия) характеристики шести высокопрочных самоуплотняющихся цементных систем (цементного камня, мелкозернистого, тяжелых и легких бетонов) классов по прочности на сжатие В64–В88 с широким диапазоном средней плотности от 1842 до 2497 кг/м³ с использованием стандартных и специальных методик.

2. Высокопрочный цементный камень, использующийся во всех цементных системах, на основе обычного портландцемента ЦЕМ I 42,5 и органоминерального модификатора типа МБ, класса В85 с кубиковой и призмной прочностью на сжатие 96,7 и 82,9 МПа соответственно имел минимальное значение модуля упругости 21 ГПа, максимальные коэффициент Пуассона 0,27 и предельные относительные деформации сжатия 493×10^{-5} . Совокупность вышеперечисленных характеристик показывает, что наиболее деформативным («податливым») компонентом высокопрочных бетонов является цементный камень.

3. Кубиковая прочность на сжатие мелкозернистого, тяжелых и легких бетонов находится в диапазоне 73,7–100,5 МПа, а сопротивление бетонов осевому сжатию составляет от 55,2 до 78,4 МПа и значительно превосходит нормативные значения, приведенные в СП 63.13330.2018 [34].

4. Полученные полные диаграммы деформирования показывают, что нисходящая ветвь у всех высокопрочных цементных систем классов В64–В88 отсутствует. Предельные относительные деформации сжатия мелкозернистого

(407×10^{-5}), тяжелых ($252 \times 10^{-5} - 258 \times 10^{-5}$) и легких ($210 \times 10^{-5} - 263 \times 10^{-5}$) высокопрочных бетонов в большей степени зависят от объемного содержания цементного камня, чем от вида заполнителя и прочности на сжатие.

5. Коэффициент Пуассона мелкозернистого, тяжелых и легких бетонов классов В64–В88 находится в узком диапазоне (от 0,18 до 0,25) и в целом соответствует нормативному значению 0,2, приведенному в СП 63.13330.2018 [34].

6. Введение в цементную систему легких пористых заполнителей (туфового щебня и керамзитового гравия) вместо заполнителей из плотных горных пород (гранитного и базальтового щебня) позволяет понизить среднюю плотность на 17–26 % (с 2360–2497 до 1842–1948 кг/м³) и модуль упругости высокопрочных самоуплотняющихся бетонов на 16–37 % (с 40–47 до 29,5–33,9 ГПа).

7. Использование различных видов заполнителей из плотных горных пород и легких пористых заполнителей искусственного и природного происхождения позволяет получать высокопрочные самоуплотняющиеся мелкозернистые, тяжелые и легкие бетоны классов В60–В100 марок по средней плотности D1800–D2500 с регулируемыми деформационными характеристиками.

8. Пониженная средняя плотность (от 1800 до 2000 кг/м³) и возможность изменения модуля упругости в широком диапазоне (от 25 до 35 ГПа) делают высокопрочные самоуплотняющиеся легкие бетоны классов В50–В70 предпочтительным материалом, позволяющим снизить массу и сократить расход арматуры железобетонных конструкций высотных зданий, мостов и путепроводов, а также сооружений, возводимых в сейсмоопасных регионах.

Список литературы

- Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Кардумян Г.С., Киселева Ю.А., Пригоженко О.В. Новые бетоны и технологии в конструкциях высотных зданий // *Высотные здания*. 2007. № 5. С. 94–101.
- Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Кардумян Г.С. Новые модифицированные бетоны. Москва: Типография «Парадиз», 2010. 258 с.
- Кондращенко В.И., Ярмаковский В.Н., Гузенко С.В. О применении конструкционных легких бетонов в мостостроении // *Транспортное строительство*. 2007. № 9. С. 10–13.
- Бондарь В.В. Конструкционный керамзитобетон в строительстве. Опыт и перспективы применения // *Вестник Полоцкого Государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки*. 2018. № 8. С. 112–119.
- Kaprielov S., Sheynfeld A., Selyutin N. 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: <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2022-18-1-24-39>
- Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Селютин Н.М. Самоуплотняющийся высокопрочный керамзитобетон классов В50–В65 – новое поколение легких бетонов для конструкций высотных зданий // *Строительные материалы*. 2023. № 4. С. 42–50. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-812-4-42-50>
- Wilson H.S., Malhotra V.M. Development of high strength lightweight concrete for structural applications. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*. 1988, vol. 10, no. 2, pp. 79–90.
- Jian-Xin Lu, Peiliang Shen, Hafiz Asad Ali, Chi Sun Poon. Mix design and performance of lightweight ultra-high-performance concrete. *Materials and Design*. 2022, vol. 216, no. 1, p. 110553. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110553>
- Karamloo Mohammad, Mazloom Moosa, Payganeh Gholamhasan. Effect of maximum aggregate size on fracture behaviors of self-compacting lightweight concrete. *Construction and Building Materials*. 2016, vol. 123, pp. 508–515.
- Jae-Il Sim, Keun-Hyeok Yang, Heung-Yeoul Kim, Byong-Jeong Choi. Size and shape effects on compressive strength of lightweight concrete. *Construction and Building Materials*. 2013, vol. 38, pp. 854–864. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.061>
- Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Дондуков В.Г. Цементы и добавки для производства высокопрочных бетонов // *Строительные материалы*. 2017. № 11. С. 4–10.
- Шейнфельд А.В., Каприелов С.С., Чилин И.А. Влияние температуры на параметры структуры и свойства цементных систем с органоминеральными модификаторами // *Градостроительство и архитектура*. 2017. Т. 7. № 1. С. 58–63.
- 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.
- ГОСТ 8267-93. Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия. Москва: Стандартинформ, 2018.
- ГОСТ 32703-2014. Дороги автомобильные общего пользования. Щебень и гравий из горных пород. Технические требования. Москва: Стандартинформ, 2015.
- ГОСТ 32496-2013. Заполнители пористые для легких бетонов. Технические условия. Москва: Стандартинформ, 2014.
- ГОСТ 22263-76. Щебень и песок из пористых горных пород. Технические условия. Москва: Стандартинформ, 1978.
- ГОСТ Р 55224-2020. Цементы для транспортного строительства. Технические условия. Москва: Стандартинформ, 2021.
- Kaprielov S., Sheinfeld A. Influence of silica fume / fly ash / superplasticizer combinations in powder-like complex modifiers on cement paste porosity and concrete properties. *Sixth CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and other Chemical Admixtures in Concrete*. Nice, France, October 2000, pp. 383–400.
- ГОСТ Р 56178-2014. Модификаторы органо-минеральные типа МБ для бетонов, строительных растворов и сухих смесей. Технические условия. Москва: Стандартинформ, 2015.
- ГОСТ 8736-2014. Песок для строительных работ. Технические условия. Москва: Стандартинформ, 2019.
- ГОСТ 23732-2011. Вода для бетонов и растворов. Технические условия. Москва: Стандартинформ, 2012.
- Берг О.Я., Щербаков Е.Н., Писанко Г.Н. Высокопрочный бетон. Москва: Стройиздат, 1971. 208 с.
- Шейкин А.Е., Чеховский Ю.В., Бруссер М.И. Структура и свойства цементных бетонов. Москва: Стройиздат, 1979. 344 с.
- Геология и плотины / Под общ. ред. проф. А.Н. Вознесенского. Т. 3. Москва; Ленинград: Госэнергоиздат, 1959, 1963. 175 с.
- ГОСТ Р 59715-2022. Смесей бетонные самоуплотняющиеся. Методы испытаний. Москва: Российский институт стандартизации, 2022.
- ГОСТ Р 59714-2021. Смесей бетонные самоуплотняющиеся. Технические условия. Москва: Российский институт стандартизации, 2021.
- ГОСТ 10180-2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. Москва: Стандартинформ, 2013.

29. ГОСТ 31914-2012. Бетоны высокопрочные тяжелые и мелкозернистые для монолитных конструкций. Правила контроля и оценки качества. Москва: Стандартинформ, 2014.
30. ГОСТ 24452-2023. Бетоны. Методы определения призмочной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона. Москва: Стандартинформ, 2024.
31. Безгодов И.М., Левченко П.Ю. К вопросу о методике получения полных диаграмм деформирования бетона // *Технологии бетонов*. 2013. № 10. С. 34–36.
32. Безгодов И.М. Методические особенности исследования полных диаграмм деформирования и релаксации напряжений в бетоне // *Технологии бетонов*. 2020. № 11–12. С. 39–44.
33. ГОСТ 18105-2018. Бетоны. Правила контроля и оценки прочности. Москва: Стандартинформ, 2019.
34. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Москва: Стандартинформ, 2019.
35. 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, vol. 18, no. 2, pp. 175–183. DOI: <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2022-18-2-175-183>
36. Макридин Н.И., Максимова И.Н. Механическое поведение конструкционного керамзитобетона при осевом сжатии // *Строительные материалы*. 2009. № 1. С. 51–53.
37. Zhou F.P., Lydon F.D., Barr B.I.G. Effect of coarse aggregate on elastic modulus and compressive strength of high performance concrete. *Cement and Concrete Research*. 1995, vol. 25, no. 1, pp. 177–186.
38. Цой П.А., Усольцева О.М. Об особенностях измерения деформаций образцов горных пород с помощью виртуальных экстензометров // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*. 2019. Т. 6. № 2. С. 287–289. DOI: <https://doi.org/10.15372/FPVGN2019060250>
39. Фролова Ю.В., Ладыгин В.М., Спиридонов Э.М., Овсянников Г.Н. О физико-механических свойствах метавулканитов горного Крыма // *Инженерная геология*. 2018. Т. 13. № 4–5. С. 36–51. DOI: <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2018-13-4-5-36-51>
40. Пригоженко О.В., Ярмаковский В.Н., Андрианов Л.А. Высокопрочный керамзитобетон из высокоподвижных смесей // *Научные труды II Всероссийской (Международной) конференции по бетону и железобетону*. Москва. 2005. Т. 4. С. 128–134.

References

1. Kaprielov S.S., Sheinfeld A.V., Kardumyan G.S., Kiselyova Yu.A., Prigozhenko O.V. New concretes and technologies in structures of tall buildings. *Vysotnye Zdaniya = Tall Buildings*. 2007, no. 5, pp. 94–101. (In Russian).
2. Kaprielov S.S., Sheynfeld A.V., Kardumyan G.S. The new modified concrete. Moscow: Paradiz Publ., 2010, 258 p. (In Russian).
3. Kondrashchenko V.I., Yarmakovskiy V.N., Guzenko S.V. On the use of structural lightweight concretes in bridge construction. *Transport construction*. 2007, no. 9, pp. 10–13. (In Russian).
4. Bondar V.V. Structural expanded clay concrete in a building industry. Practice and prospects of usage. *Vestnik of Polotsk State University. Part F. Constructions. Applied Sciences*. 2018, no. 8, pp. 112–119. (In Russian).
5. Kaprielov S., Sheynfeld A., Selyutin N. 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: <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2022-18-1-24-39>
6. Kaprielov S.S., Sheinfeld A.V., Selyutin N.M. Self-compacting high-strength expanded clay concrete of B50–B65 classes – a new generation of expanded clay concretes for structures of high-rise building. *Stroitel'nye Materialy = Construction Materials*. 2023, no. 4, pp. 42–50. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-812-4-42-50>
7. Wilson H.S., Malhotra V.M. Development of high strength lightweight concrete for structural applications. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*. 1988, vol. 10, no. 2, pp. 79–90.
8. Jian-Xin Lu, Peiliang Shen, Hafiz Asad Ali, Chi Sun Poon. Mix design and performance of lightweight ultra-high-performance concrete. *Materials and Design*. 2022, vol. 216, no. 1, p. 110553. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110553>
9. Karamloo Mohammad, Mazloom Moosa, Payganeh Gholamhasan. Effect of maximum aggregate size on fracture behaviors of self-compacting lightweight concrete. *Construction and Building Materials*. 2016, vol. 123, pp. 508–515.
10. Jae-Il Sim, Keun-Hyeok Yang, Heung-Yeoul Kim, Byong-Jeong Choi. Size and shape effects on compressive strength of lightweight concrete. *Construction and Building Materials*. 2013, vol. 38, pp. 854–864. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.061>
11. Kaprielov S.S., Sheinfeld A.V., Dondukov V.G. Cements and additives for producing high-strength concretes. *Stroitel'nye Materialy = Construction Materials*. 2017, no. 11, pp. 4–10. (In Russian).

12. Sheynfeld A.V., Kapriellov S.S., Chilin I.A. Temperature effect on structure parameters and properties of cement systems with organo-mineral modifiers. *Urban Construction and Architecture*. 2017, vol. 7, no. 1, pp. 58–63. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.17673/Vestnik.2017.01.10>
13. Kapriellov S.S., Sheinfeld A.V., Karpenko N.I., Kuznetsov E.N. On the regulation of the modulus of elasticity and creep of high-strength concretes with the MB-50C modifier. *Beton i Zhelezobeton = Concrete and Reinforced Concrete*. 2003, no. 6, pp. 8–12. (In Russian).
14. State Standard 8267-93. Crushed stone and gravel of solid rocks for construction works. Specifications. Moscow: Standartinform Publ., 2018. (In Russian).
15. State Standard 32703-2014. Automobile roads of general use. Crushed stone and gravel from rocks. Technical requirements. Moscow: Standartinform Publ., 2015. (In Russian).
16. State Standard 32496-2013. Fillers porous for light concrete. Specifications. Moscow: Standartinform Publ., 2014. (In Russian).
17. State Standard 22263-76. Crushed stone and sand of porous rocks. Technical requirements. Moscow: Standartinform Publ., 1978. (In Russian).
18. State Standard R 55224-2020. Cements for transport construction. Specifications. Moscow: Standartinform Publ., 2021. (In Russian).
19. Kapriellov S., Sheinfeld A. Influence of silica fume / fly ash / superplasticizer combinations in powder-like complex modifiers on cement paste porosity and concrete properties. *Sixth CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and other Chemical Admixtures in Concrete*. Nice, France, October 2000, pp. 383–400.
20. State Standard R 56178-2014. Modifiers of organic-mineral origin of MB type for concretes, mortars and dry mixes. Specifications. Moscow: Standartinform Publ., 2015. (In Russian).
21. State Standard 8736-2014. Sand for construction works. Specifications. Moscow: Standartinform Publ., 2019. (In Russian).
22. State Standard 23732-2011. Water for concrete and mortars. Specifications. Moscow: Standartinform Publ., 2012. (In Russian).
23. Berg O.Ya., Shcherbakov E.N., Pisanko G.N. High-strength concrete. Moscow: Stroyizdat Publ., 1971, 208 p. (In Russian).
24. Sheikin A.E., Chekhovsky Yu.V., Broussier M.I. Structure and properties of cement concretes. Moscow: Stroyizdat Publ., 1979, 344 p. (In Russian).
25. Geology and dams / Under the general editorship of Professor A.N. Voznesensky. Vol. 3. Moscow; Leningrad: Gosenergoizdat Publ., 1959, 1963, 175 p.
26. State Standard R 59715-2022. Self-compacting fresh concrete. Methods of testing. Moscow: Russian Institute of Standardization, 2022. (In Russian).
27. State Standard R 59714-2021. Self-compacting concrete mixtures. Specifications. Moscow: Russian Institute of Standardization, 2021. (In Russian).
28. State Standard 10180-2012. Concretes. Methods for strength determination using reference specimens. Moscow: Standartinform Publ., 2013. (In Russian).
29. State Standard 31914-2012. High-strength heavy-weight and fine-grane concretes for situcasting structures. Rules for control and quality assessment. Moscow: Standartinform Publ., 2014. (In Russian).
30. State Standard 24452-2023. Concretes. Methods for determination of prismatic compressive strength, modulus of elasticity and Poisson's ratio. Moscow: Standartinform Publ., 2024. (In Russian).
31. Bezgodov I.M., Levchenko P.Yu. To the question about the method of obtaining concrete deformation complete diagrams. *Technologies of concrete*. 2013, no. 10, pp. 34–36. (In Russian).
32. Bezgodov I.M. Methodological features of the study of complete diagrams of deformation and stress relaxation in concrete. *Technologies of concrete*. 2020, no. 11–12, pp. 39–44. (In Russian).
33. State Standard 18105-2018. Concretes. Rules for control and assessment of strength. Moscow: Standartinform Publ., 2019. (In Russian).
34. SP 63.13330.2018. Concrete and reinforced concrete structures. General provisions. Moscow: Standartinform Publ., 2019. (In Russian).
35. Bezgodov I., Kapriellov S., Sheynfeld A. Relationship between strength and deformation characteristics of high-strength self-compacting concrete. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2022, vol. 18, no. 2, pp. 175–183. DOI: <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2022-18-2-175-183>
36. Makridin N.I., Maksimova I.N. Mechanical behavior of structural expanded clay concrete under axial compression. *Stroitel'nye Materialy = Construction Materials*. 2009, no. 1, pp. 51–53. (In Russian).
37. Zhou F.P., Lydon F.D., Barr B.I.G. Effect of coarse aggregate on elastic modulus and compressive strength of high performance concrete. *Cement and Concrete Research*. 1995, vol. 25, no. 1, pp. 177–186.
38. Tsoi P.A., Usol'tseva O.M. Specifics of strain measurements in rocks using virtual (non-contacting) extensometers. *Journal of Fundamental and Applied Mining Science*. 2019, vol. 6, no. 2, pp. 287–289. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.15372/FPVGN2019060250>
39. Frolova J.V., Ladygin V.V., Spiridonov E.M., Ovsyannikov G.N. Physical-mechanical properties of metavolcanic rocks of the Mountain Crimea. *Engineeringgeologyworld*. 2018, vol. 13, no. 4–5, pp. 36–51. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2018-13-4-5-36-51>

40. Prigozhenko O.V., Yarmakovskiy V.N., Andrianov L.A. High-strength expanded clay concrete from highly mobile mixtures. *Scientific works of the II All-Russian (International) Conference on Concrete and Reinforced Concrete*. Moscow, 2005, vol. 4, pp. 128–134. (In Russian).

Информация об авторах / Information about the authors

Семен Суренович Каприелов, д-р техн. наук, заведующий лабораторией химических добавок и модифицированных бетонов (№ 16), НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство»; профессор кафедры строительного материаловедения, НИУ МГСУ, Москва
e-mail: kaprielov@masterbeton-mb.ru

Semyon S. Kaprielov, Dr. Sci. (Engineering), Head of Laboratory for Chemical Admixtures and Modified Concrete (No. 16), Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction; Professor of the Department of Construction Materials Science, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow
e-mail: kaprielov@masterbeton-mb.ru

Андрей Владимирович Шейнфельд✉, д-р техн. наук, заместитель заведующего лабораторией химических добавок и модифицированных бетонов (№ 16), НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство»; профессор кафедры строительного материаловедения, НИУ МГСУ, Москва
e-mail: sheynfeld@masterbeton-mb.ru

Andrey V. Sheynfeld✉, Dr. Sci. (Engineering), Deputy Head of Laboratory for Chemical Admixtures and Modified Concrete (No. 16), Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction; Professor of the Department of Construction Materials Science, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow
e-mail: sheynfeld@masterbeton-mb.ru

Николай Иванович Карпенко, д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории проблем прочности и качества в строительстве, НИИСФ РААСН, Москва
e-mail: niisf_lab9n@mail.ru

Nikolay I. Karpenko, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Chief Researcher of the Laboratory of the Problems of Strength and Quality in Construction, SRICP RAACS, Moscow
e-mail: niisf_lab9n@mail.ru

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

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

Георгий Александрович Моисеенко, канд. техн. наук, научный сотрудник лаборатории проблем прочности и качества в строительстве, НИИСФ РААСН, Москва
e-mail: gecklock@yandex.ru

Georgiy A. Moiseenko, Cand. Sci. (Engineering), Researcher of the Laboratory of the Problems of Strength and Quality in Construction, SRICP RAACS, Moscow
e-mail: gecklock@yandex.ru

Игорь Михайлович Безгодов, инженер, заведующий лабораторией строительных материалов, НИУ МГСУ, Москва
e-mail: niisf_lab9n@mail.ru

Igor M. Bezgodov, Engineer, Head of Laboratory for Building Materials, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow
e-mail: niisf_lab9n@mail.ru

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author