

УДК 391.327.32

[https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-3\(628\)-52-68](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-3(628)-52-68)

**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

ПРОЧНОСТНЫЕ И ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫСОКОПРОЧНЫХ САМОУПЛОТНЯЮЩИХСЯ ЛЕГКИХ БЕТОНОВ НА ИСКУССТВЕННЫХ И ПРИРОДНЫХ ПОРИСТЫХ ЗАПОЛНИТЕЛЯХ

Аннотация

Введение. Представлены результаты исследований высокопрочных самоуплотняющихся легких бетонов на портландцементном вяжущем с органоминеральным модификатором типа МБ и тремя различными видами легких заполнителей (песка и гравия/щебня), которые могут быть использованы для расчета и проектирования облегченных железобетонных конструкций зданий и сооружений, а также для внесения изменений и расширения границы параметрического ряда легких бетонов с В40 до В70 в СП 63.13330.2018.

Цель. Оценка влияния технологических факторов на прочностные и деформационные характеристики высокопрочных самоуплотняющихся легких бетонов классов В40–В70 марок по средней плотности D1600–D2000 из самоуплотняющихся смесей.

Материалы и методы. Для приготовления высокопрочных самоуплотняющихся легких бетонов использовали материалы: портландцемент ЦЕМ I 42,5; органоминеральный модификатор МБ10-50С; микрозаполнитель – молотый известняк; природный

кварцевый песок; легкие пористые заполнители – искусственный керамзитовый песок и гравий и природный туфовый песок и щебень двух месторождений. Испытания бетонных смесей и бетонов выполнены с использованием стандартизированных и специальных методик.

Результаты. Определены прочностные (кубиковая и призмочная прочность на сжатие) и деформационные (начальный модуль упругости, коэффициент Пуассона и предельные относительные деформации сжатия) характеристики и построены диаграммы напряженного состояния ($\sigma - \epsilon$) шести высокопрочных самоуплотняющихся легких бетонов классов по прочности на сжатие от В41 до В73 с маркой по средней плотности от D1600 до D2000. Выполнена оценка влияния расхода цемента, вида легких пористых заполнителей (песка и гравия/щебня) и замены легкого керамзитового песка на природный песок из плотных горных пород на физико-технические характеристики легкого бетона.

Выводы. Использование различных видов легких пористых заполнителей искусственного (керамзитового песка и гравия) и природного (туфового песка и щебня) происхождения, а также мелкого заполнителя из плотных горных пород (природного кварцевого песка), совместно с портландцементным вяжущим с добавкой органоминерального модификатора типа МБ, позволяет получать высокопрочные самоуплотняющиеся легкие бетоны классов В40–В70 марок по средней плотности D1600–D2000 с прочностными и деформационными характеристиками, значительно превосходящими максимальные нормативные значения для легкого бетона класса В40 марки по средней плотности D2000 по СП 63.13330.2018.

Ключевые слова: высокопрочный легкий бетон, самоуплотняющийся легкий бетон, керамзитовый заполнитель, туфовый заполнитель, 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. Прочностные и деформационные характеристики высокопрочных самоуплотняющихся легких бетонов на искусственных и природных пористых заполнителях // *Бетон и железобетон*. 2025. № 3 (628). С. 52–68. DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-3\(628\)-52-68](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-3(628)-52-68). EDN: SWWFTR

Вклад авторов

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

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

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

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

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

Безгодов И.М. – 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 14.03.2025

Поступила после рецензирования 01.05.2025

Принята к публикации 08.05.2025

**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. 5, 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

STRENGTH AND DEFORMATION CHARACTERISTICS OF HIGH-STRENGTH SELF-COMPACTING LIGHTWEIGHT CONCRETES ON ARTIFICIAL AND NATURAL POROUS AGGREGATES

Abstract

Introduction. The results of studies of high-strength self-compacting lightweight concretes based on a Portland cement with an organo-mineral modifier of the MB type and three different types of lightweight aggregates (sand and gravel/crushed stone) are presented. The results can be used to calculate and design lightweight reinforced concrete structures of buildings, as well as to make changes and expand the boundaries of the parametric range of lightweight concrete from B40 to B70 in set of rules SP 63.13330.2018.

Aim. Assessment of the influence of technological factors on the strength and deformation characteristics of high-strength self-compacting lightweight concrete of classes B40–B70, grades of medium density D1600–D2000 from self-compacting mixtures.

Materials and methods. For the preparation of high-strength self-compacting lightweight concretes, materials were used: Portland cement CEM I 42,5; organo-mineral modifier MB10–50C; micro filler – ground limestone; natural quartz sand; light porous aggregates – artificial expanded clay sand and gravel and natural tuff sand and crushed stone from two fields. The tests of concrete mixtures and concretes were carried out using standardized and special techniques.

Results. The strength (cubic and prismatic compressive strength) and deformation (modulus of elasticity, Poisson's ratio and maximum relative compression deformations) characteristics are determined and stress diagrams ($\sigma - \epsilon$) of six high-strength self-compacting lightweight concretes of compressive strength classes from B41 to B73 with an average density grade from D1600 to D2000 are constructed. The influence of cement consumption, the type of light porous aggregates (sand and gravel/crushed stone) and the replacement of light expanded clay sand with natural sand from dense rocks on the physical and technical characteristics of lightweight concrete has been assessed.

Conclusions. The use of various types of light porous aggregates of artificial (expanded clay sand and gravel) and natural (tuff sand and crushed stone) origin, as well as fine aggregate from dense rocks (natural quartz sand), together with a Portland cement binder with the addition of an organo-mineral modifier of the MB type, makes it possible to obtain high-strength self-compacting lightweight concretes of classes B40–B70, grades of medium density D1600–D2000 with strength and deformation characteristics, significantly exceeding the maximum normative values for lightweight concrete of class B40 grade with an average density of D2000 according in set of rules to SP 63.13330.2018.

Keywords: high-strength lightweight concrete, self-compacting lightweight concrete, expanded clay aggregate, tuff aggregate, compressive strength, modulus of elasticity, deformation diagram, limiting relative compression deformations

For citation: Kaprielov S.S., Sheynfeld A.V., Karpenko N.I., Selyutin N.M., Moiseenko G.A., Bezgodov I.M. Strength and deformation characteristics of high-strength self-compacting lightweight concretes on artificial and natural porous aggregates. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2025, no. 3 (628), pp. 52–68. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-3\(628\)-52-68](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-3(628)-52-68). EDN: SWWFTR

Authors contribution statement

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

Sheynfeld A.V. – experiment and analyse of the obtained results.

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

Selyutin N.M. – experimental work and analyse of the results obtained.

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

Bezgodov I.M. – experimental work and analyse of the 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 14.03.2025

Revised 01.05.2025

Accepted 08.05.2025

Введение

Достижения последних лет в области технологии бетона связаны со строительством уникальных зданий и сооружений, большинство из которых можно справедливо назвать объектами «экстремальной инженерии» уже потому, что при возведении их конструкций использовались материалы и технологии, параметры которых превышали нормируемые характеристики, предусмотренные действовавшими стандартами и сводами правил. Так, в связи со строительством высотных зданий, большепролетных мостов и протяженных тоннелей в РФ появились новые модифицированные высокопрочные тяжелые и мелкозернистые бетоны классов на сжатие B60–B100 высокой коррозионной стойкости, в том числе из самоуплотняющихся смесей [1–4].

Новым вызовом материаловедению стало снижение собственного веса в нагрузках и воздействиях на здания и сооружения, решение которого возможно при условии использования высокопрочных и легких материалов, позволяющих снизить объем и массу несущих конструкций, а следовательно, повысить эффективность строительства.

Решением данной задачи является использование высокопрочных (согласно ГОСТ 25192-2012 [5]) конструкционных легких бетонов классов B40–B70 с маркой по средней плотности D1600–D2000, которые, сохраняя все преимущества железобетона, позволят возводить облегченные несущие конструкции высотных зданий, большепролетных транспортных и других сооружений.

Известен большой зарубежный опыт использования высокопрочных конструкционных легких бетонов для строительства зданий, мостовых сооружений и дорожного покрытия в Японии, США, Финляндии, Германии, Норвегии и других странах [6–9].

В РФ проводились как теоретические, так и экспериментальные работы, затрагивающие как получение высокопрочных конструкционных легких бетонов классов B40–B60 из высокоподвижных и самоуплотняющихся смесей, так и определение их прочностных и деформационных характеристик [10–13]. Работы велись также в рамках научно-технического сопровождения строительства 25-этажного здания Gazoil Plaza высотой 96 м с несущими конструкциями стен, колонн и перекрытий из конструкционного легкого бетона марки по плотности D1800 и фактическими значениями классов по прочности на сжатие $B_{\phi}45$ – $B_{\phi}50$ [14].

Обстоятельством, препятствующим внедрению высокопрочного легкого бетона в практику строительства, является отсутствие в СП 63.13330.2018 [15] нормативных характеристик для расчета и проектирования конструкций, так как в нем классификационный ряд легких бетонов ограничен классом B40, что не соответствует возможностям современной технологии и требует дополнения и расширения нормативной базы, для чего необходимо научно обосновать норма-

тивные характеристики новых легких бетонов. Также отсутствует достоверная информация о диаграмме напряженного состояния ($\sigma - \epsilon$) легких бетонов классов выше B40, приготовленных на заполнителях искусственного и природного происхождения, что является препятствием для расчета и проектирования конструкций с использованием наиболее точного диаграммного метода расчета.

Целью работы являлась оценка влияния технологических факторов на прочностные и деформационные характеристики высокопрочных самоуплотняющихся легких бетонов классов B40–B70 марок по средней плотности D1600–D2000 из самоуплотняющихся смесей.

В соответствии с поставленной целью были определены следующие задачи исследований высокопрочных самоуплотняющихся легких бетонов:

- оценка влияния расхода цемента на физико-технические характеристики легкого бетона с искусственным легким пористым заполнителем (керамзитовым гравием);
- оценка влияния вида мелкого заполнителя (кварцевого и керамзитового песков) на физико-технические характеристики легкого бетона с искусственным легким пористым крупным заполнителем (керамзитовым гравием);
- оценка влияния вида легкого пористого заполнителя искусственного (керамзитового песка и гравия) и природного (туфового песка и щебня) на физико-технические характеристики легкого бетона.

Материалы и методы

Для приготовления высокопрочных самоуплотняющихся легких бетонов в лабораторных условиях использовали материалы (портландцемент, органоминеральный модификатор, микрозаполнитель, кварцевый песок и легкие пористые заполнители), которые производятся промышленностью строительных материалов в РФ. В качестве легких пористых заполнителей использовались материалы различного происхождения – искусственный керамзитовый песок и гравий, а также природный туфовый песок и щебень.

Выбор производителя искусственного легкого пористого керамзитового заполнителя (ООО «Винзилский завод керамзитового гравия») осуществлен на основании анализа ранее полученных результатов сравнительных исследований средней плотности и прочности легких керамзитобетонов [11]. Основанием для выбора природных легких пористых туфовых заполнителей являлись объемы запасов и наличие разработанных месторождений на Северном Кавказе «Каменское, Козлинка-2» Кабардино-Балкарской Республики, г. Нальчик (23 тыс. м³) [16] и на Дальнем Востоке «Святогорское» Хабаровского края (3 847 тыс. м³) [17].



Рис. 1. Фотографии легких пористых заполнителей
Fig. 1. Photos of light porous aggregates

Фотографии легких пористых заполнителей, используемых в исследованиях, представлены на рис. 1.

Характеристики используемых материалов:

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

- органоминеральный модификатор бетона МБ10-50С А-II-2, включающий в себя микрокремнезем (45 %), золу-уноса (45 %) и суперпластификатор (10 %) [19] производства ООО «Предприятие Мастер Бетон», соответствующий требованиям ГОСТ Р 56178-2014 [20];

- микронаполнитель – минеральный порошок неактивированный (молотый известняк) марки МП-1 фракции 0–1,25 мм производства ООО «ДСЗ Те-рекс Групп» (г. Калуга), соответствующий требованиям ГОСТ Р 52129-2003 [21] и ГОСТ Р 56592-2015 [22];

- песок кварцевый I класса с модулем крупности $M_{кр} = 2,42$ производства ГОК «Орешки», соответствующий требованиям ГОСТ 8736-2014 [23];

- керамзитовый песок фракции 0–5 мм и гравий фракции 5–10 мм, марки по насыпной плотности М800, марки по прочности П150, средней плотностью 1540 и 1460 кг/м³ соответственно, производства ООО «Винзилинский завод керамзитового гравия», соответствующие требованиям ГОСТ 32496-2013 [24];

- туфовый песок фракции 0–5 мм и щебень фракции 5–10 мм, марки по насыпной плотности М1100, марки по прочности П200, средней плотностью 2150 и 1900 кг/м³ соответственно, месторождения «Каменское, Козлинка-2» Кабардино-Балкарской Республики, г. Нальчик, соответствующие требованиям ГОСТ 22263-76 [25];

- туфовый песок фракции 0–5 мм и щебень фракции 5–10 мм, марки по насыпной плотности М1000, марки по прочности П200, средней плотностью 2400 и 1720 кг/м³ соответственно, месторождения «Святогорское» Хабаровского края, соответствующие требованиям ГОСТ 22263-76 [25];

- вода для затворения бетонных смесей, соответствующая требованиям ГОСТ 23732-2011 [26].

Составы и свойства смесей

В лабораторных условиях из вышеуказанных материалов были приготовлены шесть составов высокопрочных легких бетонов из самоуплотняющихся смесей с добавкой модификатора МБ10-50С А-II-2 в количестве 99–104 кг/м³ (14–16 % от массы цемента и микронаполнителя). Использование при производстве смесей микронаполнителя (молотого известняка) позволяет оценить влияние расхода цемента от 416 до 608 кг/м³ на физико-технические характеристики высокопрочных самоуплотняющихся легких бетонов. Различное водосодержание бетонных смесей (водяжущее отношение $B/(Ц+МБ)$ от 0,27 до 0,41), необходимое для получения подвижности по расплыву нормального конуса в диапазоне 60–70 см, обусловлено более высокой водопотребностью туфовых песков и молотого известняка, используемого в качестве микронаполнителя.

Составы и свойства самоуплотняющихся смесей высокопрочных легких бетонов представлены в табл. 1.

Смеси приготавливались в смесителе принудительного действия объемом 0,025 м³ с перемешиванием в течение 5 мин. Результаты испытаний смесей

Таблица 1
Table 1

Составы и свойства самоуплотняющихся смесей легких бетонов
Compositions and properties of self-compacting mixtures of lightweight concrete

№ состава	Вид заполнителя	Составы самоуплотняющихся смесей легких бетонов, кг/м ³					
		Ц	МП-1	МБ	П	КЗ	В
1	Керамзитовый песок и гравий	416	203	101	325 ¹	420 ¹	208
2	Керамзитовый песок и гравий	541	104	104	333 ¹	431 ¹	208
3	Керамзитовый песок и гравий	601	50	99	315 ¹	408 ¹	197
4	Кварцевый песок и керамзитовый гравий	524	0	101	605 ²	595 ¹	167
5	Туфовый песок и щебень	605	49	99	402 ³	432 ²	288
6	Туфовый песок и щебень	608	50	100	489 ⁴	519 ³	229

Примечания: Ц – портландцемент; МП-1 – микронаполнитель; МБ – органоминеральный модификатор; П – песок: ¹керамзитовый, ²кварцевый, ³туфовый «Козлинка-2», ⁴туфовый «Святогорское»; КЗ – крупный заполнитель: ¹керамзитовый гравий, ²туфовый щебень «Козлинка-2», ³туфовый щебень «Святогорское»; В – вода.

Таблица 2
Table 2

Свойства самоуплотняющихся смесей легких бетонов
Properties of self-compacting mixtures of lightweight concrete

№ состава	Вид заполнителя	Свойства бетонных смесей			
		РК, см	ρ, кг/м ³	V _{лз} , м ³ /м ³	В/(Ц+МБ)
1	Керамзитовый песок и гравий	64	1673	0,498	0,40
2	Керамзитовый песок и гравий	62	1720	0,511	0,32
3	Керамзитовый песок и гравий	60	1670	0,483	0,28
4	Кварцевый песок и керамзитовый гравий	65	1992	0,407	0,27
5	Туфовый песок и щебень	66	1875	0,414	0,41
6	Туфовый песок и щебень	64	1995	0,506	0,32

Примечания: РК – распыл нормального конуса; ρ – средняя плотность смеси; V_{лз} – объем легкого заполнителя в составе смеси; В/(Ц+МБ) – водовяжущее отношение.

показали (табл. 2), что их средняя плотность (ρ) зависит от объема и плотности заполнителя и изменяется в широком диапазоне – от 1673 до 1995 кг/м³, в том числе:

– бетонные смеси с примерно одинаковым объ-

емом легкого керамзитового заполнителя (0,483–0,511 м³/м³), в которых до 30 % цемента замещено микронаполнителем (составы 1–3, табл. 1 и 2), имеют среднюю плотность в узком диапазоне – от 1670 до 1720 кг/м³;

– введение в бетонную смесь на керамзитовом гравии с одинаковым расходом вяжущего (625 и 645 кг/м³) кварцевого песка вместо легкого пористого керамзитового песка (составы 2 и 4, табл. 1 и 2) приводит к снижению водопотребности смеси на 20 % и увеличению ее средней плотности на 16 % – от 1720 до 1992 кг/м³;

– использование более тяжелого природного туфового песка и щебня вместо искусственного керамзитового заполнителя (составы 3, 5, 6, табл. 1 и 2) при одинаковом расходе вяжущего Ц+МБ (700–708 кг/м³) приводит к увеличению водопотребности смеси на 16–46 % и повышению средней плотности на 12–20 % – от 1670 до 1995 кг/м³.

Подвижность всех смесей, определенная по расплыву нормального конуса по ГОСТ Р 59715-2022 [27], находится в диапазоне от 60 до 66 см. Это позволяет, учитывая также отсутствие признаков водоотделения и расслоения смесей, согласно ГОСТ Р 59714-2021 [28], отнести их к категории самоуплотняющихся.

Представленные выше результаты показывают, что для производства самоуплотняющихся бетонных смесей с легкими пористыми мелким и крупным заполнителями (песком и гравием/щебнем) важным фактором является общее количество дисперсных компонентов Ц+МП+МБ, расход которых должен составлять около 700 кг/м³. При использовании вместо легкого пористого песка мелкого заполнителя из плотных горных пород расход дисперсных компонентов может быть понижен до 600 кг/м³.

Объект исследований и методы испытаний

Из приготовленных смесей формовались образцы легкого бетона: кубы размером 100 × 100 × 100

мм в количестве 6 шт. для определения кубиковой прочности на сжатие по ГОСТ 10180-2012 [29]; призмы размером 100 × 100 × 400 мм в количестве 3 шт. для определения призмной 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 диаграмм деформирования 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 0,1R_b, с выдержкой на каждой ступени 5 минут до разрушения образцов. Модуль упругости и коэффициент Пуассона определяли при уровне нагружения 30–40 % от величины призмной прочности.

Определение динамического модуля упругости осуществлялось на приборе Erudite MKIV (PC 1004) компании CNS Farnell Limited (рис. 2) по трем образцам-призмам. Определение динамического модуля упругости бетонов при длине образцов-призм 400 мм производилось при продольной резонансной частоте колебаний в диапазоне 4–6 кГц по формуле технического руководства [33]:

$$E_d = 4 \times n^2 \times l^2 \times \gamma \times 10^{-12}, \quad (1)$$

где n – резонансная частота продольных колебаний, Гц;

l – длина образца, мм;

γ – средняя плотность бетона в образце, кг/м³.



Рис. 2. Определение динамического модуля упругости легких бетонов
Fig. 2. Determination of the dynamic modulus of elasticity of lightweight concrete

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

Фактический класс легких бетонов по прочности на сжатие (B_{ϕ}) и сопротивление осевому сжатию (R_{bn}) определялись в соответствии с ГОСТ 18105-2018 [34] по формулам:

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

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

где B_{ϕ} – фактический класс легкого бетона по прочности на сжатие, МПа;

R – кубиковая прочность легкого бетона на сжатие, МПа;

R_b – призмная прочность легкого бетона на сжатие, МПа;

R_{bn} – сопротивление легкого бетона осевому сжатию, МПа;

K_T – коэффициент требуемой прочности, принимаемый равным 1,14 в случае определения прочности

легкого бетона по контрольным образцам (по аналогии с требованиями ГОСТ 31914-2012 [35] к высокопрочным тяжелым и мелкозернистым бетонам);

V – коэффициент вариации прочности легкого бетона, принимаемый равным не менее 10 % в случае определения прочности легкого бетона по контрольным образцам (по аналогии с требованиями ГОСТ 31914-2012 [35] к высокопрочным тяжелым и мелкозернистым бетонам).

Результаты испытаний и дискуссия

Результаты испытаний высокопрочных легких бетонов по показателям: средняя плотность (ρ) и марка по средней плотности (D), кубиковая прочность (R) и фактический класс по прочности на сжатие (B_{ϕ}), призмная прочность (R_b) и сопротивление осевому сжатию (R_{bn}), начальный (E_b) и динамический (E_d) модули упругости, коэффициент Пуассона (ν_b) и предельные относительные деформации сжатия (ε_{b0}) представлены в табл. 3, а полные диаграммы деформирования легких бетонов – на рис. 3.

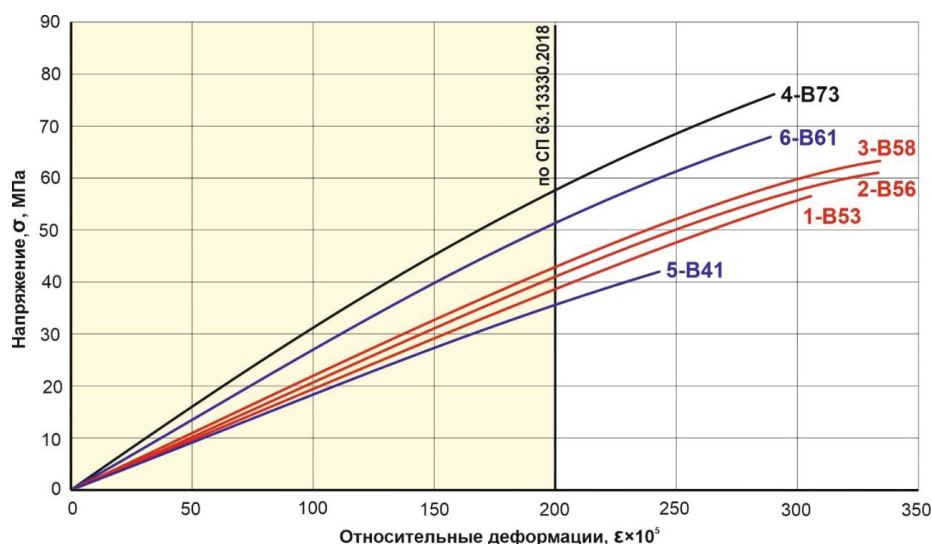
Полные диаграммы деформирования при сжатии (рис. 3) показывают, что нисходящая ветвь у всех легких бетонов классов выше В40 отсутствует.

Таблица 3
Table 3

Прочностные и деформационные характеристики высокопрочных легких бетонов
Strength and deformation characteristics of high-strength lightweight concrete

№ состава	Вид заполнителя	Прочностные и деформационные характеристики высокопрочных легких бетонов					
		ρ/D , кг/м ³	R/B_{ϕ} , МПа	R_b/R_{bn} , МПа	E_b/E_d , ГПа	ν_b	$\varepsilon_{b0} \times 10^5$
1	Керамзитовый песок и гравий	1589	60,5	57,6	19,8	0,23	308
		D1600	$B_{\phi} 53$	48,2	23,1		
2	Керамзитовый песок и гравий	1635	64,3	61,1	21,0	0,23	334
		D1700	$B_{\phi} 56$	51,1	23,7		
3	Керамзитовый песок и гравий	1598	66,0	63,2	22,2	0,23	334
		D1600	$B_{\phi} 58$	52,8	24,4		
4	Кварцевый песок и керамзитовый гравий	1939	83,2	77,8	31,5	0,20	300
		D2000	$B_{\phi} 73$	65,0	35,5		
5	Туфовый песок и щебень	1694	47,2	44,3	19,5	0,25	243
		D1700	$B_{\phi} 41$	37,0	22,9		
6	Туфовый песок и щебень	1900	70,1	67,8	26,7	0,24	289
		D1900	$B_{\phi} 61$	56,7	31,4		

Примечания: ρ – 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_d – динамический модуль упругости; ν_b – коэффициент Пуассона; ε_{b0} – предельная относительная деформация сжатия.



Номера составов легких бетонов по табл. 1–3:

- 1 – с керамзитовым песком и гравием с расходом цемента 416 кг/м³;
- 2 – с керамзитовым песком и гравием с расходом цемента 541 кг/м³;
- 3 – с керамзитовым песком и гравием с расходом цемента 601 кг/м³;
- 4 – с кварцевым песком и керамзитовым гравием с расходом цемента 524 кг/м³;
- 5 – с туфовым песком и щебнем «Козлинка-2» с расходом цемента 605 кг/м³;
- 6 – с туфовым песком и щебнем «Святогорское» с расходом цемента 608 кг/м³.

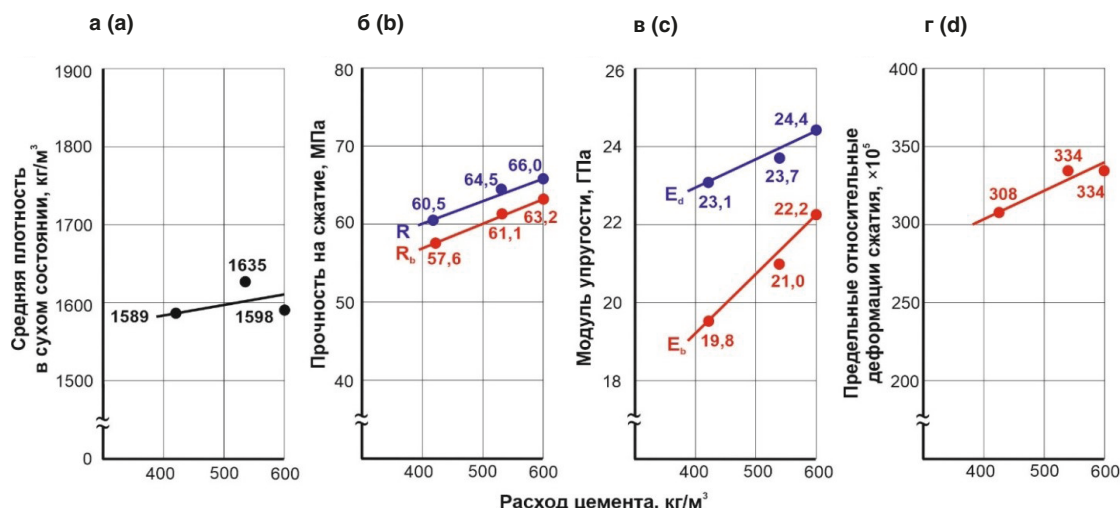
Рис. 3. Диаграммы деформирования высокопрочных легких бетонов
Fig. 3. Deformation diagrams of high-strength lightweight concretes

Оценка влияния расхода цемента на характеристики легкого бетона

Оценку влияния расхода цемента на прочностные и деформационные характеристики высокопрочного самоуплотняющегося легкого бетона проводили по результатам испытаний трех составов (№ 1, 2 и 3 по табл. 1), в которых при примерно одинаковых количествах дисперсных компонентов

Ц+МП (619–651 кг/м³), модификатора МБ (99–101 кг/м³) и объема легкого керамзитового песка и гравия (0,483–0,511 м³/м³) расход цемента варьировался в широком диапазоне – от 416 до 601 кг/м³.

По характеру кривых на рис. 4 можно судить о значимости влияния расхода цемента на среднюю плотность, прочность на сжатие, модуль упругости и предельные относительные деформации высокопрочного



R – кубиковая прочность на сжатие; R_b – призмочная прочность на сжатие;
 E_b – начальный модуль упругости; E_d – динамический модуль упругости.

Рис. 4. Влияние расхода цемента на характеристики легкого бетона
Fig. 4. Influence of cement consumption on the characteristics of lightweight concrete

легкого бетона.

Повышение расхода цемента от 416 до 601 кг/м³ практически не изменяет среднюю плотность легкого бетона, которая находится в узком диапазоне 1589–1635 кг/м³ (рис. 4а) и соответствует маркам по средней плотности D1600–D1700 по ГОСТ 25820-2021 [36].

Прочность на сжатие, модуль упругости и предельные относительные деформации легких бетонов на керамзитовом песке и щебне в возрасте 100–110 суток находятся в прямой зависимости от расхода цемента (рис. 4б–г).

При увеличении дозировки цемента на 30 % (за счет снижения расхода микронаполнителя) прочность легкого бетона повышается (рис. 4б), соответствует фактическим классам по прочности на сжатие от В_ф53 до В_ф58 и на 32–45 % превышает максимальное значение класса (В40) для легкого бетона с маркой по средней плотности D2000 по СП 63.13330.2018 [15].

Значения начального (19,8–22,2 ГПа) и динамического (23,1–24,4 ГПа) модулей упругости и предельных относительных деформаций сжатия (308×10^{-5} – 334×10^{-5}) легких бетонов с повышением расхода цемента увеличиваются не более чем на 6–12 % (рис. 4в, г), что соответствует такому же приросту прочности легких бетонов на сжатие. При этом коэффициент Пуассона у всех легких бетонов составляет 0,23 (табл. 3) и в целом соответствует нормативному значению 0,2 по СП 63.13330.2018 [15].

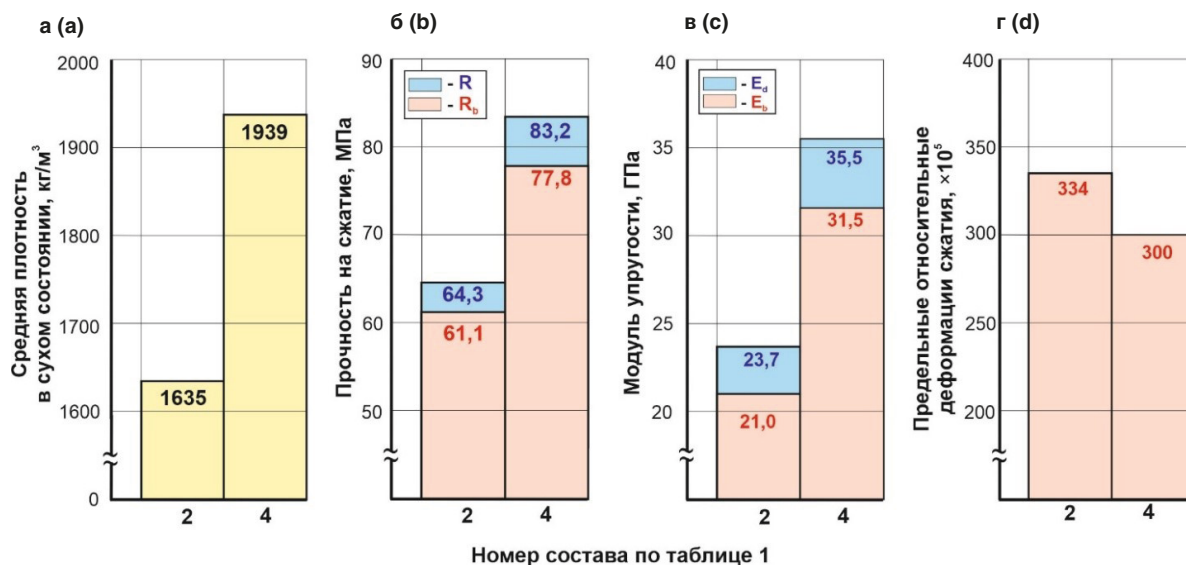
Незначительное (на 6–12 %) увеличение прочност-

ных и деформационных характеристик легких бетонов с одинаковым объемом легкого керамзитового заполнителя при повышении расхода цемента, по-видимому, можно объяснить тем, что увеличение прочности, соответственно модуля упругости и предельных относительных деформаций за счет снижения водовяжущего отношения В/(Ц+МБ) с 0,40 до 0,28, может частично компенсироваться понижением дозировки органоминерального модификатора с 24 до 16 % от массы цемента, а также повышенной водопотребностью микронаполнителя, которая будет вносить коррекцию «на уменьшение» в истинное водовяжущее отношение.

Оценка влияния вида мелкого заполнителя (песка) на характеристики легкого бетона

Введение в бетонную смесь на керамзитовом гравии с примерно одинаковым расходом вяжущего Ц+МБ (645 и 625 кг/м³) кварцевого песка вместо легкого пористого керамзитового песка (составы 2 и 4 по табл. 1) приводит к значительному изменению основных физико-технических характеристик высокопрочных легких бетонов (табл. 3, рис. 5а–в), в том числе:

- повышению на 18 % средней плотности легкого бетона (с 1635 до 1939 кг/м³) и марки по средней плотности с D1700 до D2000 соответственно (рис. 5а);
- увеличению на 27–29 % кубиковой и призмной прочности легкого бетона на сжатие и класса с В_ф56 до В_ф73 соответственно (рис. 5б);
- повышению на 50 % начального и динамического



2 – легкий бетон с керамзитовым песком и гравием;
 4 – легкий бетон с кварцевым песком и керамзитовым гравием.
 R – кубиковая прочность на сжатие; R_b – призмная прочность на сжатие;
 E_b – начальный модуль упругости; E_d – динамический модуль упругости.

Рис. 5. Влияние вида мелкого заполнителя (песка) на характеристики легкого бетона
 Fig. 5. Influence of the type of fine aggregate (sand) on the characteristics of lightweight concrete

модулей упругости с 21 до 31,5 ГПа и с 23,7 до 35,5 ГПа соответственно (рис. 5в).

При этом коэффициент Пуассона понижается с 0,23 до 0,20 и соответствует нормативному значению по СП 63.13330.2018 [15], а предельные относительные деформации сжатия уменьшаются на 10 % с 334×10^{-5} до 300×10^{-5} (рис. 5г) и превышают нормативное значение 200×10^{-5} по СП 63.13330.2018 [15].

Значительное повышение средней плотности, прочности и модуля упругости легких бетонов при замене легкого пористого песка на песок из плотных горных пород связано прежде всего с уменьшением на 20 % общего объема легкого керамзитового заполнителя, повышением прочности и модуля упругости мелкого заполнителя [37] и снижением водовяжущего отношения (с 0,32 до 0,27) за счет меньшей водопотребности кварцевого песка.

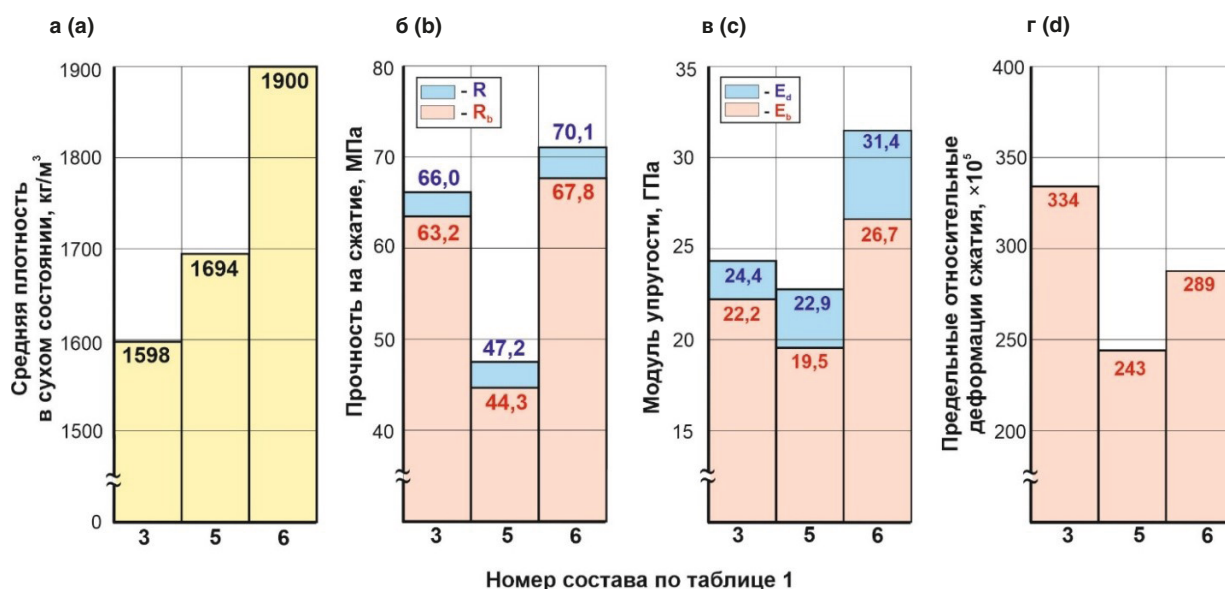
Оценка влияния вида легкого пористого заполнителя (песка и щебня) на характеристики легкого бетона

Физико-технические характеристики самоуплотняющихся легких бетонов, соответствующих требованиям ГОСТ 25820-2021 [36] к конструкционным легким бетонам по средней плотности (D1600–D1900), в зависимости от вида легкого пористого заполнителя (песка и гравия/щебня), изменяются в широком диапазоне (рис. 6).

Присутствие в составе модифицированного легкого бетона керамзитового заполнителя (песка и гравия) производства ООО «Винзилинский завод керамзитового гравия» (г. Тюмень), марок по насыпной плотности M800 и прочности П150, с объемной дозировкой $0,483 \text{ м}^3/\text{м}^3$, при водовяжущем отношении $V/(Ц+МБ) = 0,28$, обеспечивающем подвижность самоуплотняющейся смеси ($PK = 60 \text{ см}$), позволяет получить высокопрочный легкий бетон с физико-техническими характеристиками, значительно превышающими максимальные нормативные значения для легкого бетона класса В40 марки по средней плотности D2000 по СП 63.13330.2018 [15], в том числе:

- средней плотностью 1598 кг/м^3 , что соответствует марке по средней плотности D1600;
- кубиковой и призмочной прочностью на сжатие 66,0 и 63,2 МПа и сопротивлением осевому сжатию 52,8 МПа, что соответствует фактическому классу по прочности на сжатие $B_{\phi} 58$;
- начальным 22,2 ГПа и динамическим 24,4 ГПа модулям упругости;
- коэффициентом Пуассона 0,23 и предельными относительными деформациями сжатия 334×10^{-5} .

Структура легкого бетона с керамзитовым заполнителем производства ООО «ВЗКГ» представлена на рис. 7а.



3 – легкий бетон с керамзитовым песком и гравием «ВЗКГ»;
 5 – легкий бетон с туфовым песком и щебнем «Козлинка-2»;
 6 – легкий бетон с туфовым песком и щебнем «Святогорское».
 R – кубиковая прочность на сжатие; R_b – призмочная прочность на сжатие;
 E_d – начальный модуль упругости; E_d – динамический модуль упругости.

Рис. 6. Влияние вида легкого пористого заполнителя на характеристики легкого бетона
 Fig. 6. Influence of the type of light porous aggregate on the characteristics of lightweight concrete

а (a)



На керамзитовом песке и гравии,
ООО «Винзилинский завод
керамзитового гравия» (г. Тюмень)

б (b)



На туфовом песке и щебне,
месторождение «Каменское,
Козлинка-2» Кабардино-Балкарской
Республики

в (c)



На туфовом песке и щебне,
месторождение «Святогорское»
Хабаровского края

Рис. 7. Структура высокопрочных самоуплотняющихся легких бетонов
с разными легкими пористыми заполнителями

Fig. 7. The structure of high-strength self-compacting lightweight concretes with light porous aggregates

Введение в состав модифицированного легкого бетона туфового заполнителя (песка и щебня) месторождения «Каменское, Козлинка-2» Кабардино-Балкарской Республики (г. Нальчик) марок по насыпной плотности М1100 и прочности П200, с объемной дозировкой $0,414 \text{ м}^3/\text{м}^3$, при водовыжущем отношении $V/(Ц+МБ) = 0,41$, обеспечивающем подвижность самоуплотняющейся смеси ($РК = 66 \text{ см}$), позволяет получить легкий бетон с физико-техническими характеристиками, соответствующими нормативным значениям для легкого бетона марки по средней плотности D1700 по СП 63.13330.2018 [15], в том числе:

- средней плотностью $1694 \text{ кг}/\text{м}^3$, что соответствует марке по средней плотности D1700;
- кубиковой и призмочной прочностью на сжатие 47,2 и 44,3 МПа и сопротивлением осевому сжатию 37,0 МПа, что соответствует фактическому классу по прочности на сжатие $B_{ф} 41$;
- начальным 19,5 ГПа и динамическим 22,9 ГПа модулями упругости;
- коэффициентом Пуассона 0,25 и предельными относительными деформациями сжатия 243×10^{-5} .

Значительное снижение основных физико-технических показателей самоуплотняющегося легкого бетона на туфовом песке и щебне месторождения «Каменское, Козлинка-2» по сравнению характеристиками легкого бетона на керамзитовом заполнителе связано с повышенным на 46 % водосодержанием смеси (табл. 1 и 2) за счет более высокой водопотребности туфового мелкого заполнителя.

Структура легкого бетона с туфовым заполнителем месторождения «Каменское, Козлинка-2» Кабардино-Балкарской Республики представлена на рис. 7б.

Использование при производстве модифицированного легкого бетона туфового заполнителя (песка и щебня) месторождения «Святогорское» Хабаровского края марок по насыпной плотности М1000 и прочности П200, с объемной дозировкой $0,506 \text{ м}^3/\text{м}^3$, при водовыжущем отношении $V/(Ц+МБ) = 0,32$, обеспечивающем подвижность самоуплотняющейся смеси ($РК = 64 \text{ см}$), позволяет получить легкий бетон с физико-техническими характеристиками, значительно превышающими максимальные нормативные значения для легкого бетона класса В40 марки по средней плотности D2000 по СП 63.13330.2018 [15], в том числе:

- средней плотностью $1900 \text{ кг}/\text{м}^3$, что соответствует марке по средней плотности D1900;
- кубиковой и призмочной прочностью на сжатие 70,1 и 67,8 МПа и сопротивлением осевому сжатию 56,7 МПа, что соответствует фактическому классу по прочности на сжатие $B_{ф} 61$;
- начальным 26,7 ГПа и динамическим 31,4 ГПа модулями упругости;
- коэффициентом Пуассона 0,24 и предельными относительными деформациями сжатия 289×10^{-5} .

Применение более плотного туфового заполнителя (песка и щебня) месторождения «Святогорское» по сравнению с легким керамзитовым заполнителем, при повышении средней плотности легкого бетона с 1598 до $1900 \text{ кг}/\text{м}^3$, приводит к увеличению его

прочности на сжатие на 6–7 % и начального модуля упругости на 20 %. Такое несоответствие в приросте прочности и модуля упругости связано, с одной стороны, с их увеличением за счет более высокой плотности и модуля упругости туфового заполнителя [37], а с другой стороны, их снижением за счет увеличения на 16 % водосодержания смеси.

Структура легкого бетона с туфовым заполнителем месторождения «Святогорское» Хабаровского края представлена на рис. 7в.

Представленные выше результаты показывают, что высокопрочные легкие бетоны классов В40–В70 с маркой по средней плотности D1600–D1900 из самоуплотняющихся смесей могут быть получены с использованием как искусственного (керамзитового), так и природного (туфового) легких пористых заполнителей.

Выводы

1. Выполнена оценка влияния технологических факторов на прочностные (кубиковую и призмную прочность на сжатие) и деформационные (начальный и динамический модуль упругости, коэффициент Пуассона и предельные относительные деформации сжатия) характеристики высокопрочных самоуплотняющихся легких бетонов классов В41–В73 марок по средней плотности D1600–D2000 из самоуплотняющихся смесей.

2. Для производства самоуплотняющихся высокопрочных бетонных смесей с легкими пористыми заполнителями (песком и гравием/щебнем) важным фактором является общее количество дисперсных компонентов Ц+МП+МБ, суммарный расход которых должен составлять около 700 кг/м³. При использовании вместо легкого пористого песка мелкого заполнителя из плотных горных пород расход дисперсных компонентов может быть понижен до 600 кг/м³.

3. Увеличение расхода цемента от 416 до 601 кг/м³ при постоянном количестве дисперсных компонентов Ц+МП+МБ от 720 до 750 кг/м³ и практически одинаковом (0,483–0,511 м³/м³) объеме легкого керамзитового заполнителя (марок по насыпной плотности М800 и прочности П150) незначительно (на 10–12 %) повышает прочностные (призмную прочность с 57,6 до 63,2 МПа) и деформационные (начальный модуль упругости с 19,8 до 22,2 ГПа) характеристики высокопрочных самоуплотняющихся легких бетонов классов В53–В58 с маркой по средней плотности D1600–D1700.

Это объясняется тем, что при замене до 30 % микронаполнителя на портландцемент прирост прочности и модуля упругости легкого бетона, полученный за счет снижения водовязующего отношения В/(Ц+МБ) с 0,40 до 0,28, частично компенсируется понижением дозировки органоминерального модификатора с 24 до 16 % от массы цемента, а также повышенной водопотребностью микронаполнителя, которая будет

вносить коррекцию «на уменьшение» в истинное водовязующее отношение.

4. Введение в бетонную смесь на керамзитовом гравии с примерно одинаковым расходом вяжущего Ц+МБ (645 и 625 кг/м³) кварцевого песка вместо легкого пористого керамзитового песка приводит к значительному повышению основных физико-технических показателей бетона (средней плотности на 18 %, прочности на сжатие на 27–29 % и модуля упругости на 50 %), что позволяет получать высокопрочные самоуплотняющиеся легкие бетоны классов до В73 с маркой по средней плотности D2000 с характеристиками: призмная прочность на сжатие 77,8 МПа, начальный модуль упругости 35,5 ГПа, коэффициент Пуассона 0,20 и предельные относительные деформации сжатия 300×10^{-5} .

Значительное повышение основных характеристик легкого бетона связано прежде всего со снижением водосодержания смеси на 20 % (за счет меньшей водопотребности кварцевого песка), уменьшением на 20 % общего объема легкого керамзитового заполнителя и повышением прочности и модуля упругости мелкого заполнителя.

5. Использование легкого туфового заполнителя (песка и щебня) месторождения «Святогорское» Хабаровского края (марок по насыпной плотности М1000 и прочности П200) в объеме 0,506 м³/м³ с расходом вяжущего Ц+МБ 708 кг/м³ позволяет получить высокопрочный самоуплотняющийся легкий бетон класса В61 с маркой по средней плотности D1900 с характеристиками: призмная прочность на сжатие 67,8 МПа, начальный модуль упругости 26,7 ГПа, коэффициент Пуассона 0,24 и предельные относительные деформации сжатия 289×10^{-5} .

Самоуплотняющийся легкий бетон на туфовом песке и щебне месторождения «Каменское, Козлинка-2» (марок по насыпной плотности М1100 и прочности П200) с расходом вяжущего Ц+МБ 704 кг/м³ и объемом легкого заполнителя 0,414 м³/м³ имеет более низкие прочностные и деформационные показатели, которые соответствуют классу В41 с маркой по средней плотности D1700, что связано с повышенным водосодержанием смеси за счет более высокой водопотребности мелкого заполнителя.

6. Полные диаграммы деформирования при сжатии показывают, что ниспадающая ветвь у всех высокопрочных легких бетонов классов от В40 до В70 с маркой по средней плотности от D1600 до D2000, так же как у высокопрочных мелкозернистых и тяжелых бетонов, отсутствует.

7. Применение различных видов легких пористых заполнителей искусственного (керамзитового песка и гравия) и природного (туфового песка и щебня) происхождения, а также мелкого заполнителя из плотных горных пород (природного кварцевого песка) совместно с портландцементным вяжущим с добавкой органоминерального модификатора типа МБ позволяет

получать высокопрочные самоуплотняющиеся легкие бетоны классов В40–В70 марок по средней плотности D1600–D2000 с прочностными и деформационными характеристиками, значительно превосходящими максимальные нормативные значения для легкого бетона класса В40 марки по средней плотности D2000 по СП 63.13330.2018 [15].

Список литературы

- Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Кардунян Г.С. Новые модифицированные бетоны. Москва: Парадиз, 2010. 258 с.
- Каприелов С.С., Травуш В.И., Карпенко Н.И., Шейнфельд А.В., Кардунян Г.С., Киселева Ю.А., Пригоженко О.В. Модифицированные высокопрочные бетоны классов В80 и В90 в монолитных конструкциях. ЧАСТЬ II // *Строительные материалы*. 2008. № 3. С. 9–13.
- Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Аль-Омаис Д., Зайцев А.С., Амиров Р.А. Технология возведения конструкций каркасов высотных зданий из высокопрочных бетонов классов В60–В100 // *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2022. № 2 (33). С. 106–121. DOI: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-2\(33\)-106-121](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-2(33)-106-121).
- Шейнфельд А.В. Органоминеральные модификаторы как фактор, повышающий долговечность железобетонных конструкций // *Бетон и железобетон*. 2014. № 3. С. 16–21.
- ГОСТ 25192-2012. Бетоны. Классификация и общие технические требования. Москва: Стандартинформ, 2013.
- 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.
- Кондращенко В.И., Ярмаковский В.Н., Гузенко С.В. О применении конструкционных легких бетонов в мостостроении // *Транспортное строительство*. 2007. № 9. С. 10–13.
- Lightweight aggregate concrete: CEB/FIP manual of design and technology. The Construction Press, Lancaster, London, New York, 1977, 169 p.
- Johannesen H., Petersen S.A. Ultimate Compressive Strain and Ductility of LWAC Beams. *Master thesis submitted to the faculty of Engineering science and technology of the Norwegian University of Science and Technology*. Trondheim, 2017, 155 p.
- 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.
- 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>.
- Карпенко Н.И., Ярмаковский В.Н. Конструкционные легкие бетоны для нефтедобывающих платформ в северных приливных морях и морях Дальнего Востока // *Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета*. 2015. № 2 (23). С. 85–99.
- Иноземцев А.С., Королев Е.В. Высокопрочные легкие бетоны. Санкт-Петербург: СПбГАСУ, 2022. 192 с.
- Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Кардунян Г.С., Киселева Ю.А., Пригоженко О.В. Новые бетоны и технологии в конструкциях высотных зданий // *Высотные здания*. 2007. № 5. С. 94–101.
- СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Москва: Стандартинформ, 2019.
- Федеральное агентство по недропользованию: сайт. г. Москва, 2025. URL: <https://rosnedra.gov.ru/data/Fast/Files/202011/2ab5b06099ebcf65b278d740084ee8ac.pdf>. (дата обращения 05.03.2025). Текст: электронный / Справка о состоянии и перспективах использования минерально-сырьевой базы Кабардино-Балкарской Республики на 15.06.2020 г. Подготовлена ФГБУ «ВСЕГЕИ» в рамках выполнения Государственного задания Федерального агентства по недропользованию от 26.12.2019 г. № 049-00017-20-04. 2020. 10 с.
- Отчет по переоценке качества сырья и перерасчету запасов Святогорского месторождения туфов по состоянию на 1.07.90 г. / Всесоюзное научно-техническое геологическое общество. Хабаровское территориальное правление. ВТК № 17. 1990. 114 с.
- 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 Super-plasticizers and other Chemical Admixtures in Concrete*. 2000, vol. 195, pp. 383–400.
- ГОСТ Р 56178-2014. Модификаторы органоминеральные типа МБ для бетонов, строительных растворов и сухих смесей. Технические условия. Москва: Стандартинформ, 2015.
- ГОСТ Р 52129-2003. Порошок минеральный для асфальтобетонных и органоминеральных смесей. Технические условия. Москва: Стандартинформ, 2003.
- ГОСТ Р 56592-2015. Добавки минеральные для бетонов и строительных растворов. Общие

- технические условия. Москва: Стандартинформ, 2015.
23. ГОСТ 8736-2014. Песок для строительных работ. Технические условия. Москва: Стандартинформ, 2019.
 24. ГОСТ 32496-2013. Заполнители пористые для легких бетонов. Технические условия. Москва: Стандартинформ, 2014.
 25. ГОСТ 22263-76. Щебень и песок из пористых горных пород. Технические условия. Москва: Стандартинформ, 1978.
 26. ГОСТ 23732-2011. Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия. Москва: Стандартинформ, 2012.
 27. ГОСТ Р 59715-2022. Смеси бетонные самоуплотняющиеся. Методы испытаний. Москва: Российский институт стандартизации, 2022.
 28. ГОСТ Р 59714-2021. Смеси бетонные самоуплотняющиеся. Технические условия. Москва: Российский институт стандартизации, 2021.
 29. ГОСТ 10180-2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. Москва: Стандартинформ, 2013.
 30. ГОСТ 24452-2023. Бетоны. Методы определения призменной 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 (87). С. 34–36.
 32. Безгодов И.М. Методические особенности исследования полных диаграмм деформирования и релаксации напряжений в бетоне // *Технологии бетонов*. 2020. № 11–12 (172–173). С. 39–44.
 33. Resonant Frequency Testing. Technical Reference Manual / CNS Farnell Limited Elstree Business Center, Elstree Way, Borehamwood, Hertfordshire, WD6 1RX, August 2005, 24 p.
 34. ГОСТ 18105-2018. Бетоны. Правила контроля и оценки прочности. Москва: Стандартинформ, 2019.
 35. ГОСТ 31914-2012. Бетоны высокопрочные тяжелые и мелкозернистые для монолитных конструкций. Правила контроля и оценки качества. Москва: Стандартинформ, 2014.
 36. ГОСТ 25820-2021. Бетоны легкие. Технические условия. Москва: Российский институт стандартизации, 2022.
 37. 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.

References

1. Kaprielov S.S., Sheinfeld A.V., Kardumyan G.S. New modified concretes. Moscow: Paradiz Publ., 2010, 258 p. (In Russian).
2. 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. PART II. *Stroitel'nye materialy = Construction Materials*. 2008, no. 3, pp. 9–13. (In Russian).
3. Kaprielov S.S., Sheynfeld A.V., Dzhahal A., Zaitsev A.S., Amirov R.A. A technology of erecting high-rise building frame structures using B60-B100 classes high-strength concretes. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2022, no. 2 (33), pp. 106–121. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-2\(33\)-106-121](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-2(33)-106-121).
4. Sheynfeld A.V. Organomineral modifiers as a factor that increases the durability of reinforced concrete structures. *Beton i Zhelezobeton = Concrete and Reinforced Concrete*. 2014, no. 3, pp. 16–21. (In Russian).
5. State Standard 25192-2012. Concretes. Classification and general technical requirements. Moscow: Standartinform Publ., 2013. (In Russian).
6. 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).
7. 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).
8. Lightweight aggregate concrete: CEB/FIP manual of design and technology. The Construction Press, Lancaster, London, New York, 1977, 169 p.
9. Johannesen H., Petersen S.A. Ultimate Compressive Strain and Ductility of LWAC Beams. *Master thesis submitted to the faculty of Engineering science and technology of the Norwegian University of Science and Technology*. Trondheim, 2017, 155 p.
10. 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).
11. 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>.

12. Karpenko N.I., Yarmakovskiy V.N. Structural lightweight concretes for oil production platforms in the northern tidal seas and the seas of the Far East. *Bulletin of the Engineering School of the Far Eastern Federal University*. 2015, no. 2 (23), pp. 85–99. (In Russian).
13. Inozemtsev A.S., Korolev E.V. High-strength lightweight concretes. St. Petersburg: SPbSUACE, 2022, 192 p. (In Russian).
14. Kaprielov S.S., Sheinfeld A.V., Kardumyan G.S., Kiseleva Yu.A., Prigozhenko O.V. New concretes and technologies in structures of high-rise buildings. *High-rise buildings*. 2007, no. 5, pp. 94–101. (In Russian).
15. SP 63.13330.2018. Concrete and reinforced concrete structures. General provisions. Moscow: Standartinform Publ., 2019. (In Russian).
16. Federal Agency for Subsoil Use: website. Moscow, 2025. URL: <https://rosnedra.gov.ru/data/Fast/Files/202011/2ab5b06099ebcf65b278d740084ee8ac.pdf>. (accessed 05.03.2025). Text: electronic / Information on the state and prospects of using the mineral resource base of the Kabardino-Balkarian Republic on 06/15/2020 Prepared by FSBI VSEGEI as part of the fulfillment of the State Assignment of the Federal Agency for Subsoil Use dated December 26, 2019 No. 049-00017-20-04, 2020, 10 p. (In Russian).
17. Report on the reassessment of the quality of raw materials and recalculation of reserves of the Svyatogorskoye tuff deposit as of 1.07.90 / All-Union Scientific and Technical Geological Society. Khabarovsk Territorial Administration. VTK No. 17, 1990, 114 p. (In Russian).
18. State Standard R 55224-2020. Cements for transport construction. Specifications. Moscow: Standartinform Publ., 2021. (In Russian).
19. 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*. 2000, vol. 195, 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 R 52129-2003. Mineral powders for asphaltic concrete and organomineral mixtures. Specifications. Moscow: Standartinform Publ., 2003. (In Russian).
22. State Standard R 56592-2015. Mineral admixtures for concretes and mortars. General specifications. Moscow: Standartinform Publ., 2015. (In Russian).
23. State Standard 8736-2014. Sand for construction works. Specifications. Moscow: Standartinform Publ., 2019. (In Russian).
24. State Standard 32496-2013. Fillers porous for light concrete. Specifications. Moscow: Standartinform Publ., 2014. (In Russian).
25. State Standard 22263-76. Crushed stone and sand of porous rocks. Technical requirements. Moscow: Standartinform Publ., 1978. (In Russian).
26. State Standard 23732-2011. Water for concrete and mortars. Specifications. Moscow: Standartinform Publ., 2012. (In Russian).
27. State Standard R 59715-2022. Self-compacting fresh concrete. Methods of testing. Moscow: Russian standardization institute, 2022. (In Russian).
28. State Standard R 59714-2021. Self-compacting concrete mixtures. Specifications. Moscow: Russian standardization institute, 2021. (In Russian).
29. State Standard 10180-2012. Concretes. Methods for strength determination using reference specimens. Moscow: Standartinform Publ., 2013. (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. *Concrete Technologies*. 2013, no. 10 (87), pp. 34–36. (In Russian).
32. Bezgodov I.M. Methodological features of the study of complete diagrams of deformation and stress relaxation in concrete. *Concrete Technologies*. 2020, no. 11–12 (172–173), pp. 39–44. (In Russian).
33. Resonant Frequency Testing. Technical Reference Manual / CNS Farnell Limited Elstree Business Center, Elstree Way, Borehamwood, Hertfordshire, WD6 1RX, August 2005, 24 p.
34. State Standard 18105-2018. Concretes. Rules for control and assessment of strength. Moscow: Standartinform Publ., 2019. (In Russian).
35. State Standard 31914-2012. High-strength heavy-weight and fine-grane concretes for situ-casting structures. Rules for control and quality assessment. Moscow: Standartinform Publ., 2014. (In Russian).
36. State Standard 25820-2021. Lightweight concretes. Specifications. Moscow: Russian standardization institute, 2022. (In Russian).
37. 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.

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 Безгодков, 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