

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 691.32:691.542

DOI: 10.22227/1997-0935.2026.3.399-410

Влияние полого и плотного заполнителя на реологию самоуплотняющихся бетонных смесей

Сергей Дмитриевич Епихин, Александр Сергеевич Иноземцев

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Строительство нуждается в новых бетонах. Популярность набирают самоуплотняющиеся бетоны (СУБ). Преимуществом СУБ является высокая подвижность, поэтому акцент ставится на их реологических свойствах. Развитие технологии продолжается в легких самоуплотняющихся бетонах (ЛСУБ), сочетающих высокую подвижность и низкую плотность. Изучение ЛСУБ акцентируется на влиянии рецептуры на свойства смеси. Цель исследования — изучение влияния соотношения сухих компонентов на реологические свойства ЛСУБ на полых микросферах.

Материалы и методы. Объектом исследования приняты ЛСУБ на полых микросферах. Соотношение сухих компонентов менялось в зависимости от целевой плотности бетона. Состав включает: портландцемент, керамические микросферы, кремнеземистую добавку, фракционный песок (P_f), кварцевую муку (P_m), гиперпластификатор и воду. Количество воды и концентрация пластификатора приняты постоянными: 0,5 и 1,4 % соответственно. Получены результаты исследований реологических характеристик ЛСУБ. Ключевые реологические параметры — напряжение сдвига и вязкость.

Результаты. Бетонные смеси плотностью 1400 кг/м³ имеют дилатантный характер течения вне зависимости от соотношения P_m/P_f . При плотности 1500 и 1600 кг/м³ характер течения сменяется на псевдопластичный при $P_m/P_f = 25/75$. Показана возможность управления типом течения тяжелых бетонов изменением P_m/P_f . Разница течения между легкими и тяжелыми бетонными смесями отражается на зависимостях напряжения сдвига и вязкости от P_m/P_f . Увеличение P_m повышает напряжения сдвига и вязкость у ЛСУБ, у тяжелых составов наблюдается смена нисходящей зависимости на восходящую в диапазоне $P_m/P_f = 25/75–75/25$ при разных скоростях сдвига.

Выводы. Представлена возможность изменения реологического характера течения легких и тяжелых смесей при изменении исследуемых факторов. Выполнен сравнительный анализ реологических кривых с использованием уравнения Оствальда – Вейля для тяжелых и легких бетонных смесей. Рассмотрена роль дисперсности минерального заполнителя и полых микросфер в управлении реологическими свойствами исследуемых ЛСУБ.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: самоуплотняющиеся бетонные смеси, полый заполнитель, мелкозернистый бетон, реология, напряжение сдвига, вязкость, уравнение Оствальда – Вейля, псевдопластическое течение, дилатантные течения

Финансирование и благодарности. Данная работа выполняется в рамках реализации Программы развития федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» на 2025–2036 годы. Работа финансировалась Министерством науки и высшего образования РФ, проект № FSWG-2026-0003.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Епихин С.Д., Иноземцев А.С. Влияние полого и плотного заполнителя на реологию самоуплотняющихся бетонных смесей // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 3. С. 399–410. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.3.399-410

Автор, ответственный за переписку: Сергей Дмитриевич Епихин, epikhinsd@mgsu.ru.

The effect of hollow and dense aggregates on the rheology of self-compacting concrete

Sergey D. Epikhin, Aleksandr S. Inozemtcev

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Construction needs new concrete. Self-compacting concretes (SCC) are gaining popularity. The advantage of SCC is high mobility, so the emphasis is on their rheological properties. The technology continues to develop in lightweight self-compacting concretes, that combines high mobility and low density. The study of LWSCC (Light-weight self-compacting concrete) focuses on the effect of the formulation on the properties of the mixture. The purpose of this study is to investigate the effect of the ratio of dry components on the rheological properties of LWSCC on hollow microspheres.

Materials and methods. The object of the study is LWSCC on hollow microspheres. The ratio of dry components varied depending on the target concrete density. The composition includes: Portland cement, ceramic hollow microspheres, silica additive, fractional sand (S_f), quartz powder (S_p), hyperplasticizer and water. The amount of water and the concentration

of plasticizer are assumed to be constant: 0.5 and 1.4 %, respectively. The results of studies of the rheological characteristics of LWSCC were obtained. The key rheological parameters are shear stress and viscosity.

Results. Concrete mixtures with a density of 1,400 kg/m³ have a dilatant flow pattern regardless of the S_p/S_f ratio. At densities of 1,500 and 1,600 kg/m³, the flow pattern changes to pseudoplastic at $S_p/S_f = 25/75$. The possibility of controlling the type of flow of heavy concrete by changing the S_p/S_f is shown. The difference in flow between lightweight and heavy concrete mixtures is reflected in the dependences of shear stress and viscosity on S_p/S_f . An increase in S_p increases the shear stresses and viscosity of LWSCC, for heavy compositions, a downward-to-upward relationship is observed in the range of $S_p/S_f = 25/75-75/25$ at different shear rates.

Conclusions. The possibility of changing the rheological character of the flow of lightweight and heavy mixtures with changes in the studied factors is shown. A comparative analysis of rheological curves using the Ostwald – Weil equation for heavy and light concrete mixtures has been performed. The role of the dispersion of mineral aggregate and hollow microspheres in controlling the rheological properties of the studied LWSCC is considered.

KEYWORDS: lightweight self-compacting concrete, hollow aggregates, fine-grained concrete, rheology, shear stresses, viscosity, rheology, Ostwald – Weil equation, pseudoplastic flow, dilatant flow

Funding and Acknowledgements. This work is carried out as part of the development program of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “National Research Moscow State University of Civil Engineering” for 2025–2036. The work was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project No. FSWG-2026-0003.

FOR CITATION: Epikhin S.D., Inozemtcev A.S. The effect of hollow and dense aggregates on the rheology of self-compacting concrete. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(3):399-410. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.3.399-410 (rus.).

Corresponding author: Sergey D. Epikhin, epikhinsd@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день мало найдется объектов строительства, где не использовался бы бетон [1]. Бетон — один из основных материалов современного строительства. Это обосновывает интерес ученых к исследованиям по усовершенствованию бетонов [2, 3]. Одним из приоритетных направлений фундаментальных и поисковых научных исследований в строительных науках является развитие теоретических и прикладных основ для получения новых легких, высокопрочных, долговечных бетонов. Поэтому совершенствование технологии самоуплотняющихся бетонов (СУБ) приобретает особую актуальность [4–6]. Такой бетон способен равномерно заполнять пространство опалубки без дополнительного уплотнения, что обусловлено высокой текучестью при обязательном сохранении целостности (однородности) структуры в состоянии покоя [7, 8].

Первый опыт массового применения технологии СУБ в России связан с непрерывным бетонированием нижней зоны фундаментной плиты под башню «А» комплекса «Федерация» ММДЦ «Москва-Сити» [9]. Еще один пример использования таких бетонов — бетонирование крупнейшей на территории Беларуси фундаментной плиты (объем бетона около 9100 м³) высотного здания на объекте «Газпром Центр» (строительство многофункционального комплекса в г. Минске на границах ул. Филимонова – просп. Независимости – ул. Макаенка [10]).

Востребованность СУБ объясняется высокой подвижностью, что обуславливает направление исследований, посвященных реологическим характеристикам, моделям и т.д. Мировой опыт в настоящее время описывает основные рецептурные факторы, способствующие получению и модифицированию СУБ [11, 12]. В публикациях [13, 14] представлен

критический обзор работ, посвященных реологии бетонной смеси. Авторами установлено влияние отдельных компонентов смеси на реологические свойства, включая: портландцемент [15], минеральные добавки (зола-унос, молотый доменный шлак и диоксид кремния) [16], крупные и мелкодисперсные заполнители, а также химические добавки (суперпластификатор, модификатор вязкости и воздухововлекающий агент). На реологию бетонной смеси существенное влияние оказывают следующие свойства минеральных добавок [17]: тип, химический состав, объемное содержание в смеси, плотность упаковки в бетоне [18], крупность частиц [19], гранулометрический состав. Наиболее важными показателями, описывающими реологические свойства бетонных смесей, являются предел текучести при сдвиге τ_0 и пластическая вязкость μ . Так, в труде [20] рассматривается влияние пористости на реологические свойства СУБ, а именно пластическую вязкость и предел текучести, полученные с помощью ротационного реометра Brookfield при заданном напряжении сдвига и скорости сдвига. Результаты экспериментов показали, что значения пластической вязкости и предела текучести снижаются с увеличением процентного содержания воздухововлекающей добавки. Данное снижение в основном объясняется наличием пузырьков воздуха, которые упрощают течение смеси. Установлено, что внутреннее трение между частицами песка и цемента сокращается из-за наличия пустот между ними, что служит причиной снижения предела текучести. По тому же принципу образование пустот способствует уменьшению сцепления цементного теста и, следовательно, снижению пластической вязкости смеси.

Развитие технологии конструкционных легких бетонов привело к потребности получения самоуплотняющихся его видов [21, 22]. Легкий самоуплот-

няющийся бетон (ЛСУБ) позволяет объединить такие полезные качества, как низкая плотность и высокая степень подвижности бетонной смеси. Особое внимание для таких бетонов необходимо уделять особенностям рецептуры для получения бетонной смеси с заданными свойствами [23–25]. В работе [26] рассматривается замена природных плотных заполнителей на крошку из переработанных автомобильных шин и на легкий шлаковый заполнитель с добавлением фибры. Показано, что увеличение объемного содержания армирующего компонента негативно влияет на удобоукладываемость смеси. При этом волокна, имеющие длину больше, чем минимальное расстояние между стержнями арматуры в свету, смоделированное в ходе стандартного испытания с J-образным кольцом, не проходят через него и накапливаются внутри испытательного устройства, что ограничивает применение такого решения в промышленных условиях, особенно в густоармированных конструкциях. Определено синергетическое действие ускорителей твердения (сульфоалюминатный цемент, хлорид кальция) и разной фибры (волокна из поливинилового спирта (ПВС) и целлюлозные нановолокна (ЦНВ)) на реологические свойства пенополистиролбетона [27]. В ходе испытаний, выполненных с помощью реометра Viskomat XL, установлено, что путем изменения количества волокон ПВС можно регулировать предел текучести, пластическую вязкость и тиксотропию сверхлегкого пенополистирольного бетона. Добавление ускорителя твердения дает возможность значительно снизить предел текучести и увеличить пластическую вязкость бетонного раствора. При этом совместное использование волокон ПВС и ускорителя твердения позволяет достигнуть эффекта, когда наблюдается увеличение предела текучести и снижение пластической вязкости суспензии.

Таким образом, исследование реологии самоуплотняющихся легких бетонов соответствует актуальным направлениям развития строительного произ-

водства, а установление особенностей течения таких бетонных смесей в сравнении с самоуплотняющимся тяжелым мелкозернистым бетоном востребовано для расширения представлений о способах управления их структурой.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для определения влияния таких рецептурных факторов, как дисперсность плотного заполнителя и содержание легкого заполнителя объектом исследования выбраны легкие бетонные смеси на полых микросферах, включающие следующие компоненты [28–31]: минеральное вяжущее вещество; комплексную кремнеземистую добавку; керамические микросферы; фракционный песок фр. 0,16–0,63 мм; кварцевую муку, поликарбоксилатный пластификатор; воду.

Минеральное вяжущее вещество — бездобавочный портландцемент (Ц) ЦЕМ I 42,5 Н производства АО «Мальцевский портландцемент» (ГОСТ 31108), соответствующий по химическому и минералогическому составу, согласно табл. 1, и основным свойствам, согласно табл. 2.

Комплексная кремнеземистая добавка FremSilica 2 (МКМ) представляет собой мелкие шарообразные частицы аморфного кремнезема со средней удельной поверхностью 20 м²/г, соответствующие ТУ ВУ 190669631.001–2011. При этом средний размер составляет около 0,1 мкм¹.

В качестве легкого заполнителя для снижения средней плотности бетона использовались полые керамические микросферы ForeSphere (МС) с диаметром частиц 10–500 мкм и основными характеристиками согласно табл. 3².

¹ FremSilica. URL: <http://www.frem-corp.ru/produktsiya/dobavki-v-beton/modifikatory/frem-silica/> full text

² ForeSphere. URL: <https://foresphere.com/catalog/alyumosilikatnye-mikrosfery/> full text

Табл. 1. Химический и минералогический состав клинкера

Table 1. Chemical and mineralogical composition of clinker

Оксиды / Oxides							Минералы / Minerals			
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
66,0	21,2	5,1	4,1	0,75	0,56	0,58	68,2	8,2	6,4	12,6

Табл. 2. Основные свойства используемого портландцемента

Table 2. The main properties of the Portland cement used

Показатель качества / Quality indicator	Значение / Values
Прочность на сжатие в возрасте 2 сут, МПа / Compressive strength. The hardening period is 2 days, MPa	22,9
Прочность на сжатие в возрасте 28 сут, МПа / Compressive strength. The hardening period is 28 days, MPa	52,6
Начало/конец схватывания, мин / Start/finish of setting, min	175/300
Удельная поверхность, м ² /кг / Specific surface area, m ² /kg	408
Нормальная густота цементного теста, % / Normal density of cement dough, %	24,3

Табл. 3. Свойства полых керамических микросфер ForeSphere

Table 3. Properties of hollow ceramic microspheres ForeSphere

Свойство / Property	Значение / Values
Насыпная плотность, кг/м ³ / Bulk density, kg/m ³	320–370
Истинная плотность, кг/м ³ / True density, kg/m ³	580–690
Средний размер частиц, мкм / Average particle size, microns	100
Толщина стенок микросферы, мкм / The thickness of the walls of the microsphere, microns	2–10
Плотность материала стенки, кг/м ³ / Wall material density, kg/m ³	2500
Предел прочности на сжатие, МПа / Compressive strength, MPa	15,0–28,0
Твердость по шкале Мооса / Mohs scale hardness	5–6

Табл. 4. Расход компонентов исследуемых бетонных смесей

Table 4. Component consumption in the studied concrete mixtures

Составы Compositions	Объемное содержание, % / Volume content, %				
	ПЦ / PC	МКМ / MS	$\frac{\Pi_m + \Pi_\phi}{S_p + S_f}$	МС / MS	В + Пл W + PI
D1400	20,0	3,1	8,8	46,4	21,7
D1500			13,4	41,8	
D1600			18,2	37,0	
D2200			55,2	0	

Для управления технологическими свойствами исследуемых бетонных смесей использовался гиперпластификатор Melflux 2651F (Пл), поликарбоксилатный эфир второго поколения, не влияющий на схватывание цемента³.

³ АО EVROHIM-1 FUNKCIONALNIE DOBAVKI // EUROCHEM-1 FUNCTIONAL ADDITIVES JSC. URL: <https://www.eurohim.ru/catalog/dobavki-dlya-suhih-stroitelnyh-smesej/dobavki-dlya-suhih-stroitelnyh-smesej/superplastifikatory/melflux>. full text

Кварцевая мука (Π_m) представляет собой тонкий песок, полученный путем помола фракционного кварцевого песка (Π_ϕ) в шаровой мельнице до $S_{уд} = 720 \text{ м}^2/\text{кг}$.

Соотношение сухих компонентов в составах варьировалось в зависимости от целевой плотности бетона путем изменения содержания полых микросфер (табл. 4). Для оценки влияния рецептурных факторов на технологические и реологические свойства бетонных смесей с разным содержанием полых микросфер

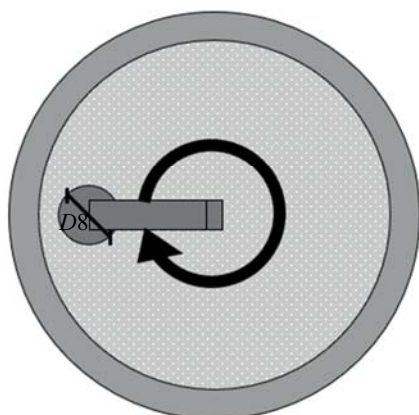
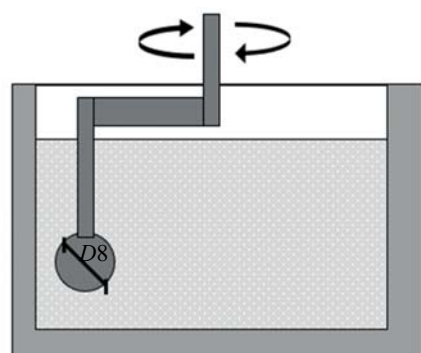
Табл. 5. Объемное содержание песка при различном соотношении Π_m/Π_ϕ Table 5. The volume content of sand at a different ratio S_p/S_f

$\frac{\Pi_m/\Pi_\phi}{S_p/S_f}$	Составы / Compositions							
	D2200		D1600		D1500		D1400	
	Компоненты / Components							
	Π_m/S_p	Π_ϕ/S_f	Π_m/S_p	Π_m/S_p	Π_m/S_p	Π_m/S_p	Π_m/S_p	Π_m/S_p
0/100	0	55,2	0	18,2	0	13,4	0	8,8
25/75	13,8	41,4	4,55	13,65	3,35	10,05	2,2	6,6
50/50	27,6	27,6	9,1	9,1	6,7	6,7	4,4	4,4
75/25	41,4	13,8	13,65	4,55	10,05	3,35	6,6	2,2
100/0	55,2	0	18,2	0	13,4	0	8,8	0



Рис. 1. Автоматический растворосмеситель Automix

Fig. 1. Automatic mortar mixer Automix



a



b

Рис. 2. Определение вязкости и напряжения сдвига бетонной смеси на полых микросферах с помощью ротационного вискозиметра MCR 101: *a* — схема измерения; *b* — внешний вид

Fig. 2. Determination of viscosity and shear stress of concrete mix on hollow microspheres by rotary viscometer MCR 101: *a* — measurement scheme; *b* — visual appearance

количество воды и концентрация пластификатора приняты постоянными $В/Ц = 0,5$ и $C_d = 1,4\%$.

Изменение соотношения тонкой и фракционированной части (табл. 5) кварцевого песка позволяет установить вклад компонентов идентичного минерального состава в распределение воды в бетоне разной плотности.

Для приготовления бетонной смеси применялся автоматический растворосмеситель Automix⁴ (рис. 1), реализующий программу перемешивания согласно ГОСТ 30744–2001 «Цементы. Методы испытаний с использованием полифракционного песка» п. 8.2.1 «Приготовление стандартного цементного раствора» с поэтапным варьированием скорости перемешивания при 140 ± 5 об/мин и 285 ± 10 об/мин.

Реологические свойства бетонной смеси оценивались по величине вязкости и напряжения сдвига бетонной смеси, полученной на ротационном вискозиметре MCR 101 (рис. 2) при орбитальном перемещении измерительной системы шар (диаметр 8 мм)

⁴ GEO-CON. PRODUCTS PTY LTD. Testing Equipment for the Construction Industry. URL: <https://www.geo-con.com.au/product/fully-automatic-mortar-mixers-automix/>

с линейным приращением скорости сдвига до величины 1 с^{-1} в течение 60 с.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В соответствии с указанной выше методикой получены зависимости напряжения сдвига исследуемых бетонных смесей от скорости сдвига. Реологические кривые для бетонных смесей разной плотности с варьируемым соотношением Π_m/Π_ϕ представлены на рис. 3.

По анализу графиков, представленных на рис. 3, снижение плотности бетонной смеси за счет увеличения доли легкого заполнителя приводит к увеличению напряжения сдвига, что указывает на ухудшение текучести. При этом составы легкобетонных смесей можно описать схожим характером течения (рис. 3, а–с) вне зависимости от соотношения тонкой и фракционированной составляющей кварцевого песка. Однако для смеси тяжелого бетона явно наблюдается изменение вида кривой при варьировании Π_m/Π_ϕ (рис. 3, d).

Проанализируем реологическое поведение исследуемых бетонных смесей с использованием уравнения Оствальда – Вейля [30]:

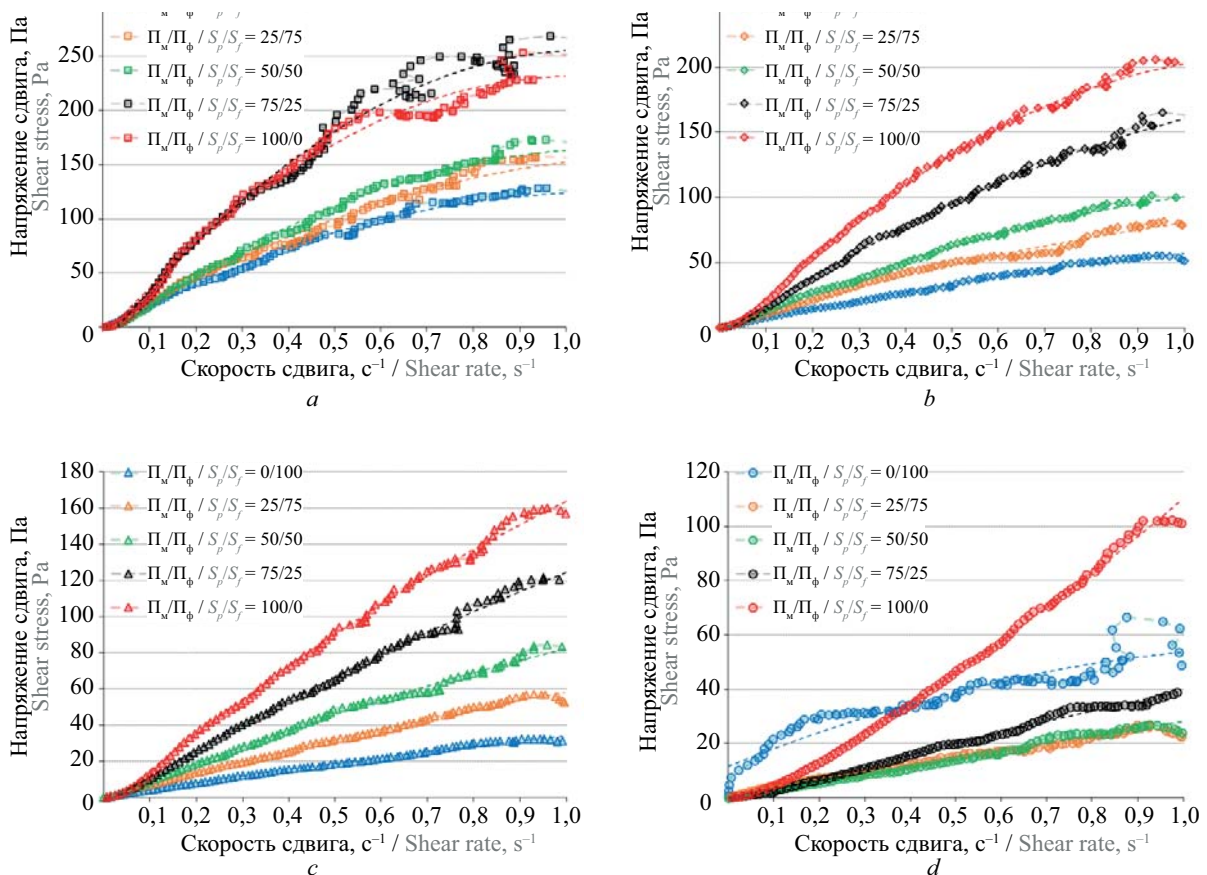
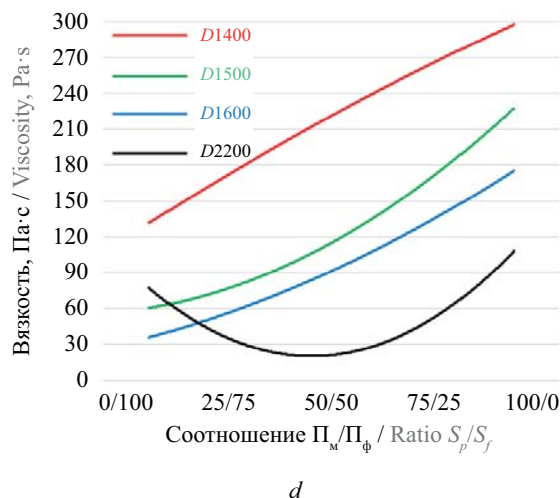
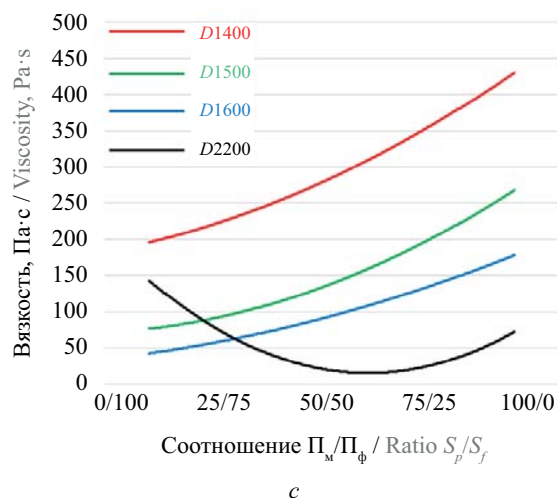
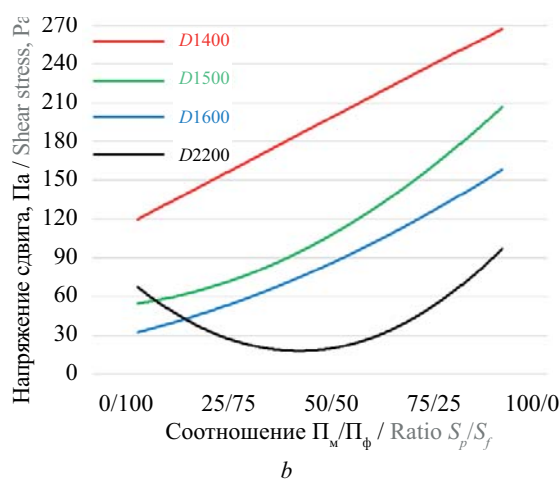
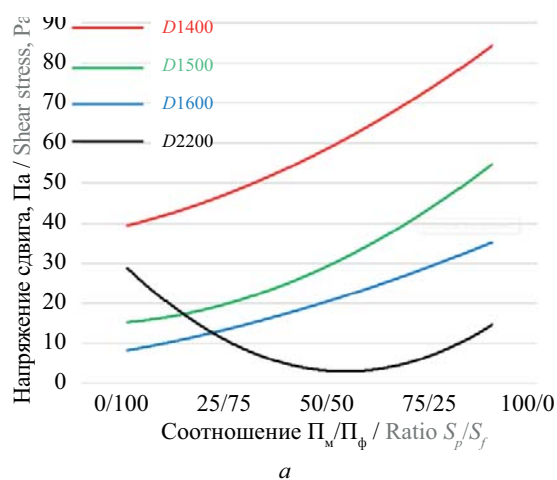


Рис. 3. Реологические кривые «напряжение сдвига – скорость сдвига» бетонных смесей: а — D1400; б — D1500; в — D1600; д — D2200

Fig. 3. Rheological curves “shear stress – shear rate” of concrete mixtures: а — D1,400; б — D1,500; в — D1,600; д — D2,200

Табл. 6. Коэффициенты уравнения Оствальда – Вейля, описывающие реологические кривые исследуемых бетонных смесей при варьировании Π_m/Π_ϕ **Table 6.** Coefficients of the Ostwald – de Waele equation for the rheological flow curves of the studied concrete mixtures with varying S_p/S_f ratio

$\frac{\Pi_m}{\Pi_\phi}$ $\frac{S_p}{S_f}$	Составы / Compositions							
	D1400		D1500		D1600		D2200	
	<i>k</i>	<i>n</i>	<i>k</i>	<i>n</i>	<i>k</i>	<i>n</i>	<i>k</i>	<i>n</i>
0/100	174,0	1,04	65,4	0,99	36,4	0,95	52,0	0,42
25/75	207,8	1,09	97,8	1,04	63,8	1,00	26,7	0,83
50/50	237,7	1,16	127,6	1,07	88,2	1,01	24,4	0,87
75/25	359,7	1,19	204,8	1,19	151,0	1,21	45,1	1,22
100/0	396,4	1,22	283,8	1,22	212,9	1,28	121,2	1,42

**Рис. 4.** Зависимость изменения реологических свойств от соотношения кварцевой муки и фракционированного песка тяжелых и легких бетонов при разных скоростях сдвига: *a* — напряжения сдвига при $0,2 \text{ c}^{-1}$; *b* — напряжения сдвига при $0,9 \text{ c}^{-1}$; *c* — вязкость при $0,2 \text{ c}^{-1}$; *d* — вязкость при $0,9 \text{ c}^{-1}$ **Fig. 4.** The dependence of the rheological features from ratio of quartz flour and fractionated sand in heavy and lightweight concretes at different shear rates: *a* — shear stress with 0.2 s^{-1} ; *b* — shear stress with 0.9 s^{-1} ; *c* — viscosity with 0.2 s^{-1} ; *d* — viscosity with 0.9 s^{-1}

$$\tau = k \cdot \dot{\gamma}^n,$$

где τ — напряжение сдвига; k — показатель консистенции; $\dot{\gamma}$ — скорость сдвига; n — показатель, характеризующий тип течения ($n < 1$ — псевдопластическое течение, $n > 1$ — дилатантное течение).

Полученные параметры уравнений для каждого состава, описывающих реологические кривые, представлены в табл. 6.

Анализ табл. 6 показывает, что составы *D1400* вне зависимости от соотношения Π_m/Π_ϕ имеют дилатантный характер течения смеси ($n > 1$). Структура с таким типом течения представляет собой плотноупакованную дисперсную систему, где жидкая фаза, распределенная по поверхности твердых частиц, выступает в качестве смазки, уменьшающей трение между ними. При увеличении скорости сдвига в таких системах плотность упаковки частиц уменьшается, а жидкости становится недостаточно для скольжения трущихся друг об друга частиц. Это отражается в более интенсивном приращении напряжения сдвига, чем скорости сдвига.

В составах средней плотностью 1500 и 1600 кг/м³ наблюдается смена типа течения с псевдопластического на дилатантный при $\Pi_m/\Pi_\phi = 25/75$. То есть при таком соотношении кварцевой муки и фракционированного песка структура представляет собой дисперсные системы, в которых твердые частицы имеют достаточное сцепление между собой, чтобы течение при увеличении скорости сдвига выполнялось агрегатами или звеньями. В таких системах вода может располагаться на поверхности частиц твердой фазы неравномерно по объему, а течение осуществляется слоями. На графиках рис. 3 это выражается меньшим приращением напряжения сдвига, чем скорости сдвига. Отметим, что коэффициент густоты k для составов *D1500* и *D1600* при увеличении Π_m/Π_ϕ увеличивается. Данный показатель аналогичным образом зависит от содержания легкой фракции: чем больше полых микросфер (ниже плотность), больше коэффициент k или гуще бетонная смесь.

В табл. 6 видно, что соотношение Π_m/Π_ϕ влияет на характер течения бетонной смеси, что отражается в изменении значения коэффициента n , где граничным диапазоном смены характера течения с псевдопластического на дилатантное является соотношение 50/50–75/25. Это указывает на описанное выше изменение положительного влияния кварцевой муки на трение между частицами заполнителя.

Из рис. 3 следует, что напряжение сдвига составов легкого бетона возрастает при увеличении доли кварцевой муки, а у составов тяжелого бетона меняется с не прямо пропорциональной зависимостью. Это отчетливо видно, если сравнить графики напряжения сдвига и вязкости при одинаковой скорости сдвига, которые представлены на рис. 4 для скорости сдвига, равной 0,2 и 0,9 с⁻¹.

На рис. 4 видно, что увеличение доли кварцевой муки с соотношения 0/100 до 100/0 приводит к закономерному увеличению напряжения сдвига и вязкости для всех составов легкого бетона, что связано с повышением доли водопотребного компонента в системе. Аналогичное влияние наблюдается при увеличении доли полых микросфер: графики напряжения сдвига и вязкости с меньшей плотностью приведены выше. Однако для составов тяжелого бетона зависимость напряжения сдвига и вязкости от Π_m/Π_ϕ описывается экстремальной зависимостью. Увеличение количества кварцевой муки в составе до значений Π_m/Π_ϕ в границе 50/50–75/25 способствует снижению вязкости и напряжению сдвига. Это объясняется увеличением доли цементно-минерального теста, что приводит к увеличению расстояния между зернами песка. Дальнейшее насыщение бетонной смеси свыше указанного диапазона сопровождается увеличением исследуемых параметров. Подобная зависимость связана с преобразованием структуры тяжелой бетонной смеси.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Таким образом, полученные результаты исследования позволяют сформулировать следующие выводы:

- реологические кривые, описанные уравнением Оствальда – Вейля, показывают дилатантный характер течения бетонных смесей *D1400* вне зависимости от содержания Π_m/Π_ϕ . Для *D1500* и *D1600* дилатантный характер течения сменяет псевдопластичный при $\Pi_m/\Pi_\phi = 25/75$. Показана возможность управления типом течения тяжелых бетонов *D2200* варьированием соотношения кварцевой муки и фракционированного песка;

- отличие в течение легких и тяжелых бетонных смесей отражается на зависимостях напряжения сдвига и вязкости от Π_m/Π_ϕ . Для составов легкого бетона увеличение доли содержания кварцевой муки способствует увеличению напряжения сдвига и вязкости, а для тяжелого бетона наблюдается смена нисходящей зависимости на восходящую в диапазоне $\Pi_m/\Pi_\phi = 25/75$ –75/25 при разных скоростях сдвига.

Полученные результаты исследований дополняют представления о влиянии рецептурных факторов на ключевые свойства самоуплотняющихся легких бетонов на полых микросферах [30, 31]. Помимо традиционных рецептурных факторов, важную роль в достижении требуемой текучести и однородности имеет соотношение минерального заполнителя разной дисперсности, отражающее вариативность дисперсности твердой фазы.

Перспективой развития темы является установление влияния факторов дисперсности плотного и объемного содержания полого заполнителя на показатели однородности бетонных смесей, а также на физико-механические свойства затвердевшего бетона.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Усова А.В. Современные бетоны в строительстве и их применение // Тенденции развития науки и образования. 2021. № 74–4. С. 102–105. DOI: 10.18411/lj-06-2021-149. EDN HDJONR.
2. Рыльская К.А., Ничинский А.Н. Способы модификации свойств бетонной смеси и тяжелого бетона // Актуальные вопросы современной науки : сб. ст. по мат. XX Междунар. науч.-практ. конф. 2019. С. 193–197. EDN НРХХМЖ.
3. Кравцов А.В., Цыбакин С.В. Опыт применения химических добавок пластифицирующего действия на основе поликарбоксилатов в бетонах // Труды Костромской государственной сельскохозяйственной академии. 2015. С. 50–55. EDN VZCXRL.
4. Соловьев А.К., Соловьев К.А., Стекольников Н.В. Самоуплотняющийся бетон в архитектурных конструкциях // Архитектура и современные информационные технологии. 2018. № 2 (43). С. 171–184. EDN UORRCZ.
5. Соргутов И.В., Иванов П.Ю., Крюкова О.В. Применение самоуплотняющихся бетонов в строительстве монолитных зданий и сооружений в РФ // Системные технологии. 2021. № 3 (40). С. 14–20. EDN MGMXHQ.
6. Мовсисян А.М. Влияние применения самоуплотняющегося бетона в монолитных конструкциях на эффективность возведения строительного объекта // Современные научные исследования и инновации. 2024. № 2 (154). EDN UKGYLK.
7. Федюк Р.С., Мочалов А.В., Лесовик В.С., Гридчин А.М., Фишер Х.Б. Композиционные вяжущие и самоуплотняющиеся фибробетоны для защитных сооружений // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2018. № 7. С. 77–85. DOI: 10.12737/article_5b4f02bf93df52.30110991. EDN XVLQJV.
8. Мозгалева К.М., Головнев С.Г. Самоуплотняющиеся бетоны: возможности применения и свойства // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2011. № 4. С. 55–60. EDN ONJNAZ.
9. Фаликман В.Р., Денискин В.В., Калашиников О.О., Сорокин В.Ю. Отечественный опыт производства и применения самоуплотняющегося бетона // Национальная ассоциация ученых. 2015. № 2–3 (7). С. 68–73. EDN YMGQDD.
10. Батяновский Э.И., Бондарович А.И., Калиновская Н.Н., Рябчиков П.В. Самоуплотняющийся бетон и технология бетонирования фундаментного массива с использованием 9000 кубических метров бетона // Наука и техника. 2021. Т. 20. № 4. С. 329–337. DOI: 10.21122/2227-1031-2021-20-4-329-337. EDN RIPRJM.
11. Mandal R., Panda S.K., Nayak S. Evaluation of the rheological properties of self-compacting recycled aggregate concrete // Materials Today: Proceedings. 2023. Vol. 93. Pp. 170–175. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.07.114
12. Ерофеев В.Т., Санягина Я.А., Ерофеева И.В., Максимова И.Н. Подбор составов декоративно-отделочных порошково-активированных бетонов с зернистой фактурой поверхности по реологическим свойствам // Региональная архитектура и строительство. 2022. № 3 (52). С. 16–31. DOI: 10.54734/20722958_2022_3_16. EDN OVYJCE.
13. Jiao D., Shi C., Yuan Q., An X., Liu Y., Li H. Effect of constituents on rheological properties of fresh concrete : a review // Cement and Concrete Composites. 2017. Vol. 83. Pp. 146–159. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2017.07.016
14. Mandal R., Panda S.K., Nayak S. Rheology of Concrete: Critical Review, recent Advancements, and future prospectives // Construction and Building Materials. 2023. Vol. 392. P. 132007. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132007
15. Kaufmann J., Winnefeld F., Hesselbarth D. Effect of the addition of ultrafine cement and short fiber reinforcement on shrinkage, rheological and mechanical properties of Portland cement pastes // Cement and Concrete Composites. 2004. Vol. 26. Issue 5. Pp. 541–549. DOI: 10.1016/S0958-9465(03)00070-2
16. Zhang X., Han J. The effect of ultra-fine admixture on the rheological property of cement paste // Cement and Concrete Research. 2000. Vol. 30. Issue 5. Pp. 827–830. DOI: 10.1016/S0008-8846(00)00236-2
17. Lee S.H., Kim H.J., Sakai E., Daimon M. Effect of particle size distribution of fly ash–cement system on the fluidity of cement pastes // Cement and Concrete Research. 2003. Vol. 33. Issue 5. Pp. 763–768. DOI: 10.1016/S0008-8846(02)01054-2
18. Chen J.J., Kwan A.K.H. Superfine cement for improving packing density, rheology and strength of cement paste // Cement and Concrete Composites. 2012. Vol. 34. Issue 1. Pp. 1–10. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2011.09.006
19. Li T., Liu J. Effect of aggregate size on the yield stress of mortar // Construction and Building Materials. 2021. Vol. 305. P. 124739. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124739
20. Benaicha M., Jalbaud O., Alaoui A.H., Burtshell Y. Porosity effects on rheological and mechanical behavior of self-compacting concrete // Journal of Building Engineering. 2022. Vol. 48. P. 103964. DOI: 10.1016/j.jobbe.2021.103964
21. Adhikary S.K., Ashish D.K., Sharma H., Patel J., Rudzionis Z., Al-Ajamee M. et al. Lightweight self-compacting concrete : a review // Resources, Conservation & Recycling Advances. 2022. Vol. 15. P. 200107. DOI: 10.1016/j.rcradv.2022.200107
22. Kumar P., Pasla D., Saravanan T.J. Self-compacting lightweight aggregate concrete and its proper-

ties : a review // *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 375. P. 130861. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.130861

23. Kumar P., Dinakar P., Saravanan T.J. Development and performance analysis of structural lightweight aggregate self-compacting concrete: A sustainable solution // *Process Safety and Environmental Protection*. 2025. Vol. 197. P. 107052. DOI: 10.1016/j.psep.2025.107052

24. Kuttagola I., Prashanth M.H. Development and performance evaluation of self-compacting lightweight alkali-activated concrete incorporating hydrotron clay balls // *Structures*. 2025. Vol. 71. P. 108124. DOI: 10.1016/j.istruc.2024.108124

25. Palacio A.J., Raggiotti B.B., Rougier V.C. Development and experimental verification of a design method for steel fibre-reinforced high strength lightweight self-compacting concrete // *Construction and Building Materials*. 2024. Vol. 453. P. 139012. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.139012

26. Aslani F., Kelin J. Assessment and development of high-performance fibre-reinforced lightweight self-compacting concrete including recycled crumb rubber aggregates exposed to elevated temperatures // *Journal*

of Cleaner Production. 2018. Vol. 200. Pp. 1009–1025. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.07.323

27. Wang Z., Zhang H., Wang Z., Yu O. Rheological and mechanical performances of ultralightweight expanded polystyrene concrete: Synergistic effect of accelerator and multiscale fibers // *Construction and Building Materials*. 2025. Vol. 476. P. 141265. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.141265

28. Патент RU № 2548303 С1. Высокопрочный легкий фибробетон / Королев Е.В., Иноземцев А.С.; заявл. от 11.04.2014. Опубл. 20.04.2015. EDN ZFGSHZ

29. Иноземцев А.С., Королев Е.В. Высокопрочные легкие бетоны : монография. СПб. : СПбГАСУ, 2022. 192 с. EDN UCJRAZ.

30. Епихин С.Д., Иноземцев А.С. Реологические свойства самоуплотняющихся легких бетонных смесей на полых микросферах // *Строительство: наука и образование*. 2024. Т. 14. № 1. С. 135–148. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.1.9. EDN UHPUAB.

31. Епихин С.Д., Иноземцев А.С. Физико-механические свойства самоуплотняющихся легких бетонов на полых микросферах // *Современное строительство и архитектура*. 2024. № 11 (54). DOI: 10.60797/mca.2024.54.5. EDN GNNJGQ.

Поступила в редакцию 1 октября 2025 г.

Принята в доработанном виде 13 октября 2025 г.

Одобрена для публикации 16 февраля 2026 г.

ОБ АВТОРАХ: **Сергей Дмитриевич Епихин** — аспирант, преподаватель, кафедра строительного материаловедения; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 1168083, ResearcherID: JHT-0817-2023, ORCID: 0009-0004-0193-1904; epikhinsd@mgsu.ru;

Александр Сергеевич Иноземцев — доктор технических наук, доцент, доцент кафедры строительного материаловедения; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 2444-1204, Scopus: 55889834500, ResearcherID: K-6341-2013, ORCID: 0000-0001-7807-688X; InozemcevAS@mgsu.ru.

Вклад авторов:

Епихин С.Д. — выполнение экспериментальных работ, подготовка текста статьи, формулирование выводов. Иноземцев А.С. — научное руководство, постановка цели и задач исследования, анализ и экспертиза результатов, формулирование выводов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Usova A.V. Modern concretes in construction and their application. *Trends in the development of science and education*. 2021; 74-4:102-105. DOI: 10.18411/lj-06-2021-149. EDN HDJONR. (rus.)

2. Rylskaya K.A., Nichinsky A.N. Methods of modification of properties of concrete mix and heavy concrete. *Actual issues of modern science : collection of articles based on the materials of the XX international scientific and practical conference*. 2019; 193-197. EDN HPHXMJ. (rus.)

3. Kravtsov A.V., Tsybakin S.V. The usage of the polycarboxylate based chemical plasticizing admixtures in the concrete. *Proceedings of the Kostroma State Agricultural Academy*. 2015; 50-55. EDN VZCXRL. (rus.)

4. Solovyev A.K., Solovyov K.A., Stekolnikov N.V. Self-compacting concrete in architectural structures. *Architecture and Modern Information Technologies*. 2018; 2(43):171-184. EDN UORRCZ. (rus.)

5. Sorgutov I.V., Ivanov P.Y., Kryukova O.V. The use of self-compacting concrete in the construction

of monolithic buildings and structures in the Russian Federation. *System Technologies*. 2021; 3(40):14-20. EDN MGMXHQ. (rus.).

6. Movsisyan A.M. The influence of the use of Self-compacting concrete in monolithic structures on the effectiveness of the construction of a construction site. *Modern Scientific Researches and Innovations*. 2024; 2(154). EDN UKGYLK. (rus.).

7. Fedyuk R.S., Mochalov A.V., Lesovik V.S., Gridchin A.M., Fisher H.B. Composite bonding and self-fitting fibrobetons for protective facilities. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2018; 7:77-85. DOI: 10.12737/article_5b4f02bf93df52.30110991. EDN XVLQJV. (rus.).

8. Mozgalev K.M., Golovnev S.G. Self-compacting concretes: application possibilities and properties. *Academic Bulletin of the UralNIiproekt RAASN*. 2011; 4:55-60. EDN ONJNAZ. (rus.).

9. Falikman V.R., Deniskin V.V., Kalashnikov O.O., Sorokin V.Y. Domestic experience in the production and use of self-compacting concrete. *National Association of Scientists*. 2015; 2-3(7):68-73. EDN YMGQDD. (rus.).

10. Batyanovskiy E.I., Bondarovich A.I., Kalinovskaya N.N., Ryabchikov P.V. Self-compacting concrete and concreting technology for foundation block using 9000 cubic meters of concrete. *Science and Technique*. 2021; 20(4):329-337. DOI: 10.21122/2227-1031-2021-20-4-329-337. EDN RIPRJM. (rus.).

11. Mandal R., Panda S.K., Nayak S. Evaluation of the rheological properties of self-compacting recycled aggregate concrete. *Materials Today: Proceedings*. 2023; 93:170-175. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.07.114

12. Erofeev V.T., Sanyagina Ya.A., Erofeeva I.V., Maksimova I.N. Selection of compositions of decorative finishing powder-activated concrete with a grain texture surface by rheological properties. *Regional Architecture and Engineering*. 2022; 3(52):16-31. DOI: 10.54734/20722958_2022_3_16. EDN OVYJCE. (rus.).

13. Jiao D., Shi C., Yuan Q., An X., Liu Y., Li H. Effect of constituents on rheological properties of fresh concrete : a review. *Cement and Concrete Composites*. 2017; 83:146-159. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2017.07.016

14. Mandal R., Panda S.K., Nayak S. Rheology of Concrete: Critical Review, recent Advancements, and future perspectives. *Construction and Building Materials*. 2023; 392:132007. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132007

15. Kaufmann J., Winnefeld F., Hesselbarth D. Effect of the addition of ultrafine cement and short fiber reinforcement on shrinkage, rheological and mechanical properties of Portland cement pastes. *Cement and Concrete Composites*. 2004; 26(5):541-549. DOI: 10.1016/S0958-9465(03)00070-2

16. Zhang X., Han J. The effect of ultra-fine admixture on the rheological property of cement paste.

Cement and Concrete Research. 2000; 30(5):827-830. DOI: 10.1016/S0008-8846(00)00236-2

17. Lee S.H., Kim H.J., Sakai E., Daimon M. Effect of particle size distribution of fly ash–cement system on the fluidity of cement pastes. *Cement and Concrete Research*. 2003; 33(5):763-768. DOI: 10.1016/S0008-8846(02)01054-2

18. Chen J.J., Kwan A.K.H. Superfine cement for improving packing density, rheology and strength of cement paste. *Cement and Concrete Composites*. 2012; 34(1):1-10. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2011.09.006

19. Li T., Liu J. Effect of aggregate size on the yield stress of mortar. *Construction and Building Materials*. 2021; 305:124739. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124739

20. Benaicha M., Jalbaud O., Alaoui A.H., Burtshell Y. Porosity effects on rheological and mechanical behavior of self-compacting concrete. *Journal of Building Engineering*. 2022; 48:103964. DOI: 10.1016/j.job.2021.103964

21. Adhikary S.K., Ashish D.K., Sharma H., Patel J., Rudzionis Z., Al-Ajamee M. et al. Lightweight self-compacting concrete : a review. *Resources, Conservation & Recycling Advances*. 2022; 15:200107. DOI: 10.1016/j.rcradv.2022.200107

22. Kumar P., Pasla D., Saravanan T.J. Self-compacting lightweight aggregate concrete and its properties : a review. *Construction and Building Materials*. 2023; 375:130861. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.130861

23. Kumar P., Dinakar P., Saravanan T.J. Development and performance analysis of structural lightweight aggregate self-compacting concrete: A sustainable solution. *Process Safety and Environmental Protection*. 2025; 197:107052. DOI: 10.1016/j.psep.2025.107052

24. Kuttagola I., Prashanth M.H. Development and performance evaluation of self-compacting lightweight alkali-activated concrete incorporating hydroton clay balls. *Structures*. 2025; 71:108124. DOI: 10.1016/j.istruc.2024.108124

25. Palacio A.J., Raggiotti B.B., Rougier V.C. Development and experimental verification of a design method for steel fibre-reinforced high strength lightweight self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*. 2024; 453:139012. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.139012

26. Aslani F., Kelin J. Assessment and development of high-performance fibre-reinforced lightweight self-compacting concrete including recycled crumb rubber aggregates exposed to elevated temperatures. *Journal of Cleaner Production*. 2018; 200:1009-1025. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.07.323

27. Wang Z., Zhang H., Wang Z., Yu O. Rheological and mechanical performances of ultralightweight expanded polystyrene concrete: Synergistic effect of accelerator and multiscale fibers. *Construction and Building Materials*. 2025; 476:141265. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.141265

28. Patent RU No. 2548303 C1. *High-strength lightweight fiber-reinforced concrete* / Korolev E.V., Inozemtsev A.S.; declared 11.04.2014. Publ. 20.04.2015. EDN ZFGSHZ

29. Inozemtsev A.S., Korolev E.V. *High-strength lightweight concretes : monograph*. St. Petersburg, SPbGASU, 2022; 192. EDN UCJRAZ. (rus.).

30. Epikhin S.D., Inozemtsev A.S. Rheological properties of self-compacting lightweight con-

crete mixtures on hollow microspheres. *Construction: Science and Education*. 2024; 14(1):135-148. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.1.9. EDN UHPUAB. (rus.).

31. Epikhin S.D., Inozemtcev A.S. Physical and mechanical properties of self-compacting lightweight concretes on hollow microspheres. *Modern Construction and Architecture*. 2024; 11(54). DOI: 10.60797/mca.2024.54.5. EDN GNNJGQ. (rus.).

Received October 1, 2025.

Adopted in revised form on October 13, 2025.

Approved for publication on February 16, 2026.

BI O N O T E S : **Sergey D. Epikhin** — postgraduate student, lecturer, Department of Building Materials Science; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 1168083, ResearcherID: JHT-0817-2023, ORCID: 0009-0004-0193-1904; epikhinsd@mgsu.ru;

Aleksandr S. Inozemtcev — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Building Materials Science; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 2444-1204, Scopus: 55889834500, ResearcherID: K-6341-2013, ORCID: 0000-0001-7807-688X; InozemtcevAS@mgsu.ru.

Contribution of the authors:

Sergey D. Epikhin — performing experimental work, preparing the text of the article, formulation of conclusions.

Aleksandr S. Inozemtcev — scientific guidance, setting the goals and objectives of the study, analysis and examination of results, drawing conclusions.

The authors declare that there is no conflict of interest.