

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2024.54.5>**ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА САМОУПЛОТНЯЮЩИХСЯ ЛЁГКИХ БЕТОНОВ НА ПОЛЫХ МИКРОСФЕРАХ**

Научная статья

Епихин С.Д.^{1,*}, Иноземцев А.С.²^{1,2}Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (sergep97[at]mail.ru)

Аннотация

Введение. За последние десятилетия наибольшую популярность в мире приобрели самоуплотняющиеся бетоны (СУБ). Однако в последние годы наблюдается тенденция по снижению веса конструкций, и для этих целей учёными-строителями уже активно разрабатываются технологии высокопрочных конструктивных самоуплотняющихся лёгких бетонов (ЛСУБ), которые по своим механическим характеристикам не будут уступать традиционному тяжелому бетону. Однако получение ЛСУБ осложняется склонностью бетонной смеси к расслоению при снижении средней плотности. Актуальным технологическим решением при производстве данного бетона является использование полых микросфер в качестве лёгкого заполнителя. В данной статье рассмотрены физико-механические свойства конструкционного легкого бетона с высокой подвижностью и факторы, влияющие на данные свойства.

Методы и принципы исследования. Объектом исследования являются бетоны, полученные после испытаний бетонных смесей на полых микросферах на технологические и реологические характеристики и смесей без проведённых над ними испытаний. Проектная средняя плотностью бетона 1400 кг/м³. Представлен следующий состав: портландцемент, керамические микросферы, комплексная кремнеземистая добавка, фракционный песок, кварцевая мука, гиперпластификатор и вода. Получены результаты исследований физико-механических характеристик ЛСУБ, проведённых по ГОСТ 310.4—81. За ключевые параметры принимались: плотность, прочность при изгибе и сжатии.

Основные результаты. Влияние В/Ц и C_d на физико-механические характеристики и однородность затвердевшего бетона меняется в зависимости от вида внешнего воздействия на смесь перед её формованием. Уравнения регрессии установили негативное влияние В/Ц на прочность и плотность бетона.

Закключение. Установлено, что смеси легких бетонов с содержанием полых микросфер при $V/C \leq 0,6$ и $C_d \leq 1,0\%$ не имеют расслоения, но внешнее воздействие на смесь до формования смещает пределы однородности. Представлены пределы изменений физико-механических свойств легкого бетона на полых микросферах в выбранном диапазоне варьирования В/Ц-отношения и C_d . Установлено, что удельная прочность при изгибе и сжатии ЛСУБ может иметь сопоставимые значения с тяжелым бетоном.

Ключевые слова: самоуплотняющиеся легкие бетоны, полые микросферы, физико-механические свойства, сохранение однородности, водоцементное отношение и концентрация пластификатора.

PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF SELF-COMPACTING LIGHTWEIGHT CONCRETES ON HOLLOW MICROSPHERES

Research article

Epikhin S.D.^{1,*}, Inozemtcev A.S.²^{1,2}National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation

* Corresponding author (sergep97[at]mail.ru)

Abstract

Introduction. Self-compacting concretes have been very popular in the world for the past ten years. However, in recent years there has been a tendency to reduce the weight of structures. For these purposes, construction scientists are actively developing technologies for high-strength structural lightweight self-compacting concretes (LWSSC). Such concrete will not be inferior to traditional heavy concrete in terms of its mechanical characteristics. However, the main difficulty in obtaining LWSSC is the tendency of the concrete mixture to delamination with a decrease in average density. An actual technological solution for the production of this concrete is the use of hollow microspheres as a lightweight filler. This article examines the physical and mechanical properties of structural lightweight concrete with high mobility and the factors that affect these properties.

Research methods and principles. The object of the study are concretes that were obtained after testing concrete mixtures on hollow microspheres for technological and rheological characteristics and mixtures without tests performed on them. The design average concrete density is 1400 kg/m³. The following composition is presented: Portland cement, ceramic microspheres, a complex silica additive, fractional sand, quartz flour, hyperplasticizer and water. The results of studies of the physical and mechanical characteristics of LWSSC, conducted in accordance with GOST 310.4—81, were obtained. The key parameters were: density, flexural and compressive strength.

Main results. The influence of W/C and C_{pl} on the physical and mechanical characteristics and uniformity of hardened concrete varies depending on the type of external influence on the mixture before forming it. The regression equations established the negative impact of W/C on the strength and density of concrete.

Conclusion. It was found that mixtures of light concretes with a content of hollow microspheres at an W/C of < 0,6 and C_{pl} of < 1,0% do not have delamination, but external influence on the mixture before molding shifts the limits of uniformity. The limits of changes in the physical and mechanical properties of lightweight concrete on hollow microspheres in the selected range of variation in the W/C ratio and C_{pl} were presented. It has been established that the specific bending and compressive strength of LWSCC can have comparable values with heavy concrete.

Keywords: self-compacting lightweight concretes, hollow microspheres, physical and mechanical properties, preservation of uniformity, water-cement ratio and concentration of plasticizer.

Введение

В современном строительстве основным материалом, используемым при проектировании и строительстве несущих элементов зданий и сооружений, служит тяжелый бетон. На протяжении уже не одного столетия бетон массово применяется в строительной индустрии как относительно удобный материал, способный в жидкой фазе принимать любую форму, заданную опалубкой, и с течением короткого времени переходить в твердую фазу, имея высокие прочностные показатели [1, С. 207], [2 С. 172]. Большое количество исследований посвящено улучшению свойств бетонных смесей и бетонов [3, С. 24], [4, С. 54], [5], [6].

За последние десятилетия особый интерес в мировой практике приобрели самоуплотняющиеся бетоны (СУБ) [7, С. 78], [8], [9, С. 72], [10, С. 69]. Главной отличительной особенностью данного вида бетона является способность к самостоятельному течению и однородному заполнению объема опалубки без дополнительных технологических приемов. При этом наблюдается тенденция по облегчению конструкций для снижения нагрузки на несущие элементы зданий. Поэтому становится особенно актуальной комплексная задача по разработке технологии самоуплотняющихся легких бетонов (ЛСУБ), которые при меньшей плотности не уступают традиционному тяжелому бетону по своим механическим характеристикам [11], [12, С. 11], [13], [14, С. 38]. Особый практический интерес вызывают высокопрочные лёгкие бетоны [12, С.11], [15], [16], [17, С. 372] на различных заполнителях. При этом особую перспективность имеют конструкционные легкие бетоны на полых заполнителях [18], [19, С. 24].

Однако возможность получения самоуплотняющихся легких бетонов закономерно осложняется из-за растущей склонности бетонных смесей к расслоению при снижении средней плотности [11], [12, С.11], [15]. Настоящая работа посвящена исследованию физико-механических свойств самоуплотняющихся легких бетона на полых микросферах, и оценке влияния рецептурных факторов на них.

Как показано в [20] варьирование ключевых факторов для управления подвижностью бетонных смесей позволяет достигать высокой способности к самоуплотнению. Однако как известно, увеличение В/Ц-отношение, оказывая положительное влияние на текучесть смесей, негативно влияет на однородность, что сказывается на плотности и прочности бетона. В связи с этим возникает необходимость установления граничных значений варьируемых факторов, обеспечивающих как удовлетворительную подвижность, так и физико-механические свойства.

Методы и принципы исследования

Объектом исследований являются самоуплотняющиеся конструкционные лёгкие бетоны, полученные из бетонных смесей на основе портландцемента ЦЕМ I 42,5 (Ц), керамических микросфер ForeSphere (МС), микрокремнезема МК-85 (МКМ), фракционного песка фр. 0,16-0,63 мм (Пф), кварцевой муки (Пм), гиперпластификатора Melflux 2651F (Пл) и воды (В) в соотношении, необходимом для достижения проектной плотности бетона 1400 кг/м³ в соответствии с [20] (см. табл. 1). Приготовление бетонной смеси выполнялось в автоматическом растворосмесителе Automix.

Таблица 1 - Соотношение компонентов исследуемых смесей

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2024.54.5.1>

№	Состав	Объемное содержание, %				
		ПЦ	МКМ	П _м	П _ф	МС
1	Легкий бетон	20,0	3,1	2,2	6,5	46,4
2	Тяжелый бетон (прототип 1 и прототип 2)			14,1	41,0	0,0

Исследование физико-механических свойств ЛСУБ выполнено методом математического планирования эксперимента с использованием двухфакторного композиционный план, имеющего следующий вид модели:

$$Y = f(X_1, X_2) = B_0 + B_1 \cdot X_1 + B_2 \cdot X_2 + B_{12} \cdot X_1 \cdot X_2 + B_{11} \cdot X_1^2 + B_{22} \cdot X_2^2. \tag{1}$$

В качестве варьируемых факторов выбраны В/Ц-отношение (X_1) и концентрация пластификатора C_d (X_2). Основные уровни: В/Ц = 0,5 и C_d = 1,4% с интервалом варьирования 0,1 и 0,4% соответственно.

В качестве прототипов для сравнительного анализа выбраны 2 состава самоуплотняющихся тяжелых бетонов, отличающихся отсутствием легкого заполнителя, при следующем В/Ц-отношении и концентрации пластификатора: прототип 1 – В/Ц = 0,5, C_d = 1,4%; прототип 2 – В/Ц = 0,45, C_d = 1,2%. Состав бетонов-прототипов указан в табл.1.

Контролируемыми параметрами качества Y для поиска коэффициентов уравнения выбраны средняя плотность (Y_1), прочность при изгибе (Y_2) и сжатии (Y_3), которые определялись по методике согласно ГОСТ 310.4 на стандартных образцах $40 \times 40 \times 160$ мм в возрасте 28 суток.

Эксперименты по определению прочностных характеристик проводились согласно ГОСТ 310.4. В качестве образцов для определения механических и технических показателей бетона используются образцы-призмы $160 \times 40 \times 40$ мм в возрасте 28 сут.

Целью настоящего исследования является установление влияния рецептурных факторов: количества воды и пластификатора, а также влияния внешних воздействий на физико-механические характеристики самоуплотняющегося конструкционного легкого бетона на полых микросферах и однородность структуры.

В работе исследованы 3 серии образцов, отличающиеся внешним воздействием до укладки бетонной смеси в формы:

- Серия 1 – образцы, отформованные в течение 1 минуты после приготовления бетонной смеси;
- Серия 2 – образцы, отформованные после испытания подвижности бетонных смесей (через 8 минут после приготовления);
- Серия 3 – образцы, отформованные после определения напряжения сдвига и вязкость бетонных смесей (через 25 минут после приготовления).

Перед определением механических характеристик бетона осуществлялся качественный анализ однородности структуры путем фиксации расслоения смеси. Пример образцов с признаками расслоения и образцов без этих признаков представлены на рис. 1.



Рисунок 1 - Внешний вид образцов конструкционного легкого бетона с однородной (а) и расслоившейся (б) структурой

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2024.54.5.2>

Стандартное отклонение для средней плотности составила не более 3%, для прочности при изгибе и сжатии 6% и 5% соответственно.

Основные результаты

К ключевым требованиям к самоуплотняющимся бетонным смесям относится способность к сохранению однородности. Гомогенности структуры способствует множество факторов: качество и количество компонентов смеси, а также условия изготовления и внешние воздействия. В исследуемых бетонных смесях дополнительным фактором является различная плотность фазы (полых микросфер, кварцевого песка и цементного теста). Поэтому ограничением для применения составов легкого бетона с высокой способностью к самоуплотнению выступает склонность к расслоению.

В соответствии с математическим планом эксперимента каждая серия образцов подвергалась качественному анализу на наличие разнородных слоев. Результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2 - Расслоение образцов исследуемого бетона

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2024.54.5.3>

№	Состав согласно плану эксперимента								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
В/Ц	0,4	0,6	0,4	0,6	0,36	0,64	0,5	0,5	0,5
C_d , %	1,0	1,0	1,8	1,8	1,4	1,4	0,83	1,97	1,4
Серия 1	нет	нет	нет	+	нет	+	нет	нет	нет
Серия 2	нет	нет	нет	+	нет	+	нет	нет	нет
Серия 3	нет	+	нет	+	нет	+	+	+	+

Примечание: «+» показывает наличие визуальных признаков сегрегации

Представленные в табл. 2 данные показывают, что при $V/C \leq 0,6$ и $C_d \leq 1,0\%$ расслоение отсутствует на всех составах серии 1 и 2, заформованных сразу после приготовления (без уплотнения) и после испытаний на подвижность соответственно. При этом увеличение содержания пластификатора до 1,8% (состав № 4), а также V/C до 0,64 при количестве пластификатора 1,4% (состав № 6) отражается на проявлении расслоения у соответствующих образцов. Для серии 3, заформованных после испытаний на определение реологических свойств, лишь составы № 1, 3 и 5 при $V/C \leq 0,4$ не имеют визуальных признаков расслоения. То есть можно отметить, что составы № 2, 7, 8 и 9 с $V/C \geq 0,5$ претерпевают изменение структуры бетонной смеси после внешних воздействий, вызванных проведением испытаний. Это объясняется тиксотропным разжижением указанных бетонных смесей, связанным с уменьшением вязкости цементно-минеральной матрицы (дисперсной среды) под действием вибрационных усилий. Отсюда можно выдвинуть предположение о наличии порога однородности, выраженного предельной энергией, после воздействия которой структура бетонной смеси теряет свою однородность.

Таким образом, качественный анализ расслоения образцов исследуемого бетона показывает, что составы с $V/C \leq 0,4$ характеризуются однородной структурой, в том числе при наличии внешнего воздействия. При $V/C \geq 0,6$ и $C_d \geq 1,4$ бетонные смеси характеризуются склонности к сегрегации. Составы с $V/C = 0,5$ стремятся к расслоению после определенного порога внешнего воздействия.

Достижение высокой подвижности бетонных смесей без сохранения однородности не несет практической пользы, поэтому важным условием для самоуплотняющихся легких бетонов является получение однородной структуры и свойств в объеме затвердевшего композита. Для установления влияния ключевых факторов на физико-механические свойства и однородность были получены уравнения регрессии:

$$Y_1 = 1419 - 21,6 \cdot X_1, \tag{2}$$

$$Y_2 = 3,42 - 0,77 \cdot X_1 + 0,23 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,44 \cdot X_1^2, \tag{3}$$

$$Y_3 = 28,6 - 3,93 \cdot X_1 - 1,36 \cdot X_2 + 1,74 \cdot X_1 \cdot X_2 + 2,14 \cdot X_2^2, \tag{4}$$

где Y_1 – средняя плотность бетона, Y_2 – прочность при изгибе, Y_3 – прочность при сжатии.

Формальный анализ показывает, что уравнение $Y_1 = f(X_1, X_2)$ характеризуется статистически незначимым влиянием варьируемых факторов на среднюю плотность бетона. Существенным фактором, согласно модели, выступает лишь V/C -отношение, увеличение которого способствует закономерному снижению средней плотности. Анализ уравнений Y_2 и Y_3 позволяет сделать вывод о схожем влиянии содержания воды на прочность при изгибе и сжатии (отрицательное значение коэффициента B_1). Роль пластификатора при этом становится более значимой, что выражается в положительном влиянии в количествах близких к границам варьируемого диапазона и совместном влиянии C_d и V/C (коэффициенты B_{22} и B_{12}).

Однако интерпретация полученных уравнений осложняется наличием сегрегированных составов при X_1 и $X_2 \in [0, 1]$ (см. табл. 2). Результаты эксперимента свидетельствуют о необходимости оптимизации исследуемых составов по параметрам V/C -отношения и концентрации пластификатора с целью получения бетонов с однородной структурой и высокими прочностными свойствами. При этом в соответствии с экспериментальным планом установлено, что физико-механические свойства исследуемых составов изменяются в диапазоне $\rho_m = 1390 \dots 1470 \text{ кг/м}^3$, $R_{изг} = 2,66 \dots 5,71 \text{ МПа}$, $R_{сж} = 25,8 \dots 44,5 \text{ МПа}$ (см. табл. 3).

Таблица 3 - Физико-механические свойства исследуемых бетонов

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2024.54.5.4>

№	Свойство	Серия	Составы		
			$V/C = 0,5; C_d = 1,4\%$	Прототип 1	Прототип 2
1	Средняя плотность, кг/м^3	1	1420	2170	2110
2		2	1475	2190	2190
3		3	1455	2230	2240
4	Прочность при изгибе, МПа	1	3,42	7,39	6,33
5		2	5,34	8,17	7,89
6		3	4,13	8,91	8,49
7	Прочность при сжатии, МПа	1	28,6	56,3	47,3
8		2	34,3	59,4	58,8
9		3	39,1	63,5	61,1

Сравним физико-механические свойства полученных легких бетонов на полых микросферах с прототипами из тяжелого бетона высокой подвижности при различной степени воздействия на бетонную смесь. На рис. 2 показаны

удельные механические характеристики тяжелого (прототип 1) и легкого (состав 9 по плану) бетона при В/Ц = 0,5 и $C_d = 1,4\%$, а также прототип 2 с меньшей величиной варьируемых факторов (В/Ц=0,45 и $C_d=1,2\%$).

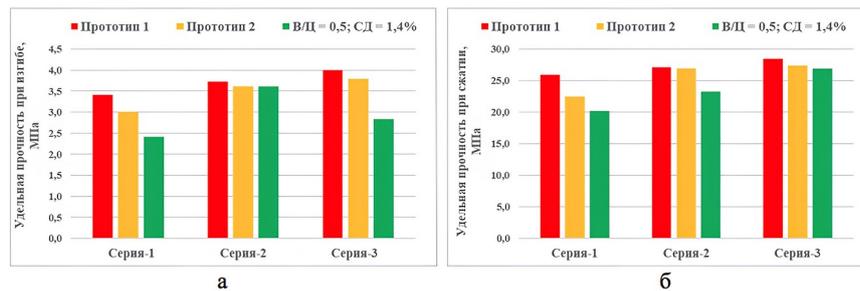


Рисунок 2 - Удельная прочность при изгибе (а) и сжатии (б) легких бетонов на полых микросферах в сравнении с прототипами

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2024.54.5.5>

На рис. 2, видно, что у легкого бетона серии 1 (отформованного сразу после приготовления) удельная прочность меньше при изгибе на 29,2 и 19,7, при сжатии на 22,3 и 10,1%, чем у каждого из прототипов соответственно. Прочность при изгибе при этом составляет 3,42 МПа против 7,39 и 6,33 МПа, а при сжатии 28,6 МПа против 56,3 и 47,3 МПа соответственно. Для образцов серии 2, отформованных после испытания подвижности, величина удельной прочности при изгибе образцов тяжелого и легкого бетона сопоставимы 3,62...3,73 МПа, а прочность при сжатии отличается на 14,3 и 13,6% от прототипа 1 и прототипа 2 соответственно. Это может быть связано с доуплотнением бетонных смесей после встряхивания. Еще большее воздействие на бетонную смесь оказывает воздействие, которое они получили до формирования после исследования реологических свойств, для тяжелого бетона сказывается на повышении удельной прочности при изгибе и сжатии, а для легкого характеризуется снижением удельной прочности при изгибе до 2,84 МПа, но повышении удельной прочности при сжатии до 26,9 МПа. Объяснением указанного является неоднородность структуры сформированного образца легкого бетона, связанной с расслоением, как показано в табл. 2.

Таким образом, установлено, что самоуплотняющиеся легкие бетоны на полых микросферах могут иметь высокие прочностные характеристики. Удельная прочность таких бетонов сопоставима с тяжелыми бетонами без микросфер. Для использования самоуплотняющихся легких бетонов следует установить рецептурные ограничения, позволяющие обеспечить однородность структуры при различной степени внешнего воздействия.

Заключение

Полученные результаты позволяют сформулировать следующие выводы:

- Установлено, что смеси легких бетонов с содержанием полых микросфер 46,4% по объему при В/Ц ≤ 0,6 и $C_d \leq 1,0\%$ не имеют расслоения. Увеличение В/Ц-отношения или концентрации добавки приводит к нарушению однородности бетонной смеси. Наличие внешнего воздействия на смесь до формирования смещает пределы однородности для варьируемых факторов в сторону меньших значений.

- Изменения физико-механических свойств легкого бетона на полых микросферах в выбранном диапазоне варьирования В/Ц-отношения и концентрации добавки составляет $\rho = 1390 \dots 1470 \text{ кг/м}^3$, $R_{изг} = 2,66 \dots 5,71 \text{ МПа}$, $R_{сж} = 25,8 \dots 44,5 \text{ МПа}$. При этом наличие расслоения при В/Ц ≥ 0,6 не позволяет корректно установить влияние варьируемых факторов.

- Удельная прочность при изгибе и сжатии самоуплотняющегося легкого бетона может иметь сопоставимые значения с тяжелым бетоном, что требует рецептурной оптимизации составов на полых микросферах.

Перспективным направлением развития темы является установление влияние объемного содержания минерального заполнителя и полых микросфер на сохранение однородности структуры и прочностные свойства затвердевшего бетона.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Масаев Ю.А. Бетон в строительстве - с древнейших времен до наших дней / Ю.А. Масаев, А.П. Политов, В.Ю. Масаев // Вестник кузбасского государственного технического университета. — 2017. — № 3. — С. 207–217.

2. Соловьев А.К. Самоуплотняющийся бетон в архитектурных конструкциях / А.К. Соловьев, К.А. Соловьев, Н.В. Стекольников // Архитектура и современные информационные технологии. — 2018. — № 2. — С. 171–184.
3. Иноземцев А.С. Реологические особенности цементно-минеральных систем, пластифицированных поликарбоксилатным пластификатором / А.С. Иноземцев, Е.В. Королев, Т.К. Зыонг // Региональная архитектура и строительство. — 2019. — № 3 (40). — С. 24–34.
4. Несветаев Г.В. Самоуплотняющиеся бетоны: прочность и проектирование состава / Г.В. Несветаев, А.Н. Давидюк // Строительные материалы. — 2009. — № 5. — С. 54–57.
5. Тринкер А.Б. Поверхностно-активные вещества и электролиты в бетонах, история создания и применения, пав и эрзатцы / А.Б. Тринкер // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. — 2018. — № 3 (24). — С. 52–55.
6. Сафончик Д.И. Исследование физико-механических характеристик бетонов, изготовленных на основе бетонного лома / Д.И. Сафончик, Д.А. Сазон // Наука и инновационные технологии. — 2022. — № 1 (22). — С. 207–212.
7. Федюк Р.С. Композиционные вяжущие и самоуплотняющиеся фибробетоны для защитных сооружений / Р.С. Федюк, А.В. Мочалов, В.С. Лесовик [и др.] // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. — 2018. — № 7. — С. 77–85.
8. Мозгалева К.М. Самоуплотняющиеся бетоны: возможности применения и свойства / К.М. Мозгалева, С.Г. Головнев // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. — 2011. — № 4. — С. 55–60.
9. Горюшин К.В. Самоуплотняющийся бетон в современной строительной индустрии / К.В. Горюшин // Будущее науки. — Вып. 4. — Курск : Юго-Западный государственный университет, 2020. — С. 71–73.
10. Фаликман В.Р. Отечественный опыт производства и применения самоуплотняющегося бетона / В.Р. Фаликман, В.В. Денискин, О.О. Калашников [и др.] // Национальная ассоциация ученых. — 2015. — № 2-3. — С. 68–73.
11. Inozemtcev A.S. High-strength lightweight concrete mixtures based on hollow microspheres: Technological features and industrial experience of preparation / A.S. Inozemtcev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2015. — № 71 (1). — DOI: 10.1088/1757-899X/71/1/012028.
12. Сумин А.С. Легкий самоуплотняющийся бетон и их перспективы / А.С. Сумин // Новое слово в науке: стратегии развития. — Чебоксары : ООО «Центр научного сотрудничества "Интерактив плюс"», 2018. — С. 10–14.
13. Сумин А.С. Легкий самоуплотняющийся бетон – будущее монолитного домостроения / А.С. Сумин // Наука, образование, общество: тенденции и перспективы развития. — Вып. 1. — Чебоксары : ООО «Центр научного сотрудничества "Интерактив плюс"», 2017. — С. 354–358.
14. Откеев Р.В. Анализ изученности лёгкого самоуплотняющегося бетона / Р.В. Откеев, К.А. Сазанкова // Архитектура и дизайн. — 2018. — № 3. — С. 36–41. — DOI: 10.7256/2585-7789.2018.3.29713.
15. Иноземцев А.С. Высокопрочные лёгкие бетоны: монография / А.С. Иноземцев, Е.В. Королев. — Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2022. — 192 с.
16. Adhikary S.K. Expanded glass as light-weight aggregate in concrete – A review / S.K. Adhikary, D.K. Ashish, Ž. Rudžionis // Journal of Cleaner Production. — 2021. — № 313. — DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.127848.
17. Güneyisi E. Effect of nano silica on the workability of self-compacting concretes having untreated and surface treated lightweight aggregates / E. Güneyisi, M. Gesoglu, O.A. Azez [et al.] // Construction and Building Materials. — 2016. — № 115. — P. 371–380. — DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.04.055.
18. Иноземцев А.С. Легкие бетоны на полых и пористых заполнителях / А.С. Иноземцев, Е.В. Королев // Строительные материалы. — 2024. — № 7. — С. 41–47. — DOI: 10.31659/0585-430X-2024-826-7-41-47.
19. Иноземцев А.С. Деформации высокопрочных легких бетонов на полых микросферах и способ их снижения / А.С. Иноземцев, Е.В. Королев // Строительные материалы. — 2015. — № 9. — С. 23–30.
20. Inozemtcev A.S. Conditions for the Preparation of Self-Compacting Lightweight Concrete with Hollow Microspheres / A.S. Inozemtcev, S.D. Epikhin // Materials. — 2023. — № 16. — DOI: 10.3390/ma16237288.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Masaev Ju.A. Beton v stroitel'stve - s drevnejshih vremen do nashih dnei [Concrete in construction - from ancient times to our days] / Ju.A. Masaev, A.P. Politov, V.Ju. Masaev // Vestnik kuzbasskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta [Bulletin of the Kuzbass State Technical University]. — 2017. — № 3. — P. 207–217. [in Russian]
2. Solov'ev A.K. Samouplotnjajuschisja beton v arhitekturyh konstruksijah [Self-sealing concrete in architectural structures] / A.K. Solov'ev, K.A. Solov'ev, N.V. Stekol'nikov // Arhitektura i sovremennye informacionnye tehnologii [Architecture and modern information technologies]. — 2018. — № 2. — P. 171–184. [in Russian]
3. Inozemtsev A.S. Reologičeskie osobennosti tsementno-mineral'nyh sistem, plastifitsirovannyh polikarboksilatnym plastifikatorom [Rheological features of cement-mineral systems plasticized with polycarboxylate plasticizer] / A.S. Inozemtsev, E.V. Korolev, T.K. Zyong // Regional'naja arhitektura i stroitel'stvo [Regional architecture and construction]. — 2019. — № 3 (40). — P. 24–34. [in Russian]
4. Nesvetaev G.V. Samouplotnjajuschiesja betony: prochnost' i proektirovanie sostava [Self-compacting concrete: strength and composition design] / G.V. Nesvetaev, A.N. Davidjuk // Stroitel'nye materialy [Building materials]. — 2009. — № 5. — P. 54–57. [in Russian]
5. Trinker A.B. Poverhnostno-aktivnye veschestva i elektrolity v betonah, istorija sozdanija i primenenija, pav i erzatcy [Surfactants and electrolytes in concrete, the history of creation and application, surfactants and ersatz] / A.B. Trinker // Jenergo- i resursosberezhenie: promyshlennost' i transport [Energy and resource saving: industry and transport]. — 2018. — № 3 (24). — P. 52–55. [in Russian]

6. Safonchik D.I. Issledovanie fiziko-mehaničeskikh harakteristik betonov, izgotovlennykh na osnove betonnoġo loma [Investigation of the physico-mechanical characteristics of concretes made on the basis of concrete scrap] / D.I. Safonchik, D.A. Sazon // Nauka i innovacionnye tehnologii [Science and innovative technologies]. — 2022. — № 1 (22). — P. 207–212. [in Russian]
7. Fedjuk R.S. Kompozitsionnye vjazhushchie i samouplotnjajushiesja fibrobetony dlja zasčitnykh sooruzhenij [Composite binders and self-compacting fiber-reinforced concrete for protective structures] / R.S. Fedjuk, A.V. Mochalov, V.S. Lesovik [et al.] // Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tehnologičeskogo universiteta im. V.G. Shuhova [Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov]. — 2018. — № 7. — P. 77–85. [in Russian]
8. Mozgalev K.M. Samouplotnjajushiesja betony: vozmozhnosti primenenija i svojtva [Self-compacting concrete: application possibilities and properties] / K.M. Mozgalev, S.G. Golovnev // Akademicheskij vestnik UralNIIproekt RAASN [Academic Bulletin of UralNIIproekt RAASN]. — 2011. — № 4. — P. 55–60. [in Russian]
9. Gorjushin K.V. Samouplotnjajushiesja beton v sovremennoj stroitel'noj industrii [Self-compacting concrete in the modern construction industry] / K.V. Gorjushin // Budushhee nauki [Future of Science]. — Issue 4. — Kursk : The Southwest State University, 2020. — P. 71–73. [in Russian]
10. Falikman V.R. Otechestvennyj opyt proizvodstva i primenenija samouplotnjajushčesja betona [Domestic experience in the production and use of self-compacting concrete] / V.R. Falikman, V.V. Deniskin, O.O. Kalashnikov [et al.] // National Association of Scientists. — 2015. — № 2–3. — P. 68–73. [in Russian]
11. Inozemtcev A.S. High-strength lightweight concrete mixtures based on hollow microspheres: Technological features and industrial experience of preparation / A.S. Inozemtcev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2015. — № 71 (1). — DOI: 10.1088/1757-899X/71/1/012028.
12. Sumin A.S. Legkij samouplotnjajushiesja beton i ih perspektivy [Lightweight self-compacting concrete and their prospects] / A.S. Sumin // Novoe slovo v nauke: strategii razvitija [New word in science: development strategies]. — Cheboksary : LLC «Scientific Cooperation Center "Interactive Plus"», 2018. — P. 10–14. [in Russian]
13. Sumin A.S. Legkij samouplotnjajushiesja beton – budushee monolitnogo domostroenija [Lightweight self-compacting concrete is the future of monolithic housing construction] / A.S. Sumin // Nauka, obrazovanie, obshhestvo: tendencii i perspektivy razvitija [Science, education, society: trends and prospects of development]. — Issue 1. — Cheboksary : LLC «Scientific Cooperation Center "Interactive Plus"», 2017. — P. 354–358. [in Russian]
14. Otkeev R.V. Analiz izučennosti legkogo samouplotnjajushčesja betona [Analysis of the study of lightweight self-compacting concrete] / R.V. Otkeev, K.A. Sazankova // Arhitektura i dizajn [Architecture and design]. — 2018. — № 3. — P. 36–41. — DOI: 10.7256/2585-7789.2018.3.29713. [in Russian]
15. Inozemtsev A.S. Vysokoprochnye legkie betony: monografija [High-strength lightweight concretes: monograph] / A.S. Inozemtsev, E.V. Korolev. — Saint Peterburg : Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 2022. — 192 p. [in Russian]
16. Adhikary S.K. Expanded glass as light-weight aggregate in concrete – A review / S.K. Adhikary, D.K. Ashish, Ž. Rudžionis // Journal of Cleaner Production. — 2021. — № 313. — DOI: 10.1016./j.jclepro.2021.127848.
17. Güneyisi E. Effect of nano silica on the workability of self-compacting concretes having untreated and surface treated lightweight aggregates / E. Güneyisi, M. Gesoglu, O.A. Azez [et al.] // Construction and Building Materials. — 2016. — № 115. — P. 371–380. — DOI: 10.1016./j.conbuildmat.2016.04.055.
18. Inozemtsev A.S. Legkie betony na polyh i poristyh zapolniteljah [Lightweight concretes on hollow and porous aggregates] / A.S. Inozemtsev, E.V. Korolev // Stroitel'nye materialy [Building materials]. — 2024. — № 7. — P. 41–47. — DOI: 10.31659/0585-430X-2024-826-7-41-47. [in Russian]
19. Inozemtsev A.C. Deformatsii vysokoprochnykh legkih betonov na polyh mikrosferah i sposob ih snizhenija [Deformations of high-strength lightweight concrete on hollow microspheres and a method for reducing them] / A.C. Inozemtsev, E.V. Korolev // Stroitel'nye materialy [Building materials]. — 2015. — № 9. — P. 23–30. [in Russian]
20. Inozemtcev A.S. Conditions for the Preparation of Self-Compacting Lightweight Concrete with Hollow Microspheres / A.S. Inozemtcev, S.D. Epikhin // Materials. — 2023. — № 16. — DOI: 10.3390/ma16237288.