

С.С. КАПРИЕЛОВ¹, д-р техн. наук, академик РААСН (kapriellov@mail.ru);
А.В. ШЕЙНФЕЛЬД¹, д-р техн. наук, советник РААСН,
Н.М. СЕЛЮТИН², инженер (selyutin@masterbeton-mb.ru)

¹ Научно-исследовательский проектно-конструкторский институт бетона и железобетона им. А.А. Гвоздева
АО «Научно-исследовательский центр «Строительство» (109428, г. Москва, ул. 2-я Институтская, 6, корп. 5)

² ООО «Предприятие Мастер Бетон» (109518, г. Москва, ул. Саратовская, 31)

Самоуплотняющийся высокопрочный керамзитобетон классов В50–В65 — новое поколение легких бетонов для конструкций высотных зданий

Представлены результаты исследований влияния разновидностей керамзитового заполнителя (песка фракции 0–5 мм и гравия фракции 5–10 мм) марок по насыпной плотности М250–М1000 и прочности П35–П350 на среднюю плотность, прочность при сжатии и начальный модуль упругости легких бетонов классов В16–В65 с марками по средней плотности D1300–D2000. Работы проводились с целью получения высокопрочного легкого керамзитобетона классов В50–В65 из высокоподвижных и самоуплотняющихся смесей с использованием доступных для стройиндустрии легких заполнителей. Для приготовления легких бетонов использовали портландцемент ЦЕМ 0 52,5 Н, органоминеральный модификатор МБ10-50С, природный песок с $M_k=2,5$, керамзитовый песок и гравий трех различных производителей с насыпной плотностью 221–910 кг/м³ и прочностью 0,6–8,9 МПа. Установлено, что при близких по значению объемных дозировках компонентов бетонных смесей влияние свойств (плотности и прочности) керамзитового заполнителя на характеристики легких бетонов имеет сходный характер. Введение в составы бетонных смесей тяжелого природного песка взамен легкого керамзитового усиливает эффект повышения прочности и плотности бетонов. Минимальное значение прочности керамзитового заполнителя, при котором обеспечивается прочность бетона при сжатии, соответствующая классу В50 с маркой по средней плотности D1600, должно соответствовать марке П150. С повышением прочности керамзитового заполнителя до уровня, соответствующего марке П300, прочность бетона повышается до значений, соответствующих классу В65 с маркой по средней плотности D2000. Получены самоуплотняющиеся и высокоподвижные легкие бетоны марок по средней плотности D1600–D2000, классов по прочности при сжатии В50–В65 со следующими характеристиками соответственно: прочность при сжатии (кубиковая прочность) 60,3–74,5 МПа; прочность при осевом сжатии (призменная прочность) 53,7–73,5 МПа; начальный модуль упругости 21,2–25,8 ГПа, которые выходят за пределы классификационного ряда легких бетонов, предусмотренных сводом правил СП 63.13330.2018.

Ключевые слова: высокопрочный легкий бетон, самоуплотняющийся легкий бетон, керамзитовый заполнитель, прочность при сжатии, средняя плотность, начальный модуль упругости.

Авторы выражают благодарность А.В. Епищенко (ООО «Октябрьский керамзит») и Р.Ф. Саммасову (ООО «Винзилинский завод керамзитового гравия») за предоставленные образцы керамзитовых заполнителей, а также Е.В. Панкратовой за участие.

Для цитирования: 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>

S.S. KAPRIELOV¹, Doctor of Sciences (Engineering), Academician of the RAACS (kapriellov@mail.ru),
A.V. SHEYNFELD¹, Doctor of Sciences (Engineering), RAASN Advisor (sheynfeld@masterbeton-mb.ru);
N.M. SELIUTIN², Engineer, (selyutin@masterbeton-mb.ru)

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

² LLC "Master Concrete Enterprise" (31, Saratovskaya Street, 109518, Moscow, Russian Federation)

Self-Compacting High-Strength Expanded Clay Concrete of B50-B65 Classes — a New Generation of Expanded Clay Concretes for Structures of High-Rise Building

The results of studies of the influence of expanded clay aggregate varieties (sand of fractions of 0–5 mm and gravel of fractions of 5–10 mm) of grades according to bulk density M250–M1000 and strength P35–P350 on the average density, compressive strength and initial modulus of elasticity of lightweight concrete of classes B16–B65 with average density grades D1300–D2000. The work was carried out in order to obtain high-strength lightweight expanded clay concrete of classes B50–B65 from highly mobile and self-compacting mixtures using light aggregates available for the construction industry. For the preparation of light concretes, Portland cement CEM 0 52.5 N, organo-mineral modifier MB10-50C, natural sand with $M_k=2.5$, expanded clay sand and gravel from three different manufacturers with a bulk density of 221–910 kg/m³ and a strength of 0.6–8.9 MPa were used. It has been established that with similar volumetric dosages of the components of concrete mixtures, the nature of the influence of the properties (density and strength) of expanded clay filler on the characteristics of lightweight concrete is similar. The introduction of heavy natural sand into the composition of concrete mixes instead of light expanded clay enhances the effect of increasing the strength and density of concrete. The minimum value of the strength of expanded clay filler, which ensures the compressive strength of concrete corresponding to class B50 with a grade of average density D1600, must correspond to grade P150. With an increase in the strength of expanded clay filler to a level corresponding to the P300 grade, the concrete strength increases to values corresponding to the B65 class with a D2000 average density grade. Self-compacting and highly mobile lightweight concretes of medium density grades D1600–D2000, compressive strength at compression (cube strength) 60.3–74.5 MPa; compressive strength at axial compression (prismatic strength) 53.7–73.5 MPa; initial modulus of elasticity 21.2–25.8 GPa, which go beyond the classification range of lightweight concrete provided for in the code of rules SP 63.13330.2018.

sive strength classes B50–B65 with the following characteristics were obtained, respectively: compressive strength (cubic strength) 60.3–74.5 MPa, axial compression strength (prismatic strength) 53.7–73.5 MPa, initial modulus of elasticity 21.2–25.8 GPa, which go beyond the classification range of light concretes provided for by the Code of Rules of SP 63.13330.2018.

Keywords: high-strength lightweight concrete, self-compacting lightweight concrete, expanded clay aggregate, compressive strength, average density, initial modulus of elasticity.

The authors are grateful to A.S. Epishchenko (Oktyabrsky Keramzit LLC) and R. F. Sammasov (Vinzilinskiy Plant of Expanded Clay Gravel LLC) for providing samples of expanded clay aggregates, and also E.V. Pankratova for participation.

For citation: Kaprielov S.S., Sheynfeld 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>

Накопленный в последние годы опыт массового производства и применения бетонов классов от B60 до B110 [1–3] и актуализированная в связи с этим нормативно-техническая база для использования тяжелых и мелкозернистых бетонов нового поколения (ГОСТ 26633–2015 «Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия», ГОСТ 31914–2012 «Бетоны высокопрочные тяжелые и мелкозернистые для монолитных конструкций. Правила контроля и оценки качества», СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения») являются основой для получения модифицированных легких конструктивных бетонов, отличающихся высокой прочностью и улучшенными реологическими свойствами.

В настоящее время есть противоречие между действующим ГОСТ 25820–2021 «Бетоны легкие. Технические условия», в котором классификационный ряд легких бетонов по средней плотности ограничивается предельной маркой D2000 и классом по прочности при сжатии – B60 и основным нормативным документом по проектированию СП 63.13330.2018, где класс легких бетонов ограничен – не выше B40. Соответственно для легких бетонов классов более B40 отсутствуют основные нормативные прочностные и деформационные характеристики – предел прочности при осевом сжатии R_b и начальный модуль упругости E_b . При этом очевидно, что повышение класса до B60–B65 с улучшением деформационных характеристик и сохранением средней плотности на уровне марок D1900–D2000 сделает легкий бетон эффективным материалом, позволяющим снижать массу несущих

конструкций, что особенно актуально при строительстве высотных зданий.

Примером может послужить опыт возведения в 2006 г. в г. Москве 25-этажного здания «Gazoil Plaza» высотой 96 м с несущими конструкциями стен, колонн и перекрытий из конструктивного керамзитобетона (рис. 1) марки по плотности D1800 и фактическими значениями классов по прочности при сжатии Вф45–Вф50 [4–6].

Как известно, ключевым фактором получения высокопрочных бетонов является модифицирование структуры наиболее активного компонента бетонов – цементного камня, направленное на изменение баланса между гидратными новообразованиями в сторону преобладания более прочных из них, и на изменение баланса между порами микро- и макроуровня дисперсности с уменьшением доли вторых [6–8]. Далее по значимости – такие факторы, как физико-технические свойства заполнителей и соотношение компонентов бетона [9, 10].

Механизм управления фазовым составом и дифференциальной пористостью цементного камня основан на совместном использовании, в разных комбинациях, высокоактивных минеральных добавок (в частности, микрокремнезема, золы-уноса, метакаолина), суперпластификаторов или комплексных продуктов на их основе – органоминеральных модификаторов типа МБ по ГОСТ Р 56178–2014 «Модификаторы органоминеральные типа МБ для бетонов, строительных растворов и сухих смесей. Технические условия». Так, при использовании цементов типа ЦЕМ I в сочетании с вышеуказанными добавками возможно получение высокопрочных цементных систем с пределами прочности при сжатии до 130 МПа – при твердении в нормальных условиях и 190 МПа – при дополнительной тепловой обработке [11].

Факторы, влияющие на характеристики портландцементного камня и способы получения высокопрочной структуры, достаточно изучены [12]. При этом роль вида, свойств и объемного содержания заполнителей в управлении прочностными и деформационными свойствами высокопрочного легкого бетона остается важной, требующей исследований.

Получению высокопрочных легких бетонов посвящены исследования многих специалистов, среди которых стоит выделить работы, связанные с оценкой влияния вида и характеристик заполнителя на структуру и свойства бетонов [13–17]. Большинство из них касается бетонов прочностью при сжатии около 70 МПа, плотностью до 2000 кг/м³, но есть исклю-



Рис. 1. Несущие конструкции стен, колонн и постнатяженных перекрытий пролетом 8 м здания «Gazoil Plaza» (Москва) из конструктивного легкого бетона фактических классов Вф45–Вф50

Fig. 1. Supporting structures of walls, columns and poststressed floors with a span of 8 m building «Gazoil Plaza» (Moscow) from structural lightweight concrete actual classes B45–B50

чения. В частности, J-X. Lu и др. [14], используя для получения высокопрочного цементного камня цемент ЦЕМ I 52,5, микрокремнезем и микросферы, а в качестве легкого заполнителя – вспученный сланец, получили бетоны прочностью от 64 до 123 МПа с плотностью 1744–1929 кг/м³.

Соотношение объемов смешанного вяжущего (цемент + минеральные добавки) и легкого заполнителя является важным фактором, влияющим на прочность и кинетику твердения высокопрочного легкого бетона. При производстве бетонных смесей с осадкой конуса 13–23 см с использованием крупного легкого заполнителя – вспученного сланца фракции до 20 мм – и тяжелого песка, по данным H.S. Wilson и V.M. Malhotra [13], минимальный расход («порог эффективной дозировки») вяжущего, при котором предел прочности при сжатии бетона плотностью до 2000 кг/м³ достигает максимального значения – 67 МПа, должен быть на уровне 638 кг/м³.

Значение фракционного состава, формы и размера заполнителей в изменении прочности и трещиностойкости высокопрочного легкого бетона отмечено в [15–17]. Заслуживает внимания оценка значимости формы легкого заполнителя (сферической, продолговатой, угловатой) по критерию «коэффициент формы», который определяется отношением максимального диаметра круга, описывающего зерна заполнителя, к минимальному размеру заполнителя. Установлено (H.Z. Cui и др.), что при «коэффициенте формы» выше 2,2 (по существу, это степень отклонения от идеальной сферы с коэффициентом 1) прочность и модуль упругости легкого бетона понижаются [17].

С учетом вышеизложенного поставлена цель: получение высокопрочного легкого керамзитобетона классов от В50 до В65 из высокоподвижных (ОК>20 см) и самоуплотняющихся (РК=55–70 см) смесей с исследованием влияния качества керамзитового заполнителя на его прочностные и деформационные характеристики.

Материалы и методы испытаний

Характеристики материалов

Для приготовления легких бетонов в лабораторных условиях использовали следующие материалы: це-

мент, модификатор, природный песок, керамзитовый песок и гравий трех различных производителей: АО «Керамзит» (г. Рязань); ООО «Винзилинский завод керамзитового гравия» (г. Тюмень); ООО «Октябрьский керамзит» (г. Самара). Основанием для выбора трех разных производителей керамзитового заполнителя являлись различия в их насыпной плотности (от 221 до 910 кг/м³) и прочности (от 0,6 до 8,9 МПа).

Характеристики используемых материалов приводятся ниже:

– портландцемент ЦЕМ0 52,5Н с нормальной густотой 24,6% и содержанием С₃А – 4,9%, производства АО «Новоросцемент», соответствующий требованиям ГОСТ 31108–2020;

– органоминеральный модификатор бетона МБ10-50С А-II-2, включающий в себя микрокремнезем (45%), золу-уноса (45%) и суперпластификатор (10%) [15], производства ООО «Предприятие Мастер Бетон», соответствующий требованиям стандарта РФ ГОСТ Р 56178–2014 и ТУ 5743-083-46854090–98 с изм. № 1–3;

– песок кварцевый I класса фракции 0–5 мм с модулем крупности М_{кр}=2,5, истинной плотностью 2650 кг/м³ и содержанием пылевидных и глинистых частиц 0,95% производства ООО «Мансуровское карьероуправление», соответствующий требованиям ГОСТ 8736–93;

– песок керамзитовый фракции 0–5 мм марок по насыпной плотности М250, М800, М1000 и марок по прочности П35, П150 и П350 производства соответственно АО «Керамзит» (г. Рязань); ООО «Винзилинский завод керамзитового гравия» (г. Тюмень); ООО «Октябрьский керамзит» (г. Самара), соответствующий требованиям ГОСТ 32496–2013;

– гравий керамзитовый фракции 5–10 мм марок по насыпной плотности М250, М800, М900 и марок по прочности П35, П150 и П300 производства соответственно АО «Керамзит» (г. Рязань); ООО «Винзилинский завод керамзитового гравия» (г. Тюмень); ООО «Октябрьский керамзит» (г. Самара), соответствующий требованиям ГОСТ 32496–2013.

Физико-технические характеристики керамзитового песка и гравия различных производителей представлены в табл. 1.

Таблица 1
Table 1

Физико-технические характеристики керамзитового заполнителя различных производителей
Physical and technical characteristics of expanded clay aggregate from various manufacturers

Показатель качества	Производитель керамзитового заполнителя фракций					
	АО «Керамзит» (г. Рязань)		ООО «Винзилинский завод керамзитового гравия» (г. Тюмень)		ООО «Октябрьский керамзит» (г. Самара)	
	0–5 мм	5–10 мм	0–5 мм	5–10 мм	0–5 мм	5–10 мм
Марка по насыпной плотности	М250	М250	М800	М800	М1000	М900
Насыпная плотность, кг/м ³	234	221	727	750	910	835
Марка по прочности	П35	П35	П150	П150	П350	П300
Прочность, МПа	0,7	0,6	3,95	4,1	8,9	7,6
Водопоглощение, %	27,5	31,69	20,63	14,89	16,94	11,97

Таблица 2
Table 2Составы и свойства бетонных смесей
Compositions and properties of concrete mixtures

№ серии	№ состава	Производитель керамзитового заполнителя	Дозировка компонентов на 1 м ³ смеси					Характеристики бетонной смеси			
			Ц, кг/м ³	МБ, кг/м ³	П, кг/м ³	КП, кг/м ³ / м ³	КГ, кг/м ³ / м ³	В, л/м ³	В/(Ц+МБ)	γ, кг/м ³	ОК / РК, см
1	1	ОК (г. Самара)	530	127	625	–	625 / 0,36	149	0,23	2057	– / 69
	2	ВЗКГ (г. Тюмень)	501	120	591	–	591 / 0,39	153	0,25	1956	– / 60
	3	«Керамзит» (г. Рязань)	526	126	621	–	159 / 0,37	147	0,23	1580	– / 58
2	4	ОК (г. Самара)	548	88	647	–	647 / 0,37	150	0,24	2080	– / 67
	5	ВЗКГ (г. Тюмень)	513	82	606	–	606 / 0,4	162	0,27	1969	– / 57
	6	«Керамзит» (г. Рязань)	548	88	646	–	165 / 0,38	153	0,24	1600	– / 55
3	7	ОК (г. Самара)	593	142	–	398 / 0,23	597 / 0,34	174	0,24	1904	25 / –
	8	ВЗКГ (г. Тюмень)	518	124	–	348 / 0,23	522 / 0,34	169	0,26	1681	21 / –
	9	«Керамзит» (г. Рязань)	680	163	–	120 / 0,28	181 / 0,42	173	0,21	1318	21 / –

Примечания: ОК – ООО «Октябрьский керамзит» (г. Самара); ВЗКГ – ООО «Винзилинский завод керамзитового гравия» (г. Тюмень); «Керамзит» – АО «Керамзит» (г. Рязань); Ц – портландцемент; МБ – органоминеральный модификатор; П – песок природный; КП – керамзитовый песок; КГ – керамзитовый гравий; В – вода затворения; γ – средняя плотность бетонной смеси; ОК – осадка нормального конуса; РК – распылв нормального конуса.

Составы и свойства бетонных смесей

В лабораторных условиях НИИЖБ из вышеуказанных материалов приготовлены три серии (по три состава смеси в каждой) легкого бетона с разным сочетанием заполнителей. Первая и вторая серии (шесть составов) – с использованием природного песка и керамзитового гравия с объемной дозировкой гравия – 0,36–0,4 м³/м³, с расходом цемента – 501–548 кг/м³ и дозировкой модификатора МБ 10-50С – 16 и 24% от массы цемента. Третья серия (три состава) – из смесей с использованием керамзитовых песка и гравия с суммарной объемной дозировкой 0,57–0,7 м³/м³, с расходом цемента 518–680 кг/м³ и дозировкой модификатора МБ 10-50С – 24% от массы цемента.

Каждая серия приготавливалась с использованием керамзитового заполнителя различного качества трех разных производителей.

Составы бетонных смесей в каждой серии подбирались с расчетом на примерно одинаковую объемную дозировку керамзитового заполнителя. Составы и свойства бетонных смесей представлены в табл. 2. Бетонные смеси объемом 20 л приготавливались в смесителе принудительного действия с перемешиванием каждого замеса в течение 5 мин.

Результаты испытаний показали (табл. 2), что средняя плотность бетонных смесей (γ) в зависимости от насыпной плотности и дозировки выбранных керамзитовых заполнителей изменяется в широком диапазоне – от 1318 до 2080 кг/м³.

Подвижность смесей с использованием природного песка и керамзитового гравия (серии 1 и 2, составы 1–6, табл. 2), определенная по распылу нормального конуса по ГОСТ Р 59715–2022, находится в диапазоне от 55 до 69 см. С учетом отсутствия признаков водоотделения и расслоения все смеси этой серии согласно ГОСТ Р 59714–2021 можно отнести к категории самоуплотняющихся.

Подвижность смесей с использованием керамзитового песка и гравия (серия 3, составы 7–9, табл. 2), определенная по осадке нормального конуса по ГОСТ 10181–2014, находится в диапазоне от 21 до 25 см. Это позволяет отнести их к категории высокоподвижных смесей с маркой по удобоукладываемости П5 по ГОСТ 7473–2010.

Объект исследований и методы испытаний

Из приготовленных бетонных смесей формовались образцы-кубы размером 100×100×100 мм в количестве 3 шт. для определения кубиковой прочности бетона при сжатии (R) по ГОСТ 10180 и ГОСТ 31914 и 3 шт. для определения средней плотности бетона в сухом состоянии (D) по ГОСТ 12730.1, а также образцы-призмы размером 100×100×400 мм в количестве 3 шт. для определения призмочной прочности бетона при сжатии (R_b) и начального модуля упругости (E_b) по ГОСТ 24452 и ГОСТ 31914.

Контрольные образцы хранились 28 сут до испытаний в нормальных температурно-влажностных условиях (температура плюс 20±2°C, влажность 95±5%).

Начальный модуль упругости определяли по трем образцам-призмам. Нагружение образцов-призм производилось ступенями, равными 0,1 R_b , до уровня 40% R_b с выдерживанием под нагрузкой на каждой ступени по 5 мин.

Значение кубиковой и призмочной прочности, средней плотности, а также начального модуля упругости легкого бетона принималось как среднее значение результатов испытаний всех трех образцов.

Фактический класс легких бетонов по прочности при сжатии ($V_{ф}$) определялся в соответствии с ГОСТ 18105 с учетом требований ГОСТ 31914 к минимальному значению коэффициента требуемой прочности $K_T=1,14$ (при коэффициенте вариации $V=10\%$) по формуле:

Таблица 3
Table 3

Физико-технические характеристики легких бетонов в возрасте 28 сут.
Physical and technical characteristics of lightweight concrete of 28 days

№ серии	№ состава	Производитель керамзитового заполнителя	Физико-технические характеристики легких бетонов						
			$\gamma_{\text{сух}}$, кг/м ³	D , кг/м ³	R , МПа	R_b , МПа	R_b/R	V_f , МПа	E_b , ГПа
1	1	ОК (г. Самара)	1968	2000	74,5	73,5	0,98	65	24,5
	2	ВЗКГ (г. Тюмень)	1868	1900	74	73,1	0,99	65	25,8
	3	Керамзит (г. Рязань)	1543	1600	26,4	25,3	0,96	23	21,6
2	4	ОК (г. Самара)	1948	2000	73,9	70,4	0,95	65	24,8
	5	ВЗКГ (г. Тюмень)	1866	1900	71,2	70,4	0,99	62	25,6
	6	Керамзит (г. Рязань)	1556	1600	27,8	25,2	0,91	24	23,3
3	7	ОК (г. Самара)	1765	1800	66,2	60,5	0,91	58	23,2
	8	ВЗКГ (г. Тюмень)	1560	1600	60,3	53,7	0,89	52	21,2
	9	Керамзит (г. Рязань)	1316	1300	19,1	16,4	0,86	16	13,6

Примечания. ОК – ООО «Октябрьский керамзит» (г. Самара); ВЗКГ – ООО «Винзилинский завод керамзитового гравия» (г. Тюмень); Керамзит – АО «Керамзит» (г. Рязань); $\gamma_{\text{сух}}$ – средняя плотность в сухом состоянии; D – марка по средней плотности; R – кубиковая прочность при сжатии; R_b – призмная прочность при сжатии; R_b/R – коэффициент призмной прочности; V_f – фактический класс по прочности при сжатии; E_b – начальный модуль упругости.

$$V_f = \frac{R}{K_T} = \frac{R}{1,14}, \quad (1)$$

где R – кубиковая прочность бетона при сжатии, МПа.

Результаты испытаний и дискуссия

Результаты испытаний легких бетонов с керамзитовым заполнителем трех разных производителей по показателям: средняя плотность в сухом состоянии ($\gamma_{\text{сух}}$) и марка по средней плотности (D), кубиковая (R) и призмная (R_b) прочность при сжатии, коэффициент призмной прочности (R_b/R), фактический класс (V_f) и начальный модуль упругости (E_b) в возрасте 28 сут представлены в табл. 3.

Средняя плотность

Средняя плотность бетонов в сухом состоянии в зависимости от насыпной плотности заполнителя изменяется в широком диапазоне – от 1316 до 1968 кг/м³ (рис. 2), что соответствует требованиям ГОСТ 25820–2021 к легким бетонам и совпадает с тенденцией изменения средней плотности бетонных смесей, из которых приготовлены образцы (табл. 1).

По характеру кривых на рис. 2 можно судить о значимости объемной дозировки легкого заполнителя и суммарного расхода вяжущего (Цемент+МБ).

При использовании только легких керамзитовых заполнителей (песка и гравия) с объемной дозировкой в диапазоне 0,57–0,7 м³/м³, при расходе вяжущего 642–843 кг/м³, средняя плотность бетонов в зависимости от плотности заполнителя составляет 1316–1765 кг/м³, что соответствует маркам по средней плотности D1300–D1800. (Серия бетонов 3, табл. 3).

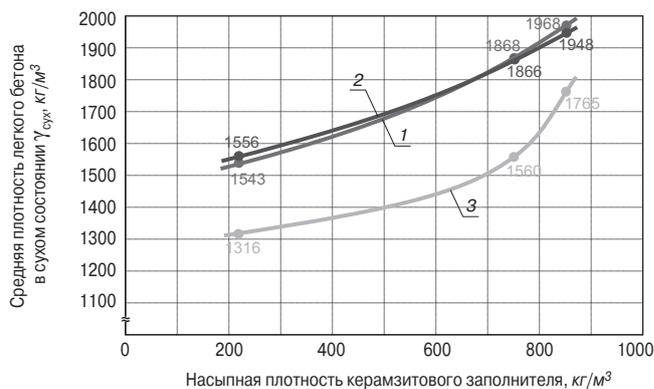
При сочетании в составе бетонов легкого керамзитового гравия (объемная дозировка 0,36–0,4 м³/м³) с тяжелым природным песком вместо легкого керамзитового, при уменьшенном расходе вяжущего – 595–657 кг/м³, плотность бетонов, как ожидалось,

повышается и составляет 1543–1968 кг/м³, что соответствует маркам по средней плотности D1600–D2000. (Серии бетонов 1 и 2, табл. 3).

Кубиковая прочность

Кубиковая прочность при сжатии (R) легких бетонов в возрасте 28 сут. находится в прямой зависимости от насыпной плотности и прочности легкого заполнителя (рис. 3). Присутствие в составе бетонов тяжелого природного песка вместо легкого керамзитового способствует приросту прочности (серии 1 и 2, рис. 3). При этом влияние на прочность бетонов разных песков – природного или керамзитового – представляется не столь значительным, как влияние свойств керамзитового гравия.

Значения прочности бетонов всех трех серий в возрасте 28 сут, приготовленных с разными видами



- 1 – 1-я серия бетонов на природном песке и керамзитовом гравии с МБ=24% массы цемента
- 2 – 2-я серия бетонов на природном песке и керамзитовом гравии с МБ=16% массы цемента
- 3 – 3-я серия бетонов на керамзитовом песке и гравии с МБ=24% массы цемента

Рис. 2. Зависимость средней плотности легкого бетона в сухом состоянии от насыпной плотности керамзитового заполнителя
Fig. 2. Dependence of the average density of lightweight concrete in a dry state on the bulk density of expanded clay aggregate

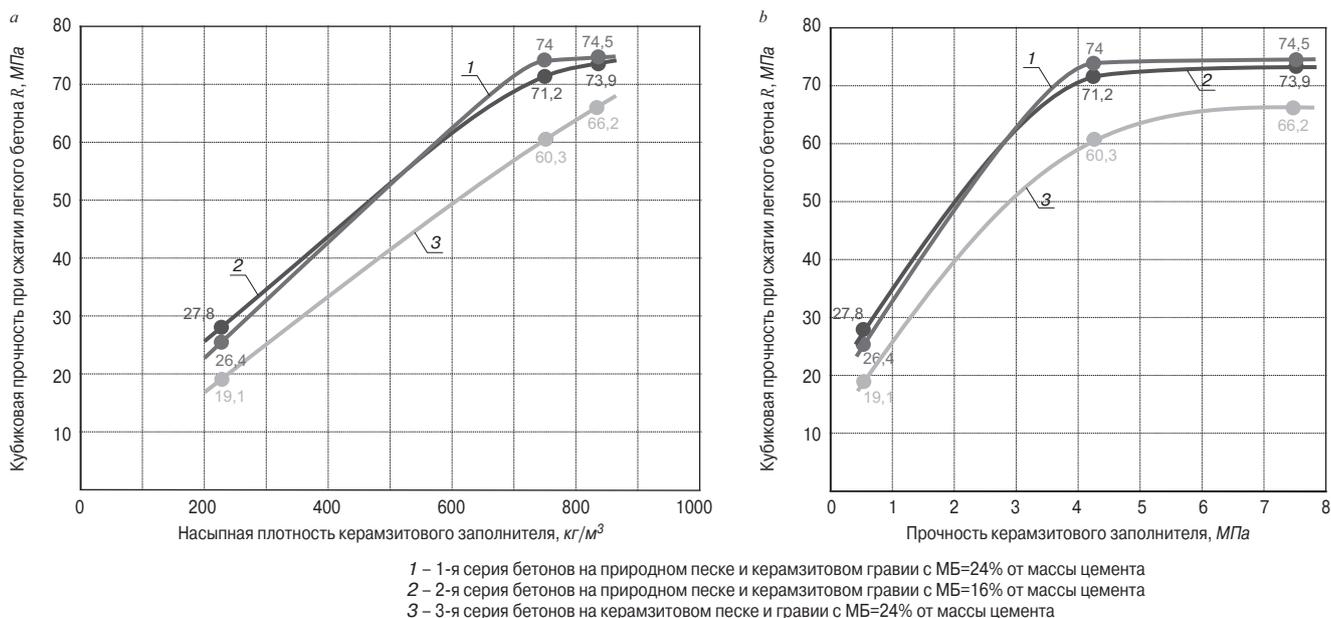


Рис. 3. Зависимость кубиковой прочности легкого бетона от насыпной плотности (а) и прочности (b) керамзитового заполнителя
 Fig. 3. Dependence of the cubic strength of lightweight concrete on bulk density (a) and strength (b) expanded clay aggregate

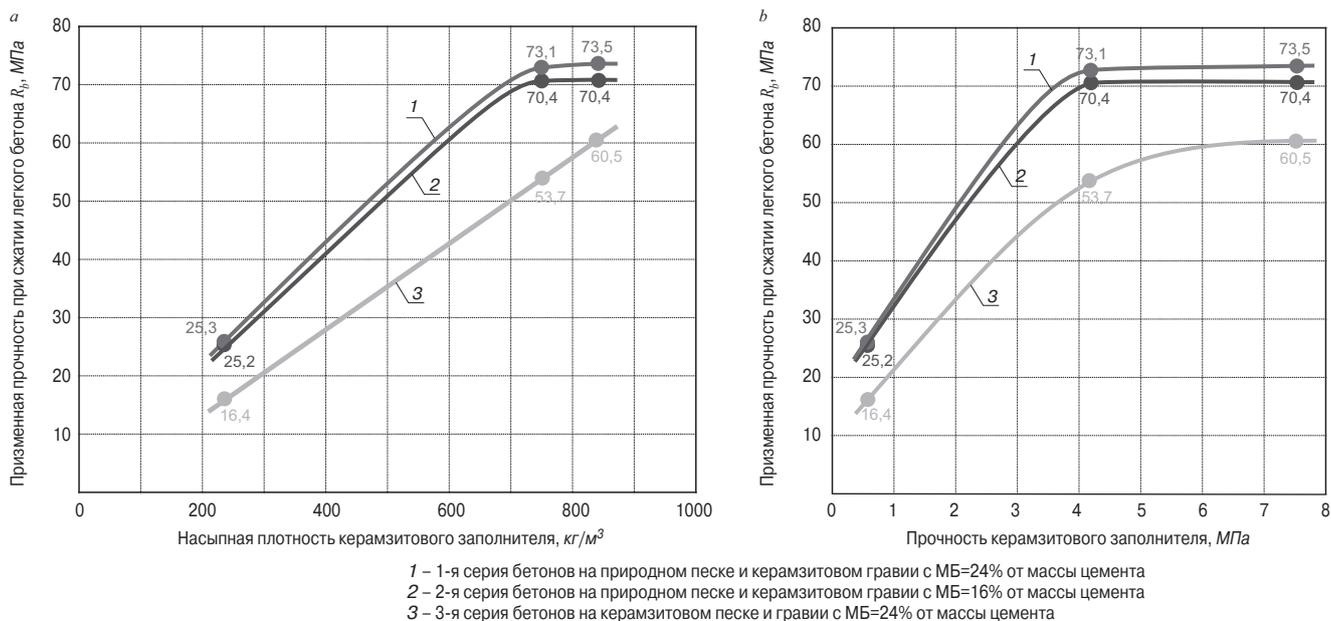


Рис. 4. Зависимость призмной прочности легкого бетона от насыпной плотности (а) и прочности (b) керамзитового заполнителя
 Fig. 4. Dependence of the prism strength of lightweight concrete on bulk density (a) and strength (b) expanded clay aggregate

песка, в зависимости от плотности и прочности заполнителей находятся в следующих диапазонах:

– 19,1–27,8 МПа (фактические классы В_ф16–В_ф24, марки по средней плотности D1300–D1600) – при использовании керамзитового заполнителя с насыпной плотностью 221–234 кг/м³ и прочностью 0,6–0,7 МПа;

– 60,3–74,5 МПа (фактические классы В_ф52–В_ф65, марки по средней плотности D1600–D1900) – при использовании керамзитового заполнителя с насыпной плотностью 727–750 кг/м³ и прочностью 3,95–4,10 МПа;

– 66,2–74,5 МПа (фактические классы В_ф58–В_ф65, марки по средней плотности D1600–D2000) –

при использовании керамзитового заполнителя с насыпной плотностью 835–910 кг/м³ и прочностью 7,6–8,9 МПа.

Представленные выше результаты показывают, что использование при производстве бетонных смесей керамзитового гравия прочностью менее 4,1 МПа, т. е. марки по прочности ниже П150 в сочетании как с природным песком из плотных пород, так и с керамзитовым песком не обеспечивает решения задачи получения высокопрочного легкого бетона классов В50–В65. При этом повышение прочности керамзитового гравия до 7,6 МПа (марка по прочности П300) не приводит к увеличению прочности самоуплотняющегося легкого бетона на природном песке и керамзитовом

гравии (рис. 3, б). Это, по-видимому, можно объяснить тем, что при прочности легкого бетона 70–74 МПа с объемом керамзитового гравия 0,36–0,4 м³ основную нагрузку воспринимает растворная часть структуры бетона, прочность которой может достигать 120–130 МПа (при дозировке МБ 16–24% массы цемента и $V/(Ц+МБ)=0,23–0,27$), а прочности керамзита на уровне 4,1 МПа достаточно, чтобы перераспределить напряжения в структуре бетона. При увеличении объема керамзитового заполнителя до 0,57 м³ в составе бетона повышение его прочности до 7,6 МПа уже сказывается и прочность легкого бетона возрастает на 10%, от 60,3 до 66,2 МПа (рис. 3, б). Полученные результаты показывают связь прочности с объемным содержанием керамзитового заполнителя в составе смеси и их влияние на прочностные характеристики высокопрочных легких бетонов.

Призменная прочность

Представленные на рис. 4 зависимости показывают, что тенденции изменения призменной прочности при сжатии (R_b) легких бетонов в возрасте 28 сут соответствует изменению кубиковой прочности. Значения призменной прочности бетонов всех трех серий в возрасте 28 сут, приготовленных с разными видами песка, в зависимости от плотности и прочности заполнителей находятся в следующих диапазонах:

– 16,4–25,3 МПа (у бетонов классов В_ф16–В_ф24, марок по средней плотности D1300–D1600) – при использовании керамзитового заполнителя с насыпной плотностью 221–234 кг/м³ и прочностью 0,6–0,7 МПа;

– 53,7–73,1 МПа (у бетонов классов В_ф52–В_ф65, с маркой по средней плотности D1600–D1900) – при использовании керамзитового заполнителя с насыпной плотностью 727–750 кг/м³ и прочностью 3,95–4,1 МПа;

– 60,5–73,5 МПа (у бетонов классов В_ф58–В_ф65 с маркой по средней плотности D1600–D2000) – при использовании керамзитового заполнителя с насыпной плотностью 835–910 кг/м³ и прочностью 7,6–8,9 МПа.

Оценка вышеизложенных результатов по критерию «коэффициент призменной прочности», определяемому отношением R_b/R , показывает, что фактические значения коэффициента находятся в диапазоне от 0,86 до 0,99. Это значительно превосходит значения этого коэффициента, рассчитанного по параметрам, приведенным в СП 63.13330.2018 (от 0,7 до 0,77), и приводит к выводу, что расчет железобетонных конструкций по прочности, выполняемый на основании нормируемых и расчетных характеристик легких бетонов согласно табл. 6.7 СП 63.13330.2018, по существу, приводит к значительным запасам их несущей способности.

Начальный модуль упругости

Результаты определения и зависимости начального модуля упругости (E_b) от насыпной плотности керамзитового гравия фактических классов легких бетонов В_ф16–В_ф65 прочностью при сжатии 19,1–74,5 МПа представлены в табл. 3 и на рис. 5.

Полученные результаты (рис. 5) показывают, что начальный модуль упругости легких бетонов в значительной степени зависит от сочетания объема керамзитового заполнителя в составе смеси и его характеристик (насыпной плотности и прочности), в частности:

– начальный модуль упругости легких бетонов фактических классов В_ф23–В_ф65 (прочностью 26,4–74,5 МПа) с марками по плотности D1600–D2000 (средней плотностью 1543–1968 кг/м³) из самоуплотняющихся смесей с использованием природного песка и керамзитового гравия в объеме 0,36–0,4 м³ находится в достаточно узком диапазоне от 21,6 до 25,8 ГПа (серии 1 и 2, рис. 5) и при изменении характеристик керамзита (насыпной плотности от 221 до 835 кг/м³ и прочности от 0,6 до 7,6 МПа) повышается всего на 10–15%;

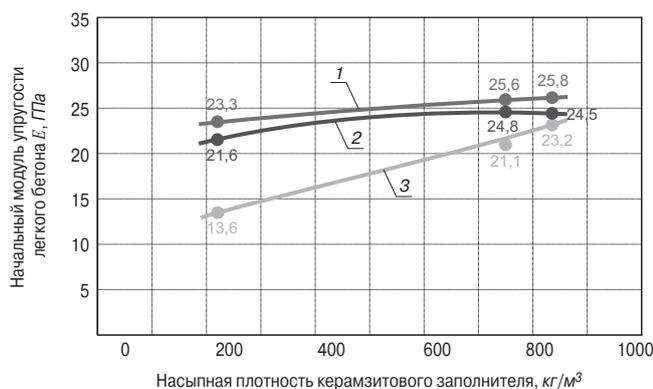
– начальный модуль упругости легких бетонов фактических классов В_ф16–В_ф58 (прочностью 19,1–66,2 МПа) с марками по плотности D1300–D1800 (средней плотностью 1316–1765 кг/м³) из высокоподвижных смесей с использованием керамзитового песка и гравия в объеме 0,57–0,7 м³ находится в более широком диапазоне от 13,6 до 23,2 ГПа (серия 3, рис. 5) и при изменении характеристик керамзита (насыпной плотности от 221 до 835 кг/м³ и прочности от 0,6 до 7,6 МПа) повышается значительно, на 55–70%.

Полученные результаты показывают, что при оценке деформационных характеристик легких бетонов необходимо учитывать взаимосвязь характеристик (плотности и прочности) керамзита и его объемного содержания в составе смеси. Так, при увеличении объемного содержания керамзитового заполнителя в составе бетона от 0,4 до 0,7 м³/м³ влияние его характеристик на значение начального модуля упругости значительно повышается.

Данное обстоятельство дает возможность управлять значением начального модуля упругости легких бетонов, который при одних и тех же классах по прочности и марках по средней плотности может находиться в широком диапазоне, что можно наблюдать на примере легких бетонов на керамзитовом заполнителе с маркой по насыпной плотности М250 и маркой по прочности П35:

– начальный модуль упругости легкого бетона класса В_ф16 с маркой по плотности D1300 с использованием керамзитового заполнителя в объеме 0,7 м³ составляет 13,6 ГПа и превосходит на 18% нормативное значение начального модуля упругости (11,5 ГПа) для легкого бетона соответствующего класса по прочности и марки по средней плотности согласно табл. 6.11 СП 63.13330.2018;

– начальный модуль упругости легких бетонов классов В_ф23 и В_ф24 с маркой по плотности D1600 с использованием керамзитового заполнителя в объеме 0,37 и 0,38 м³ составляет 21,6 и 23,3 ГПа и превосходит на 34 и 43% нормативное значение начального модуля упругости (16,1 и 16,3 ГПа) для легкого



- 1 – 1-я серия бетонов на природном песке и керамзитовом гравии с МБ=24% от массы цемента
 2 – 2-я серия бетонов на природном песке и керамзитовом гравии с МБ=16% от массы цемента
 3 – 3-я серия бетонов на керамзитовом песке и гравии с МБ=24% от массы цемента

Рис. 5. Зависимость начального модуля упругости легкого бетона от насыпной плотности керамзитового заполнителя

Fig. 5. Dependence of the initial modulus of elasticity of lightweight concrete on bulk density of expanded clay aggregate

бетона соответствующих классов по прочности и марки по средней плотности согласно табл. 6.11 свода правил СП 63.13330.2018.

Выводы

1. Исследовано влияние разновидностей керамзитового заполнителя (песка фракции 0–5 мм и гравия фракции 5–10 мм) марок по насыпной плотности М250, М800, М900, М1000 и марок по прочности П35, П150, П300, П350 на среднюю плотность, предел прочности при сжатии и начальный модуль упругости легких бетонов. Установлено, что при близких по значению объемных дозировках компонентов бе-

Список литературы

- Каприелов С.С., Травуш В.И., Карпенко Н.И., Шейнфельд А.В., Кардумян Г.С., Киселева Ю.А., Пригоженко О.В. Модифицированные высокопрочные бетоны классов В80 и В90 в монолитных конструкциях // *Строительные материалы*. 2008. № 3. С. 9–13.
- Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Аль-Омаис Д., Зайцев А.С. Опыт производства и контроля качества высокопрочных бетонов на строительстве высотного комплекса «ОКО» в ММДЦ «Москва-Сити» // *Промышленное и гражданское строительство*. 2018. № 1. С. 18–24.
- 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. № 33 (2). С. 106–121. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-2\(33\)-106-121](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-2(33)-106-121).
- 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.

тонных смесей характер влияния свойств (плотности и прочности) керамзитового заполнителя на вышеуказанные характеристики легких бетонов имеет сходный характер. Введение в составы бетонных смесей тяжелого природного песка взамен легкого керамзитового усиливает эффект повышения прочности и плотности бетонов.

2. Минимальное значение прочности керамзитового заполнителя, при котором обеспечивается прочность бетона при сжатии, соответствующая классу В50 с маркой по средней плотности D1600, должно соответствовать марке П150. С повышением прочности керамзитового заполнителя до уровня, соответствующего марке П300, прочность бетона повышается до значений, соответствующих классу В65 с маркой по средней плотности D2000.

3. На основании выявленных зависимостей получены самоуплотняющиеся и высокоподвижные (соответствующие марке по удобоукладываемости П5) легкие бетоны марок по средней плотности D1600–D2000, классов по прочности при сжатии от В50 до В65 со следующими характеристиками соответственно: предел прочности при осевом сжатии (R_b) – от 53,7 до 73,5 МПа, начальный модуль упругости (E_b) – от 21,2 до 25,8 ГПа.

4. Полученные самоуплотняющиеся и высокоподвижные легкие бетоны классов В50–В65 выходят за пределы классификационного ряда легких бетонов и обладают характеристиками, значительно превышающими нормативные, предусмотренные сводом правил СП 63.13330.2018. Это является основанием для продолжения исследований прочностных и деформационных свойств легких бетонов с целью внесения изменений в указанный свод правил.

References

- Kaprielov S.S., Travush V.I., Karpenko N.I., Sheynfeld A.V., Kardumyan G.S., Kiseleva Yu.A., Prigozhenko O.V. Modified high-strength concretes of classes В80 and В90 in monolithic structures. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2008. No. 3, pp. 9–13. (In Russian).
- Kaprielov S.S., Sheynfeld A.V., Al-Omais D., Zaitsev A.S. Experience in the production and quality control of high-strength concretes at the construction of the high-rise complex “OKO” in the MIBC “Moscow-City”. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo*. 2018. No. 1, pp. 18–24. (In Russian).
- Kaprielov S.S., Sheynfeld A.V., Al-Omais D., Zaitsev A.S., Amirov R.A. Technology of construction of high-rise building frame structures from high-strength concrete of classes В60–В100. *Vestnik NITS Stroitelstvo*. 2022. No. 33 (2), pp. 106–121. (In Russian). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-2\(33\)-106-121](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-2(33)-106-121)
- Kaprielov S.S., Sheynfeld A.V., Kardumyan G.S., Kiseleva Yu.A., Prigozhenko O.V. New concretes and technologies in the construction of high-rise buildings. *Vysotnye zdaniya*. 2007. No. 5, pp. 94–101. (In Russian).

5. 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.
6. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Кардумян Г.С. Новые модифицированные бетоны. М.: Парадиз, 2010. 258 с.
7. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Кривобородов Ю.Р. Влияние структуры цементного камня с добавками микрокремнезема и суперпластификатора на свойства бетона // *Бетон и железобетон*. 1992. № 7. С. 4–7.
8. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В. Влияние состава органоминеральных модификаторов бетона серии «МБ» на их эффективность // *Бетон и железобетон*. 2001. № 5. С. 11–15.
9. Kapriellov S., Sheynfeld A., Selyutin N. Control of heavy concrete characteristics affecting structural stiffness // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2022. 18 (1), 24–39. <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2022-18-1-24-39>
10. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Кардумян Г.С., Чилин И.А. О подборе составов высококачественных бетонов с органоминеральными модификаторами // *Строительные материалы*. 2017. № 12. С. 58–63
11. 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.
12. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Дондуков В.Г. Цементы и добавки для производства высокопрочных бетонов // *Строительные материалы*. 2017. № 11. С. 4–10.
13. 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.
14. Juan-Xin Lu, Peiliang Shen, Hafis Asad Ali, Chi Sun Poon. Mix design and performance of lightweight ultra-high-performance concrete // *Materials and Design*. 2022. 216. 110553.
15. Karamloo Mohammad., Mazloom Moosa., Payganeh Gholamhasan. Effect of maximum aggregate size on fracture behaviors of self-compacting lightweight concrete // *Construction and Building Materials*. 2016. 123, pp. 508–515.
16. Jae-II 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. No. 38, pp. 854–864.
17. Gui H.Z., Tommy Yio Lo, Shazim Ali Memon, Weiting Xu. Effect of lightweight aggregates on mechanical properties and brittleness of lightweight aggregate concrete // *Construction and Building Materials*. 2012. 35, pp. 149–158.
5. 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).
6. Kapriellov S.S., Sheynfeld A.V., Kardumyan G.S. Novye modifitsirovannye betony [New Modified Concretes]. Moscow: Paradise. 2010. 258 p.
7. Kapriellov S.S., Sheynfeld A.V., Krivoborodov Yu.R. Influence of the structure of cement stone with the addition of microsilica and superplasticizer on the properties of concrete. *Beton i gelezobeton*. No. 7, 1992, pp. 4–7. (In Russian).
8. Kapriellov S.S., Sheynfeld A.V. Influence of the composition of organomineral concrete modifiers of the “MB” series on their effectiveness. *Beton i gelezobeton*. 2001. No. 5, pp. 11–15. (In Russian).
9. Kapriellov S., Sheynfeld A., Selyutin N. Control of heavy concrete characteristics affecting structural stiffness. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2022. 18 (1), pp. 24–39. <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2022-18-1-24-39>
10. Kapriellov S.S., Sheynfeld A.V., Kardumyan G.S., Chilin I.A. On the selection of compositions of high-quality concretes with organo-mineral modifiers. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2017. No. 12, pp. 58–63. (In Russian).
11. Sheynfeld A.V., Kapriellov S.S., Chilin I.A. Influence of temperature on the parameters of the structure and properties of cement systems with organomineral modifiers. *Gradostroitelstvo i arhitektura*. 2017. Vol. 7. No. 1, pp. 58–63. (In Russian).
12. Kapriellov S.S., Sheynfeld A.V., Dondukov V.G. Cements and additives for the production of high-strength concrete. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2017. No. 11, pp. 4–10. (In Russian).
13. 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.
14. Juan-Xin Lu, Peiliang Shen, Hafis Asad Ali, Chi Sun Poon. Mix design and performance of light-weight ultra-high-performance concrete. *Materials and Design*. 2022. 216. 110553.
15. Karamloo Mohammad., Mazloom Moosa., Payganeh Gholamhasan. Effect of maximum aggregate size on fracture behaviors of self-compacting lightweight concrete. *Construction and Building Materials*. 2016. 123, pp. 508–515.
16. Jae-II 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. No. 38, pp. 854–864.
17. Gui H.Z., Tommy Yio Lo, Shazim Ali Memon, Weiting Xu. Effect of lightweight aggregates on mechanical properties and brittleness of lightweight aggregate concrete. *Construction and Building Materials*. 2012. 35, pp. 149–158.